

# Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis

Band 10

## **Pulvermetallurgie im Wettbewerb**

Vorträge

anlässlich des Symposiums am 24./25. November 1994 in Hagen

Veranstaltet vom

**Gemeinschaftsausschuß für Pulvermetallurgie**

des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh)  
des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI)  
der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM)  
des Fachverbandes Pulvermetallurgie (FPM)  
der Deutschen Keramischen Gesellschaft (DKG)

Druck Thiebes GmbH Hagen

# Pulvermetallurgisch hergestellte Reibwerkstoffe für Hochleistungsanwendungen

L. Schneider, B. Kieback

## 1. Zusammenfassung

Mit der ständigen Entwicklung im Fahrzeugbau, besonders hinsichtlich der Steigerung der Fahrgeschwindigkeiten und des Fahrkomforts erhöhten sich die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Reibwerkstoffe für Kupplungen und Bremsen. Während zur sicheren Funktion der Klotzbremse eines Pferdefuhrwerks Holz als Werkstoff noch ausreichend war, sind heute für die Bremsen moderner Hochgeschwindigkeitszüge Reibwerkstoffe auf Sintermetallbasis unerlässlich.

Im Verlauf der letzten 100 Jahre hat sich diese Entwicklung in hohem Tempo vollzogen, und es ist eine Vielzahl von Reibwerkstofftypen entstanden, von denen sich heute einige im Wettbewerb mit pulvermetallurgisch hergestelltem Brems- und Kupplungsmaterial befinden.

An ausgewählten Anwendungsbeispielen werden pulvermetallurgische Hochleistungsreibwerkstoffe im Wettbewerb zu herkömmlichem Reibmaterial beschrieben.

Besonders in Klotz- und Scheibenbremsen von Schienenfahrzeugen finden heute PM - Reibwerkstoffe Verwendung. Trotz des hohen Preises kann man bei vielen Anwendungsfällen nicht mehr auf derartiges Material verzichten. Vor allem in Bezug auf Temperatur- und Verschleißbeständigkeit sind sie anderen Werkstoffen überlegen.

Als weiteres Beispiel für die Vorteile der Pulvermetallurgie bei der Herstellung von Reibbelägen wird die Entwicklung der Reibwerkstoffe für Synchronringe in Schaltgetrieben von Kraftfahrzeugen dargestellt.

## 2. Einführung

Reibmaterialien gehören zu den Werkstoffen, an die sehr spezifische Anforderungen gestellt werden. Diese Anforderungen bestehen darin, daß Reibbelagwerkstoffe im Zusammenspiel mit dem Gegenmaterial und der stofflichen Umgebung (Nässe, Öl, Schmutz), unabhängig von den Belastungsparametern wie Gleitgeschwindigkeit, Anpreßdruck und Temperatur für quantitativ gleichbleibende Reibungsverhältnisse bei einer möglichst langen Lebensdauer sorgen sollen. Das führt dazu, daß die Gleitreibungszahl  $\mu$  meist als Werkstoffkennwert interpretiert wird, obwohl sie eigentlich einen dynamisch ablaufenden Vorgang beschreibt.

Die ersten Reibwerkstoffe sind natürlicher Art gewesen und erst mit der Steigerung der Anforderungen wurden Werkstoffe für Brems- und Kupplungsbeläge durch Chemiker und Werkstofftechniker gezielt, aber auf Empirie beruhend entwickelt. Die dabei entstandenen Materialien sind bis auf wenige Ausnahmen aus vielen Einzelkomponenten hergestellte Verbundwerkstoffe, deren detaillierte Zusammensetzung meist als Geheimnis streng gehütet wird. Da heute bei Brems- und Kupplungsmaterial ein sehr breites Werkstoffspektrum existiert und natürlich auch im Wettbewerb steht, soll im folgenden die zeitliche Entwicklung der Reibwerkstoffe dargestellt werden.

## 3. Die Entstehung des Werkstoffspektrums bei Reibmaterial

Die eigentliche Entwicklung der Reibwerkstoffe war zunächst mit der Entwicklung der Schienenfahrzeuge verknüpft (Bild 1). Der vom Pferdefuhrwerk her bekannte Holzbremesklotz war auch der Reibwerkstoff der ersten deutschen Eisenbahn, die am 07. Dezember 1835 von Nürnberg nach Fürth fuhr. Auch die erste sächsische Lokomotive namens Saxonia, die 1839 von Dresden nach Leipzig fuhr, wurde mit ölgetränkten Eichenholzklotzen gebremst. 1853 erschien eine Patentschrift über die Verwendung von Gußeisen als Bremsklotzwerkstoff. Dieser Werkstoff kam schnell zu

