

# Untersuchungen an Trommelbremsen unter starker Schmutzeinwirkung

Von Bert Breuer, Köln\*)

DK 629.114.2-592.131.001.5:631.372

Trommelbremsen sollen auch bei großer Verschmutzung im Inneren an allen Rädern gleichmäßig wirken und eine ausreichende Verzögerung des Fahrzeugs sicherstellen. In systematischen Fahr- und Prüfstandversuchen zeigte sich, daß normalerweise die Reibpartner < Grauguß – harter Preß-Bremsbelag > ausreichend unempfindlich gegen Schmutz sind, daß man aber für schwierige Einsatzfälle besser die kostspieligeren Werkstoffpaare < Stahlguß – weicher Walzbelag > oder < Stahlguß – harter Preßbelag > wählt.

## 1. Einleitung

Nicht abgedichtete, in den Felgen der Triebräder angeordnete Servo-Trommelbremsen baut man in viele landwirtschaftliche Traktoren der unteren Leistungsklasse ein, da sie einfach und kostengünstig sind und wegen ihrer großen Selbstverstärkung nur kleine Pedalkräfte benötigen. Weil diese Verstärkung sehr von dem Reibbeiwert abhängt, muß man die Reibpartner besonders sorgfältig auswählen.

In die Bremsen eindringender Schmutz darf die für eine gegebene Fahrzeugverzögerung nötige Pedalkraft nicht in unzulässiger Weise verändern und nicht dazu führen, daß die Bremsen rechts und links unterschiedlich wirken, so daß die Lenkung beeinflusst wird oder gar ein Rad vorzeitig blockiert. Aus dem Fachschrifttum kann man bisher fast nichts über den Einfluß der Verschmutzung auf das Verhalten von Trommelbremsen erfahren. Deshalb wurde dieser Einfluß mit dem Ziel untersucht, geeignete Werkstoffpaare für eine kostengünstige, gegen Schmutz unempfindliche Servo-Trommelbremse zu finden.

Erweiterte Fassung eines Vortrages, gehalten auf der Jahrestagung der VDI-Fachgruppe < Landtechnik > in Braunschweig am 22. Okt. 1971 und im Seminar des Instituts für Kraftfahrwesen der TH Aachen am 13. Dez. 1971.

\*) Dr.-Ing. Bert Breuer ist Leiter der Hauptabteilung Versuch Traktoren und Baumaschinen im Entwicklungswerk Porz der Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Köln.

## 2. Beschreibung der Versuche

### 2.1. Bremsenprüfstand

Beim Untersuchen von Bremsen muß man – u.a. wegen der großen natürlichen Streuung der Reibbeiwerte von Werkstoffpaaren mit einem organischen Partner – besonders auf die Konstanz der Versuchsbedingungen achten. Deshalb wurden zunächst Messungen an Einzelbremsen auf einem Schwungmassen-Bremsenprüfstand ausgeführt und sodann die Meßergebnisse durch Prüfungen mit Fahrzeugen auf der Straße ergänzt.

Bild 1 zeigt schematisch den Bremsenprüfstand. Die Schwungmasse a entspricht der halben rotatorisch und translatorisch zu verzögernden Fahrzeugmasse; sie läuft bei eingekuppeltem Lastwendegetriebe b etwa mit der Drehzahl des Verbrennungsmotors c um und hat deshalb nur kleine Abmessungen. Das Lastwendegetriebe zwischen Motor und Schwungmasse bietet den Vorteil, daß man bei beiden Drehrichtungen messen kann. An den Naben der Radladerachse d lassen sich Prüfbremsen e anbringen, von denen nur jeweils eine bei gesperrtem Differential hydraulisch betätigt wird. Auf Bild 2 ist eine prüfbereit montierte Bremse zu sehen. Der Prüfstand kann vollautomatisch im Dauerbetrieb mit vorgewählter Häufigkeit der Bremsvorgänge arbeiten.

