

Bremskraftverteilung

Fren Kuvvetinin Dağılımı

Doç. Dr. Müh. Mustafa DEMİRSOY *

«In der vorliegenden Arbeit wird die Bremskraftverteilung eines Fahrzeugs beschrieben. Besonders, wenn das Fahrzeug auf einer geradenfahrt gebremst wird. Dabei wurden gezeigt, wie sich die dynamische Belastung der Räder durch die Wirkung der Achslastverlagerung ändert. Ausserdem, um bei den Rädern des Fahrzeugs eine ideale Abbremsung zu erzielen, wurde gezeigt, wie die hydraulischen Drücken an den Rädern geändert werden.»

Bezeichnungen :

B_{VA}, B_{HA}	[N]	Bremskräfte an der Vorder- und Hinterachse
B'_{VA}, B'_{HA}	[N]	Ideale Bremskräfte an der Vorder- und Hinterachse
G	[kp]	Gesamtgewicht des Fahrzeug $G = m \cdot g$; G_v, G_h
G'_{VA}, G'_{HA}	[kp]	G_v, G_h Dynamische Achslasten
a	[—]	Abbremsung, a_{max}, a_{ideal}
a/f	[—]	Haftwertausnutzung $(a/f)_{VA}, (a/f)_{HA}$
b	[m/s ²]	Fahrzeugbeschleunigung b_n, b_v, b_h
f_K	[—]	Kraftschlussanstrengungswert, $f_{K(VA)}, f_{K(HA)}$
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	Schwerpunkthöhe
L_n, L_m	[m]	Abstand des Schwerpunktes von Vorder- bzw. Hinterachse
P_h	[bar]	Hydraulischer Druck $P_{h(VA)}, P_{h(HA)}$
μ	[—]	Reibungskoeffizient zwischen Scheibe und Bremsbelag
$1-\phi, \phi$	[—]	Bremskraftverteilung

*) Ege Üniversitesi Makina Fakültesi, Bornova, Türkei.

1. — Einleitung

Infolge der Achslastverlagerung beim Bremsvorgang ist es praktisch nicht zu vermeiden, dass je nach Strassenzustand und Höhe der Verzögerung entweder die Hinterachse (HA) oder die Vorderachse (VA) eines Kraftwagens überbremst wird, so lange man im Fahrzeug selbst eine «feste Bremskraftverteilung» vorsieht. Da «Überbremsen» der HA fast immer die Gefahr des «Schleuderns» eines Wagens begünstigt, «Überbremsen» der VA aber die Lenkfähigkeit beeinträchtigt, werden heute von den meisten Fahrzeugherstellern Untersuchungen durchgeführt und Diagramme angelegt, die die Zusammenhänge zwischen Verzögerung (b) bzw. Abbremsung ($a=b/g$), Gewichtsverlagerung und Reibung Rad/Fahrbahn (μ)-besser sagt man «Kraftschlussanstrengung» zwischen Rad und Fahrbahn (f_k)-erkennen lassen.

$$f_k = \frac{\text{Tangentialkraft}}{\text{Normalkraft}} = \frac{\text{Bremskraft}}{\text{dyn. Radlast}} \quad \text{am Rad}$$

Nun sind aber nicht nur die Auffassungen über die zweckmässigste Bremskraftverteilung unterschiedlich, sondern - bei durchaus gleicher Zielsetzung - auch die Darstellungsmethoden, so dass es zur Vorbeugung von Misserstaendnissen zweckmässig erscheint, die meist gebräuchlichen Verfahren kurz zu erläutern und zu vergleichen. Dabei soll aus Gründen der Übersichtlichkeit und allgemeinen Anwendbarkeit soweit wie möglich mit dimensionslosen Grössen gearbeitet werden.