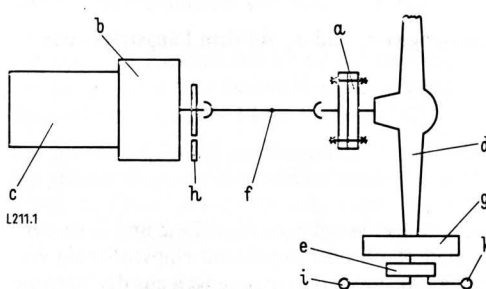
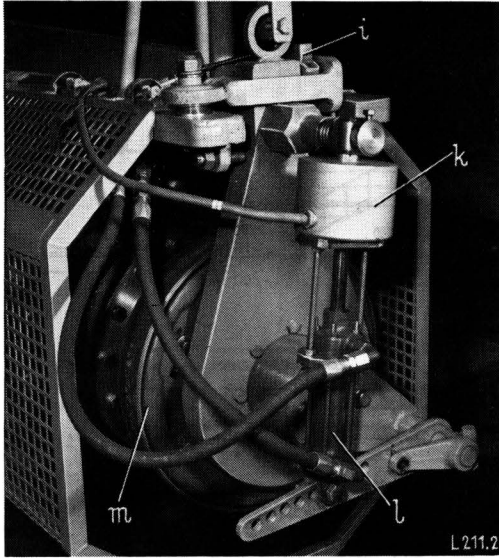


Bild 1. Bremsenprüfstand.

- a Schwungmasse, Trägheitsmoment veränderlich  
 $\Theta = 0,05 \text{ kpms}^2$  bis  $\Theta = 0,34 \text{ kpms}^2$   
( $\Theta \approx 0,5 \text{ Nms}^2$  bis  $\Theta \approx 3,4 \text{ Nms}^2$ )
- b Lastwendegetriebe, Bauart DR 750
- c Dieselmotor, Bauart F4L 514 F  
Leistung  $N = 76 \text{ PS}$  (56 kW) bei einer Motor-Drehzahl von  $n_M = 2100 \text{ U/min}$
- d Achse eines Radladers  
Untersetzung  $i_{ges} = 19,03 : 1$
- e Prüfbremse
- f Gelenkwelle
- g Not-Aus-Bremse
- h Meßstelle für die induktive Messung der Schwungmassen-Drehzahl  $n_S$
- i Meßstelle für das Bremsmoment  $M_B$
- k Meßstelle für das am Bremshebel eingeleitete Betätigungsmoment  $M_e$

**Bild 2. Prüfbremse.**

- i Meßstelle für das Bremsmoment  $M_B$
- k Meßstelle für das am Bremshebel eingeleitete Betätigungsmoment  $M_e$
- l Hydraulikzylinder
- m Gehäuse der Prüfbremse (e in Bild 1)



Ein Bremsversuch läuft auf dem Prüfstand wie folgt ab:

- Beschleunigen der Welle auf eine Drehzahl, die der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs entspricht,
- Abkuppeln des Motors,
- Betätigen der Bremse und
- Verzögern bis zum Stillstand bei gleichzeitiger Messung des zeitlichen Verlaufes von Schwungmassendrehzahl  $n_s$ , Betätigungsmoment  $M_e$ , Bremsmoment  $M_B$  und ggf. Temperatur  $\vartheta$  der Bremse.

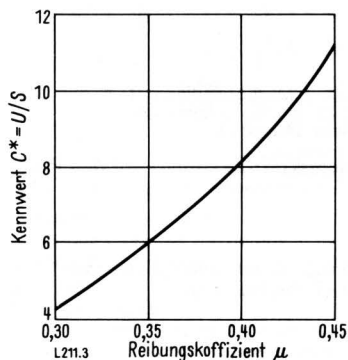
**2.2. Versuchsmaterial**

Alle Versuche wurden mit einer mechanisch betätigten Duo-Servobremse ausgeführt, die einen Trommeldurchmesser von 350 mm und eine Belagbreite von 60 mm hat. Der aus den geometrischen Daten der Bremse nach *Koefler*<sup>1)</sup> berechnete Verlauf des Kennwertes  $C^*$  (Quotient aus Umfangskraft  $U$  und Spannkraft  $S$ ) über dem Reibbeiwert  $\mu$  ist in **Bild 3** dargestellt.