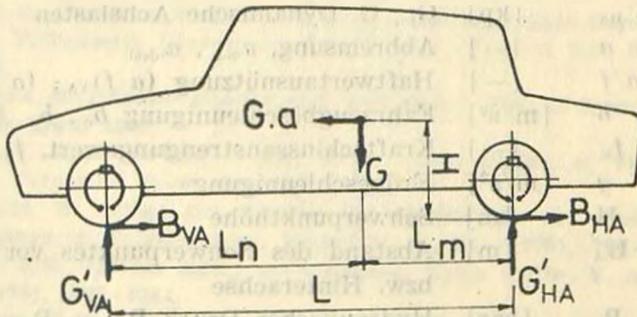


Bild. 1. — Kräfte am Fahrzeug beim Bremsen (Roll- und Luftwiderstand vernachlässigt).

Die anzustrebende Bremskräfte an Vorder- und Hinterachse eines

Kraftfahrzeuges sollen den dynamischen Achslasten und der Abbremsung proportional sein. Das bedeutet nach Bil 1, [2] :

$$B_{VA_{\text{oll}}} = G'_{VA} \cdot a = G \cdot \frac{L_a + H \cdot a}{L} \cdot a = G \cdot a (1 - \psi + a \cdot \kappa) \quad (1)$$

$$B_{HA_{\text{oll}}} = G'_{HA} \cdot a = G \cdot \frac{L_a - H \cdot a}{L} \cdot a = G \cdot a (\psi - a \cdot \kappa) \quad (2)$$

2. — Kraftschlussanstrengung und Haftwert

Mit den Bezeichnungen des Bildes (1) ergeben sich die Achslastanteile an VA und HA gemaess (Bild 2) und bei fester Bremskraftverteilung (gekennzeichnet durch $1 - \phi$ und ϕ) die Bremskraftanteile an VA und HA in Abhaengigkeit von a gemaess Bild 3.

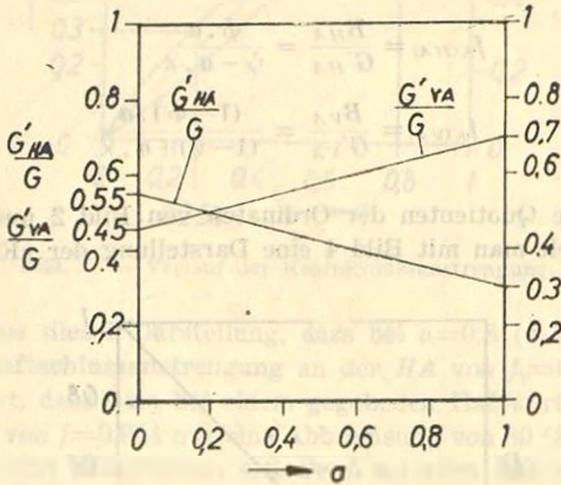


Bild. 2. — Verlauf der Achslast bzw. des Achslastanteiles über der Abbremsung.

Aus den Gleichungen (1) und (2) erzielt man die Beziehungen zwischen den dynamischen Achslasten und den Fahrzeuggewicht (Bild 2).

$$\frac{G'_{HA}}{G} = \psi - a \cdot \kappa \quad (3)$$

$$\frac{G'_{VA}}{G} = (1 - \psi) + a \cdot \kappa \quad (4)$$

Von der anderen Seite, aus der, durch die Konstruktion festgelegte Grössen, werden die unten angegebenen Beziehungen erzielt :

$$B = G \cdot a \quad (5)$$

$$B_{HA} = \phi \cdot B = \phi \cdot (G \cdot a) \quad (6)$$

$$B_{VA} = (1 - \phi) \cdot B = (1 - \phi) \cdot (G \cdot a) \quad (7)$$

$$\frac{B_{HA}}{G} = \phi \cdot a \quad (8)$$

$$\frac{B_{VA}}{G} = (1 - \phi) \cdot a \quad (9)$$

Aus diesen Beziehungen können die folgende Beziehungen der Kraftschlussanstrengungswerte der Vorder- und Hinterachse gefunden werden.

$$j_{K(HA)} = \frac{B_{HA}}{G_{HA}} = \frac{\phi \cdot a}{\psi - a \cdot x} \quad (10)$$

$$j_{K(VA)} = \frac{B_{VA}}{G_{VA}} = \frac{(1 - \phi) \cdot a}{(1 - \psi) + a \cdot x} \quad (11)$$

Tragt man die Quotienten der Ordinaten von Bild 2 und Bild 3 über a auf, so erhält man mit Bild 4 eine Darstellung der «Kraftschlussan-

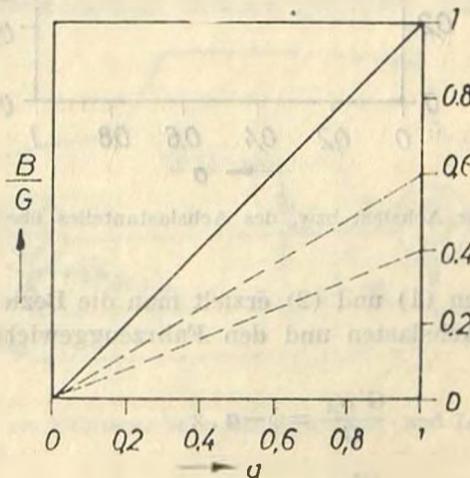


Bild. 3. — Verlauf der Bremskraft bzw. des Bremskraftanteils.

streuung f_k » (früher meist weniger zweckmaessig als «Reibung μ » bezeichnet).

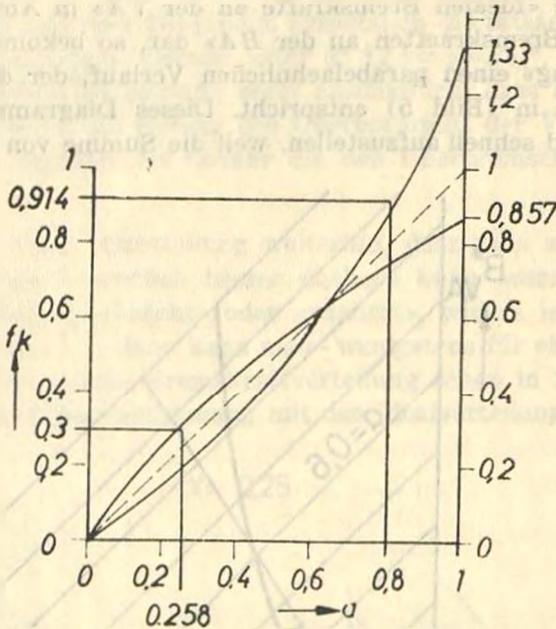


Bild. 4. — Verlauf der Kraftschlussanstreuung.

Man ersieht aus dieser Darstellung, dass bei $a=0,8$ (d.h. 80 % Abbremsung) eine Kraftschlussanstreuung an der HA von $f_k=0,914$ auftritt, oder umgekehrt, dass man bei einem gegebenen Haftwert zwischen Rad und Fahrbahn von $f=0,914$ nur eine Abbremsung von 80 % erzielen kann, wenn die HA nicht «blockieren» soll. Denn bei allen Abbremsungen oberhalb $a=60$ % ist die Gefahr des Zuerstblockierens der HA gegeben. Bei schlechtem Haftwert (z.B. schmutzig-nasse Pflasterstrasse) mit $f=0,3$ ist nur eine Abbremsung von $a=25,8$ % möglich, wenn Überbremsen der VA und damit Verlust der Lenkfähigkeit vermieden werden soll [3].

3. — «Idealverteilung» und tatsächliche Bremskraftverteilung

Würde die Bremskraft an jeder Achse jeweils der dynamischen Achslast proportional sein, (Bild 2 und 3), so würden für jede Abbremsung und an jeder Achse die Werte von f_k und a immer gleich sein und damit der in (Bild 4) gestrichelten eingezeichneten Linie unter 45° entsprechen.