Aus den vielen untersuchten Bremsbelägen sind in **Tafel 1** fünf Sorten zusammengestellt, die etwa den Reibbeiwert- und Härtebereich aller geprüften Beläge umfassen. Die Reibbeiwerte gelten für den sog. Teilbelagprüfstand (ebene Reibfläche). Unter den angegebenen Bedingungen erreichen die Beläge dort bei etwa 200 °C den größten Reibbeiwert.

Als Bremsstrommel-Werkstoff verwendet man hauptsächlich Grauguß mit perlitischem Gefüge; eine grobe, nestartige Form des Graphits darin ist wegen der Gefahr einer Bildung von Knitterrissen

<sup>1)</sup> *Buschmann, H., u. P. Koefler: Taschenbuch für den Kraftfahrzeugingenieur. 7. Aufl. Stuttgart: Dt. Verlagsanstalt 1963; insbes. S. 665 ff.*



**Bild 3.**  
Kennwertverlauf der Duo-Servobremse.  
 $U$  Umfangskraft  
 $S$  Spannkraft

**Bild 4.**  
Graphit im Bremsstrommel-Werkstoff GG 25.

I M 100 : 1, ungeätzt  
II M 500 : 1, geätzt mit 2%iger alkoholischer Salpetersäure-Lösung

**Tafel 1. Daten untersuchter Bremsbeläge.**

Belag	Reibbeiwert $\mu^*$	Kunststoffhärte $\text{kp/cm}^2$ <sup>•</sup>	Bindung H Harz H-K Harz- Kautschuk	Anteil		
				Asbest	Mineralien (MgO, BaSO <sub>4</sub> )	Eisen
A	0,38	500	H-K	nicht bekannt	nicht bekannt	hoch
B	0,45	900	H-K	niedrig	hoch	hoch
C	0,42	850	H-K	niedrig	hoch	niedrig
D	0,36	2000	H	hoch	mittel	niedrig
E	0,39	1400	H	hoch	hoch	mittel

<sup>\*</sup>) bestimmt unter folgenden Bedingungen auf dem Teilbelagprüfstand:  
Flächenpressung  $p = 15 \text{ kp/cm}^2$  ( $\approx 15 \text{ daN/cm}^2$ )  
Gleitgeschwindigkeit  $v = 5,1 \text{ m/s}$   
Temperatur  $\vartheta = 200 \text{ }^\circ\text{C}$   
<sup>•</sup>)  $1 \text{ kp/cm}^2 \approx 1 \text{ daN/cm}^2$

**Tafel 2. Härte der Bremsstrommel-Werkstoffe.**

Lfd. Nr.	Zeichen	$H_B$ 30/5 $\text{kp/mm}^2$ <sup>*</sup>	Bemerkungen
1	GG 25	177 bis 220	leg. Cr, Cu, Mo
2	Sonder-GG	211 bis 234	
3	GTS 55	219 bis 221	
4	GTS 70	244 bis 246	
5	GGG 60	n.g.	
6	GS 70	184 bis 202	

<sup>\*</sup>) Istwerte der Bremsoberfläche;  $1 \text{ kp/mm}^2 \approx 1 \text{ daN/mm}^2$

und von Riefen zu vermeiden. Für die Versuche wurden insgesamt sechs verschiedene Werkstoffe mit Perlitgefüge, und zwar fünf graphithaltige Werkstoffe unterschiedlicher Brinellhärten und unterschiedlicher Graphitbildung sowie ein nicht graphithaltiger Werkstoff (Stahlguß GS 70) verwendet, **Tafel 2**.



Die Graphitausbildung läßt sich in Schliffbildern bestimmen. Am Beispiel des GG 25 sind die Graphitlamellen als schwarze Fäden in Bild 4 zu erkennen. In dem mit „Sonder-GG“ bezeichneten, mit Chrom, Kupfer und Molybdän legierten Grauß großer Härte war der Graphit besonders fein lamellar ausgebildet. Alle Bremsstromeln waren an den Bremsflächen nach der gleichen Zeichnungsvorschrift bearbeitet. Je Werkstoffvariante untersuchte man mindestens vier Exemplare mit jeweils neuen Belägen auf ihr Bremsverhalten.

### 2.3. Prüfprogramm

Bei den hier beschriebenen Untersuchungen kam es darauf an, die Bremsen in einem zeitraffenden und reproduzierbaren Verfahren sowohl im sauberen als auch im verschmutzten Zustand zu prüfen. Hierfür hat sich das in Tafel 3 beschriebene Prüfprogramm bewährt.

Tafel 3. Prüfprogramm für verschmutzte Bremsen.

Lfd. Nr.	Anzahl der Stoppbremsungen	Vorgang	Kontrolle bzw. Messung
1	0	Einfahren	Lüftspiel
2	60		Tragbild
3	120		Lüftspiel $M_B = f(M_e)^*$
4	130	1. Verschmutzung	Lüftspiel
5	160	2. Verschmutzung	
6	175	3. Verschmutzung	
7	200		$M_B = f(M_e)^*$

\*) Bei Bremsversuchen am Fahrzeug auf der Straße entsprechend  $b = f(P)$

Da ein unvollkommenes Tragbild der Bremsbeläge den Kennwert  $C^*$  beeinflusst, dürfen Messungen erst nach dem „Einfahren“ der Bremse bei vollem Tragbild ausgeführt werden. Das Bremskraftkennbild ( $b = f(P)$  auf der Straße bzw.  $M_B = f(M_e)$  auf dem Prüfstand, mit  $b$  als der Verzögerung,  $P$  als der Pedalkraft,  $M_B$  als dem Bremsmoment und  $M_e$  als dem eingeleiteten Betätigungsmoment) der sauberen Bremse wird nach 120 „Stoppbremsungen“ aufgenommen (lfd. Nr. 3 in Tafel 3). Dann füllt man nach der angegebenen Anzahl von Bremsungen dreimal  $150 \text{ cm}^3$  einer Schmutz-Wasser-Mischung<sup>2)</sup> im Verhältnis 2 : 1 durch eine Öffnung in der Ankerplatte unter ständigem Drehen der Trommel in die Bremse. Nach der dritten Verschmutzung erreicht man erfahrungsgemäß einen stabilen Zustand, d.h. die Bremswirkung ändert sich bei weiterer Verschmutzung nicht mehr. Jetzt kann man das Bremskraftkennbild der verschmutzten Bremse ermitteln. Die Bremse ist dabei meist trocken, weil das eingefüllte Wasser bei den vorangegangenen Bremsungen verdampfte. Der zeitliche Ablauf der auf dem Prüfstand und bei Fahrversuchen registrierten Meßgrößen ist für eine Stoppbremsung als Beispiel in Bild 5 wiedergegeben.

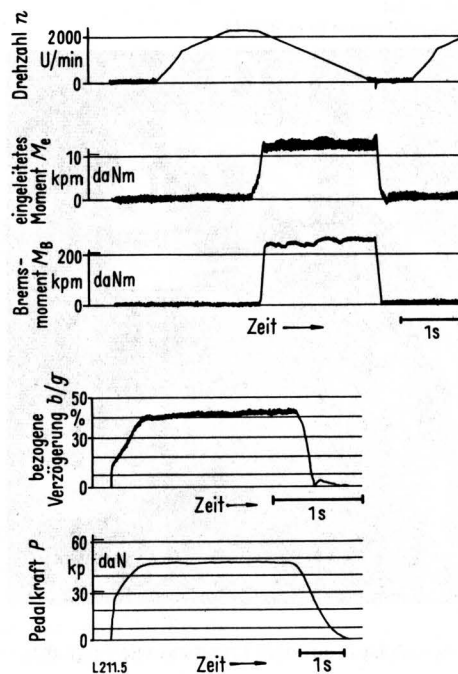
Am Prüfstand wurde ein induktiver Drehzahlgeber bzw. Kraftmeßdosen in Verbindung mit einem Oszillographen, auf der Straße ein Bremskraft-Verzögerungsschreiber Typ Motometer (Masse-Feder-Prinzip) benutzt. Der beim Beschleunigen der Schwungmasse im Drehzahlsignal zu erkennende Knick kennzeichnet das endgültige Fassen der Kupplung des Lastwendegetriebes; er ist von Kupplungsprüfständen her bekannt und wird dadurch hervorgerufen, daß während der Rutschzeit der vollbelastete Motor wegen Drehzahlabnahme ein größeres dynamisches Drehmoment abgibt als nach der Rutschzeit bei Drehzahlzunahme.