Eine derartige Verteilung der Bremskräfte wird mit Recht als «Idealverteilung» bezeichnet.

Stellt man die «Idealen Bremskräfte an der VA» in Abhängigkeit von den «Idealen Bremskräften an der HA» dar, so bekommt man für die «Idealverteilung» einen parabelähnlichen Verlauf, der der stark ausgezogenen Linie in (Bild 5) entspricht. Dieses Diagramm ist deswegen sehr leicht und schnell aufzustellen, weil die Summe von Ordinaten - und

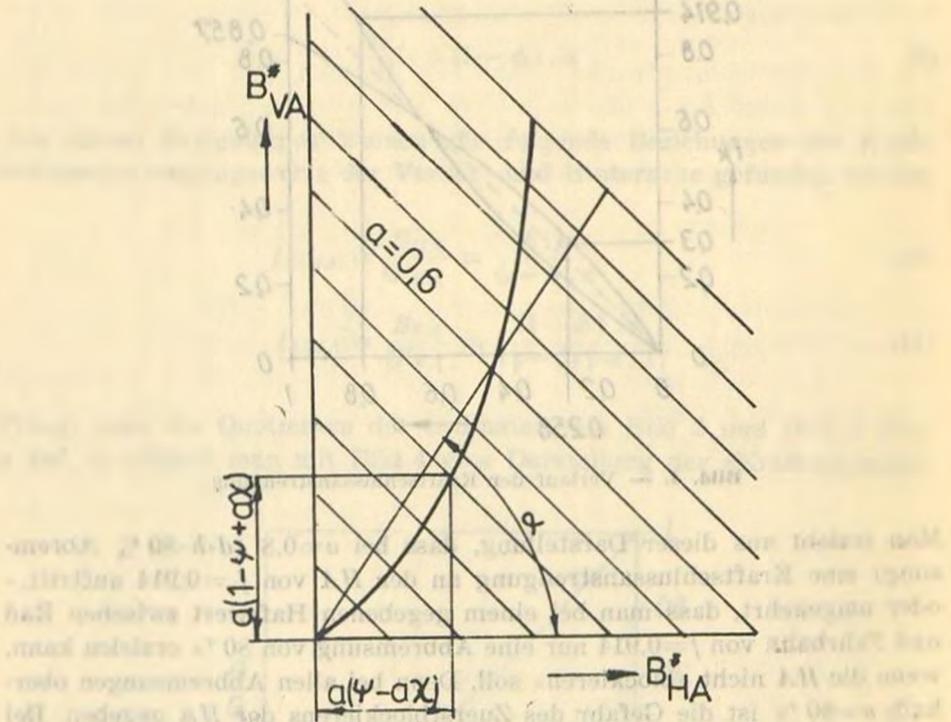


Bild. 5. — Tatsächliche Bremskraftverteilung.

Abszissenwert immer gleich a sein muss. Trägt man sich in dem Diagramm von vornherein unter 45° Parameter für die Abbremsung a ein, so braucht man nur die Abszissenwerte B_{HA}^* zu berechnen; der Schnittpunkt der Senkrechten über dem Abszissenwert mit dem zugehörigen a -Parameter gibt gleich den richtigen Ordinatenwert.

$$B_{HA}^* = \frac{B_{HA}}{G} = a(\psi - a \cdot x)$$

$$B_{VA}^* = \frac{B_{VA}}{G} = a(1 - \psi + a \cdot x) \quad (12)$$

Traegt man nun in dieses Diagramm zusaetzlich die tatsaechliche Bremskraftverteilung ein (z.B. Gerade unter α ; $\text{tg } \alpha = \varphi = B_{VA}^*/B_{HA}^*$), so sieht man auch in dieser Darstellung recht anschaulich, dass bis zu Abbremsungen von $a=60\%$ die Gefahr des Überbremsens der VA, bei höheren Abbremsungen dagegen die Gefahr die des Überbremsens der HA gegeben ist.

Man sieht aus dieser Darstellung weiterhin, dass man sich der «Idealverteilung» schon wesentlich besser naechern kann, wenn man z.B. die Bremskraftverteilung «knickt» oder «variiert», wie es in (Bild 6) und (Bild 7) geschehen ist; dann kann man - wenigstens für einen Beladungszustand die tatsaechliche Bremskraftverteilung schon in 2 oder 3 Punkten in 100% ige Übereinstimmung mit der Idealverteilung bringen.

$$\psi = 0,55$$

$$\chi = 0,25$$

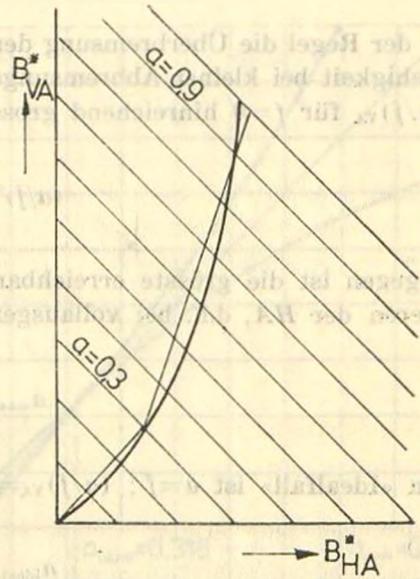
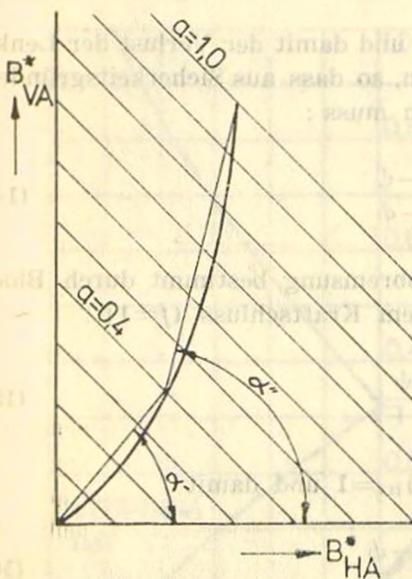


Bild. 6. — Annäherung an die Idealverteilung. Bild. 7. — Annäherung an die Idealverteilung.

4. — Bremskraftverteilung und lastabhaengige Bremskraftregelung bei Kraftfahrzeugen

Um die Frage beantworten zu können, ob bzw. bei welchen Fahrzeugdaten der Einsatz der «automatisch - lastabhaengigen Bremskraftregelung» (ALS) erforderlich ist, scheint es sinnvoll, einige allgemein - gültige Regeln für die Bremskraftverteilung an Fahrzeugen aufzustellen. Die Bremskraftverteilung sollte so vorgenommen werden, dass

1. bei $f=1$ noch genügende Abbremsung a_{max} (z.B. mindestens 60 bis 65 %) erreichbar ist,
2. bei glatter Fahrbahn kein zu früher Verlust der Lenkfaehigkeit eintritt, d.h. der Wert a/f für $f=0$ in tragbaren Grenzen (mindestens 0,75 bis 0.80) liegt (siehe Bild 8).