Durch entsprechende Pausen zwischen aufeinanderfolgenden Stoppbremsungen wurde die Temperatur  $\vartheta$  der Bremsstrommel auf etwa max.  $100^\circ\text{C}$  bei Bremsbeginn begrenzt. Viele der nachfolgend genannten Ergebnisse von Fahrversuchen beziehen sich ebenso wie die Prüfstandergebnisse auf Einzelbremsen, weil aus Gründen der Versuchsgenauigkeit (u.a. um den Einfluß einer unterschiedlichen

2) Für alle hier beschriebenen Messungen benutzte man Ackerboden der Kölner Bucht aus der gleichen „Charge“. Vergleiche mit Schmutz aus anderen Gegenden Deutschlands zeigten keine grundsätzlich anderen Resultate.

Bild 5. Zeitlicher Verlauf der Meßgrößen.

$n$ ,  $M_e$  und  $M_B$  gemessen auf dem Prüfstand  
 $b$  und  $P$  gemessen auf der Straße



Einstellung beider Bremsen auszuschalten) das Fahrzeug bei eingeschalteter Differential Sperre mit nur einer Bremse verzögert wurde.

In die Auswertung ging jeweils das Mittel aus den Meßwerten während der Zeitspanne etwa gleichbleibender Signalhöhe ein (vgl. Bild 5). Die während der Stoppbremsung bei gleichbleibender Betätigungskraft zu bemerkenden Änderungen der Verzögerung (im Beispiel des Bild 5: Anstieg) sind wohl hauptsächlich auf die Temperatur- und Geschwindigkeits-Abhängigkeit des Reibwertes zurückzuführen.

### 3. Ergebnisse

Aus Bild 6 geht hervor, daß nach der ersten Verschmutzung die Bremse mit den Reibpartnern GG 25 - Belag A beträchtlich schlechter wirkt als vorher. Nach der dritten Verschmutzung ändert

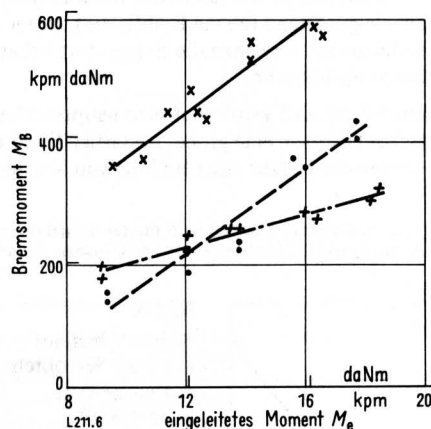


Bild 6. Prüfstand-Ergebnisse (Bremskraft-Kennbild) mit den Reibpartnern GG 25 - Belag A.