Da für die «Kraftschlussanstrengungen» die Beziehungen (10 und 11) gelten, so ergeben sich für die «Haftwertausnutzungen»

$$(a/f)_{VA} = \frac{(1-\psi)}{(1-\phi)-f \cdot \alpha} \quad \text{und} \quad (a/f)_{HA} = \frac{\psi}{\phi+f \cdot \alpha} \quad (13)$$

In der Regel die Überbremsung der VA und damit der Verlust der Lenkfaehigkeit bei kleinen Abbremsungen ein, so dass aus Sicherheitsgründen $(a/f)_{VA}$ für $f=0$ hinreichend gross sein muss :

$$(a/f)' = \frac{1-\psi}{1-\phi} \quad (14)$$

degegen ist die grösste erreichbare Abbremsung bestimmt durch Bloc-kieren der HA, d.h. bei vollausgenutztem Kraftschluss ($f=1$) :

$$a_{max} = \frac{\psi}{\phi + \alpha} \quad (15)$$

Im «Idealfall» ist $a=f$; $(a/f)_{VA} = (a/f)_{HA} = 1$ und damit

$$a_{ideal} = \frac{\psi - \phi}{\alpha} \quad (16)$$

Je nach Lage des Fahrzeugschwerpunktes kann man erfahrungsgemaess die Bremskraftverteilung so vornehmen, dass

entweder $a_{\max} = (a/f)'$ ist, d. h. (14) = (15), und damit wird

$$(1 - \phi) = (1 - \psi) (1 + \chi) \quad (17)$$

oder $a_{\max} = i(a/f)'$ ist, wobei $i < 1$ ist, also z. B. bei

$(a/f)' = 0,8$ und $i = 0,85$ die maximale Abbremsung $a_{\max} = 0,68$

$$(1 - \phi) = \frac{i(1 - \psi) (1 + \chi)}{i(1 - \psi) + \psi} \quad (18)$$

Schreibt man die Formeln um, so wird der Bremskraftanteil an der HA

entweder
$$\phi = \psi - \chi(1 - \psi) = \frac{\psi - \chi(1 - \psi)}{\psi + (1 - \psi)} \quad (19)$$

oder
$$\phi = \frac{\psi - i \cdot \chi(1 - \psi)}{\psi + i(1 - \psi)} \quad (20)$$

Da nun beim unbeladenen Fahrzeug die Werte ψ_0 und χ_0 in der Regel kleiner sind als die entsprechenden Werte ψ und χ beim beladenen Fahrzeug, so kann es durchaus sein, dass man für beide Grenzbeladungszu-

$= 0,62 \quad \chi = 0,22 \quad \phi = 0,55$

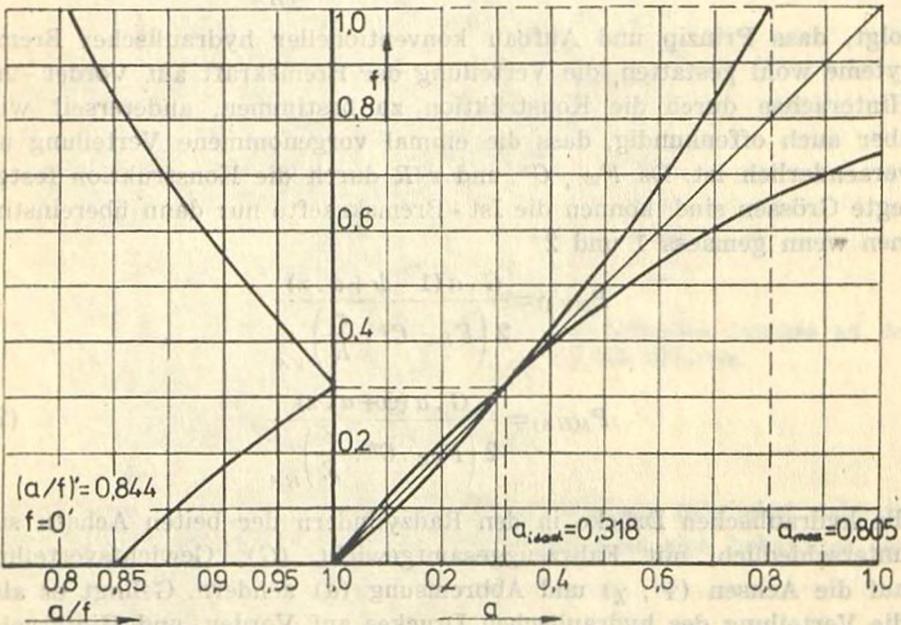


Bild. 8. — Haftwertausnutzung.

staende den gleichen zulaessigen Hinterachs - Bremskraftanteil ϕ findet. In diesem Fall ist die Anwendung der *ALB* dann nicht erforderlich.

Wenn z.B. ein Fahrzeug so ausgelegt ist, dass in folge der Beladung keine Veraenderung der Schwerpunkthöhenlage (χ) gegenüber dem unbeladenen Fahrzeug eintritt, so dürfte auch die Schwerpunktverschiebung zwischen den Achsen (ψ) nur gering sein, wenn *ALB* vermieden werden soll.

In der Mehrheit aller Faelle wird man sagen können :

«*ALB* ist nicht erforderlich für Fahrzeuge, bei denen die Differenz zwischen Hinterachs - Lastanteil beim zulaessigen Gesamtgewicht und Hinterachsanteil beim Leergewicht kleiner als 0,12 ist.»

5. — Hydraulischen Drücke

Aus

$$B_{VA} \text{ ist} = P_{h(VA)} \cdot \left(F_{RZ} \cdot C^* \cdot \frac{r}{R} \right)_{VA} \cdot 2$$

$$B_{HA} \text{ ist} = P_{h(HA)} \cdot \left(F_{RZ} \cdot C^* \cdot \frac{r}{R} \right)_{HA} \cdot 2 \quad (21)$$

folgt, dass Prinzip und Aufbau konventioneller hydraulischer Bremsysteme wohl gestatten, die Verteilung der Bremskraft auf Vorder- und Hinterachse durch die Konstruktion zu bestimmen, andererseits wird aber auch offenkundig, dass die einmal vorgenommene Verteilung unveraenderunglich ist. Da F_{RZ} , C^* und r/R durch die Konstruktion festgelegte Grössen sind, können die Ist - Bremskraefte nur dann übereinstimmen wenn gemaess 1 und 2

$$P_{h(VA)} = \frac{G \cdot a (1 - \psi + a \cdot \chi)}{2 \left(F_{RZ} \cdot C^* \cdot \frac{r}{R} \right)_{VA}}$$

$$P_{h(HA)} = \frac{G \cdot a (\psi + a \cdot \chi)}{2 \left(F_{RZ} \cdot C^* \cdot \frac{r}{R} \right)_{HA}} \quad (22)$$

die hydraulischen Drücke in den Radzylindern der beiten Achsen sich unterschiedlich, mit Fahrzeuggesamtgewicht (G), Gewichtsverteilung auf die Achsen (ψ ; χ) und Abbremsung (a) aendern. Gelingt es also, die Verteilung des hydraulischen Druckes auf Vorder- und Hinterachse den sich aendernden Lasten verhaeltnisgleich anzupassen, wird ideale

Druckverteilung als wichtige Voraussetzung für ideale Bremskraftverteilung erreicht. Dabei ist ein weiter anzustrebendes Ziel: Betaetigungskraft und -weg zur Erzielung einer bestimmten Abbremsung sollten möglichst unabhängig von Fahrzeuglast und Lastverteilung immer annähernd gleich gross sein.