Gleitgeschwindigkeit  $v = 1,9 \text{ m/s}$

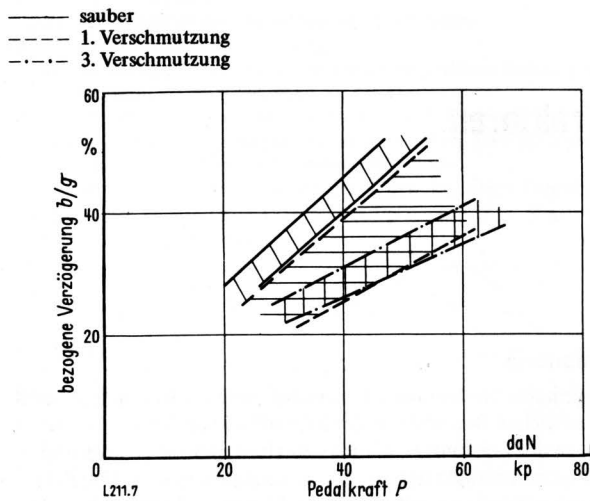
Temperatur  $\vartheta < 100^\circ\text{C}$

Trägheitsmoment  $\Theta \triangleq 0,5 G_{\text{ges}}$ , mit  $G_{\text{ges}}$  als dem zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeugs

— sauber  
- - - 1. Verschmutzung  
- · - · 3. Verschmutzung



**Bild 7.** Bremskraft-Kennbild, Streubereiche der Ergebnisse von Bremsversuchen mit sieben Einzelbremsen auf der Straße bei Verwendung der Reibpartner GG 25 – Belag C.

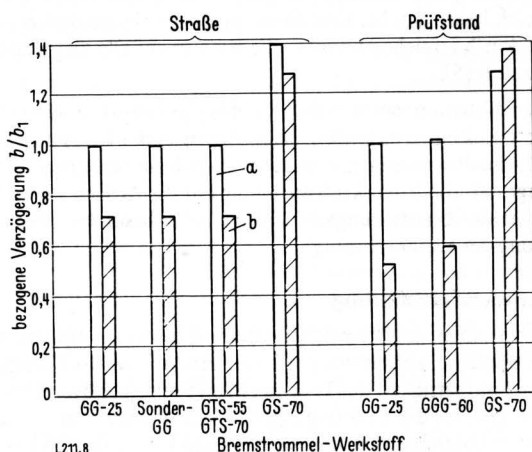


sich bei einigen hier untersuchten Reibpartnern die Neigung der Funktion  $M_B = f(M_e)$ , wie auch am Streubereich für die Reibpartner GG 25 - Bremsbelag C, Bild 7, zu erkennen ist. Das Bild zeigt die entsprechende Funktion  $b/g = f(P)$  für den Bremsversuch auf der Straße mit  $b/g$  als der auf die Erdbeschleunigung bezogenen Verzögerung des Fahrzeugs und  $P$  als der Pedalkraft.

Der Streubereich dieser Funktion ist nach der ersten Verschmutzung vermutlich wegen der noch unvollkommenen Schmutzverteilung in der Bremse beträchtlich breiter als im „stabilen“ Verschmutzungszustand nach der dritten Verschmutzung.

Die Härte und die Art der Graphitbildung waren bei den graphithaltigen Gußeisenwerkstoffen wider Erwarten sowohl im sauberen wie auch im verschmutzten Zustand der Bremse ohne Einfluß auf das Bremsverhalten, Bild 8. Bemerkenswert ist das Verhalten von Stahlguß: Die Bremswirkung ist im sauberen Zustand um etwa 35 % besser als die der graphithaltigen Werkstoffe und ändert sich im verschmutzten Zustand nur geringfügig.

Die Versuche auf der Straße zeigten – Stahlguß ausgenommen – größere Differenzen zwischen den Wirkungen sauberer und verschmutzter Bremsen. Dies läßt sich auf eine unterschiedliche Verteilung des Schmutzes in den Bremsen bei beiden Versuchsgruppen zurückführen (Prüfstand: Bremse fest; Straße: Bremse bewegt).