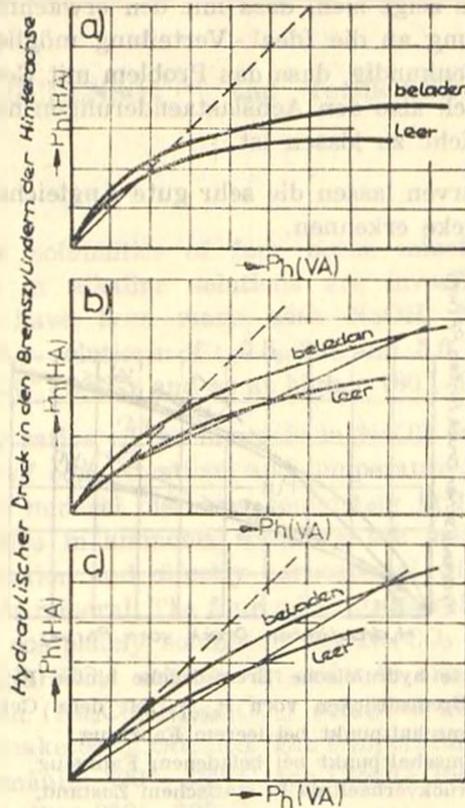


Bild. 9. — Ideale und wirkliche Begrenzung des hydraulischen Druckes an den Bremszylindern der Hinterachse $P_{h(HA)}$ mit den Geräeten.

- Druckbegrenzer,
- Druckminderer mit Umschaltpunkt,
- Druckminderer ohne Umschaltpunkt.

Die bisherigen Bemühungen, idealer Durchverteilung möglichst nahe zu kommen, führten zu Entwicklung verschiedener an sich bekannter Geräete :

- Durckbegrenzer,
- Durckminderer mit Umschaltpunkt,
- Durckminderer ohne Umschaltpunkt.

In Bild 9 sind sowohl die Durckkurven, die bei Anwendung der unter *a* bis *c* aufgeführten Geraete erreicht werden, wie auch die idealen Durckverteilungskurven unterschiedlicher Fahrzeuge gekennzeichnet. Zur Information sei noch erwaeht, dass die Durckkurve des konventionellen hydraulischen Bremssystems sich durch eine Gerade, die unter 45° verlaeuft, darstellt. Es zeigt sich, dass mit den erwaehten Geraeten eine bestimmte Anpassung an die Ideal-Verteilung moeglich ist, andererseits wird aber auch offenkundig, dass das Problem mit Geraeten, deren Einstellung fest ist, sich also den Achslastaenderungen nicht kontinuierlich anpasst, einfach nicht zu loesen ist.

Druckverteilungskurven lassen die sehr gute Angleichung der effektiven an die idealen Druicke erkennen.

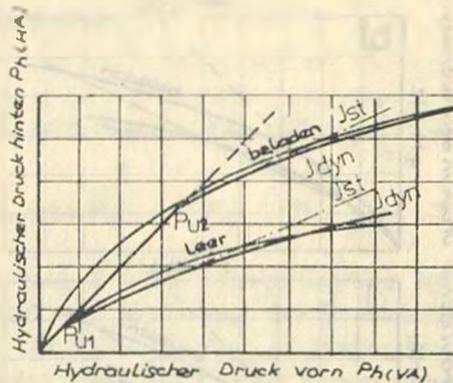


Bild. 10. — Verminderte hydraulische Bremsdrücke hinter $P_{H(HA)}$ in Abhaengigkeit von den Bremsdrücken vorn $P_{H(VA)}$ mit dem Geraet:

P_{U1} = Umschaltzeitpunkt bei leerem Fahrzeug,

P_{U2} = Umschaltzeitpunkt bei beladenem Fahrzeug,

J_{st} = Druckverhaeltnis in statischem Zustand,

J_{dyn} = Druckverhaeltnis in dynamischem Zustand bedingt durch Achslastveraenderung.

S C H R I F T T U M

1. Demirsoy : Untersuchungen bei den Kraftfahrzeugen für verschiedenen Fahrbahnen über Grenzen der Kraftschlussanstrengungswerte, die zwischen Rad und Fahrbahn entstehen. Ege Univ. Müh. Bil. Fak. Diss., İzmir, 1975.
2. Oberthür, Baum : Bremskraftverteilung für hydraulisch betätigte Fahrzeugbremsen. ATZ 1964, Heft 8.
3. Strien : Der Bremsvorgang. Verkehrswissenschaftliches Seminar, 1962.