**Bild 8.** Einfluß der Bremsstrommel-Werkstoffe.

Bremsbelag A (vgl. Tafel 1)  
 Gleitgeschwindigkeit  $v = 1,9$  m/s  
 mittlere Flächenpressung  $P_m = 30$  kp/cm<sup>2</sup> ( $\approx 30$  daN/cm<sup>2</sup>)  
 a sauber  
 b verschmutzt  
 $b/b_1$  Verzögerung bezogen auf die mit GG 25 (Ifd. Nr. 1 der Tafel 2) erzielte Verzögerung bei sauberer Bremse

**Bild 9.** Einfluß der Belagqualität auf die bei verschmutzter Bremse nötige Erhöhung des Betätigungsmoments.

Bremsstrommel-Werkstoff GG 25

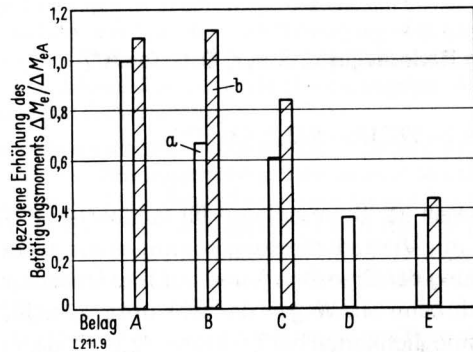
$M_B = 410$  kpm

a Straße

b Prüfstand

$\Delta M_e$  Erhöhung des Betätigungsmoments

$\Delta M_{eA}$  Erhöhung des Betätigungsmoments bei Belag A im Versuch auf der Straße



Die zum Erzeugen eines gegebenen Bremsmomentes  $M_B$  nötige bezogene Erhöhung  $\Delta M_e / \Delta M_{eA}$  des Betätigungsmoments nach Verschmutzung der Bremse mit  $\Delta M_{eA}$  als der Erhöhung für Belag A im Versuch auf der Straße ist in Bild 9 für verschiedene Belagqualitäten dargestellt.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Daten in Tafel 1 zeigt, daß sich eine große Belaghärte bei Verschmutzung sehr positiv auswirkt. Dieser Vorteil von Belägen der Arten D und E (Preßbeläge) ist mit den Nachteilen eines höheren Preises und eines u.U. beträchtlich längeren „Einfahrens“ bis zum vollen Tragen der Beläge verbunden, wenn man sie mit einem in diesen Punkten überlegenen Walzbelag der Art A vergleicht. Eine physikalisch exakte Deutung der gewonnenen Ergebnisse ist ohne weiterführende Grundlagenuntersuchungen nicht möglich. Entscheidende Einflußgrößen scheinen zu sein:

- die Belaghärte als Maß für die Möglichkeit, daß sich Schmutzpartikel in den Belag einbetten,
- Graphit als „Schmiermittel“ zwischen Belag und Metall (Unterschied zwischen Gußeisen und Stahlguß bei sauberer Bremse, Bild 8) und
- lamellenförmige Hohlräume in der Trommeloberfläche, in die sich Schmutzteilen einlagern, nachdem sich der Graphit herausgelöst hat.

In diesem Sinne könnte man Bild 8 wie folgt vereinfachend deuten:

Ist die Bremse sauber, so wirken als Reibpartner

- bei Gußeisen einerseits Metall + Graphit und andererseits der Belag,
- bei Stahlguß dagegen nur Metall und Belag.

Ist die Bremse aber verschmutzt, so sind die Reibpartner

- bei Gußeisen einerseits Schmutz, eingebettet in Metall und andererseits Schmutz, eingebettet in den Belag,
- bei Stahlguß dagegen sauberes Metall und in den Belag eingebetteter Schmutz.

Die beschriebenen Untersuchungen zeigten, daß – in der Reihenfolge der Wirksamkeit –

- Stahlguß mit hartem Preßbelag,
- Stahlguß mit weichem Walzbelag und
- Grauguß mit hartem Preßbelag

geeignete Reibpartner für schmutzgefährdete Trommelbremsen sind. Hierbei ist die Paarung Grauguß mit hartem Preßbelag die kostengünstigste und zugleich eine in den meisten Fällen technisch voll ausreichende Lösung. Der verhältnismäßig teure Stahlguß empfiehlt sich nur für besonders schwierige Einsätze. Dort hat er sich ebenso wie Stahl als Bremsstrommel-Werkstoff auch im Langzeitversuch vielfach bewährt.

L 211