FhG	
1835	erste deutsche Eisenbahn Nürnberg - Fürth
1839	Dampflokomotive Saxonia, Dresden - Leipzig, Ebenholz, ölgetränkt
1853	Patentschrift über Gußeisen als Bremsklotzmaterial bei der Eisenbahn
1907	Bremsklötze auf Basis von imprägniertem Baumwollgewebe, in der Londoner U - Bahn, wenig später auch in der Pariser Metro
1924	erste Scheibenbremsen an Schienenfahrzeugen
1930	Bremsklötze auf Asbestbasis mit Binder aus organischen Hochpolymeren
1965	Sintermetallbeläge für Klotzbremsen
1989	Sintermetallbeläge für Scheibenbremsen (ICE, TGV)

FRAUNHOFER INSTITUT FÜR ANGEWANDTE MATERIALFORSCHUNG

Bild 1 Reibwerkstoffe in Schienenfahrzeugen

einer weiten Verbreitung (1). 1907 entstanden, vor allem bedingt durch die steigenden abzubremsenden Massen und die sich ständig erhöhenden Geschwindigkeiten, die ersten Bremsklötze auf der Basis von imprägniertem Baumwollgewebe, die zunächst in der Londoner U-Bahn, später auch in der Pariser Metro angewendet wurden (2). Resultierend aus der Entwicklung der Reibwerkstoffe auf Asbest-Polymer-Basis für Trommelbremsen im sich rasch entwickelnden Automobilbau wurden um 1930 auch in Schienenfahrzeugen die ersten gepreßten Verbundbremsklötze auf Asbestbasis mit Binder aus organischen Hochpolymeren hergestellt und eingesetzt (1). Bereits 1924 hielt die Scheibenbremse Einzug im Schienenfahrzeugbau (3), und ab etwa 1970 wurden hier Sintermetall - Reibwerkstoffe eingesetzt. 1985 wurde das Sortiment der Reibwerkstoffe auch bei Klotzbremsen um pulvermetallurgisch hergestellte Friktionswerkstoffe ergänzt.

Eine wesentlich größere Vielfalt an Materialien brachte die Entwicklung des Automobils und später auch des Flugzeuges mit sich (Bild 2). Als 1886 das erste Automobil der Welt seine Probefahrten absolvierte, wurde auch dieses mit einem Holzklotz

FhG	
1886	erstes Automobil, mit Klotzbremse, Holzklotz, auch mit Leder bezogen
ab 1890	mit dem Aufkommen luftbereifter Räder Übergang zur Trommelbremse mit Stahlbändern, auch mit Leder
1896	In England Herstellung der ersten gewebten Bremsbänder auf Asbestbasis
1902	erste Trommelbremse
1920	gepreßte Bremsbeläge auf Asbestbasis mit Binder aus organischen Hochpolymeren
1930 er	Sinterbeläge auf Lamellen für automatische Getriebe
1952	Einführung der Scheibenbremse
ca. 1955	Sintermetallreibbeläge für Flugzeugbremsen
1957	Papierlamelle für automatische Getriebe
1969	Kohlenstoff - Reibwerkstoffe

FRAUNHOFER INSTITUT FÜR ANGEWANDTE MATERIALFORSCHUNG

Bild 2 Reibwerkstoffe im Automobilbau

abgebremst. Schon wenige Jahre später fanden die ersten luftbereiften Räder ihren Einsatz, so daß diese Bremsart nicht mehr anwendbar war. Zunächst kam es zum Einsatz der Bandbremse, bei der Stahlbänder, die auch mit Leder überzogen waren, auf eine Bremstrommel wirkten (4). 1896 gab es in England die ersten gewebten Bremsbänder auf der Basis von Asbest (5). 1902 wurde die erste Trommelbremse vorgestellt und ab 1920 wurden gepreßte Trommelbremsbeläge auf Asbestbasis mit hochpolymeren Binder angewendet (6). Von der Verwendung der Bandbremsen war man wegen vieler Nachteile ziemlich schnell abgekommen (7).

Ab 1930 wurde im Automobilbau pulvermetallurgisches Reibmaterial eingesetzt, und zwar nicht in der Bremse, sondern als Belag auf den Kupplungslamellen im automatischen Getriebe. Ende der 50er Jahre löste ein Papierreibbelag den Sintermetallreibbelag im automatischen Getriebe weitgehend ab (8). 1952 wurde im PKW die Scheibenbremse im breiten Maße eingeführt (6).

Mitte der 50er Jahre begann der Einsatz pulvermetallurgisch hergestellter Hochleistungs - Reibbeläge in Flugzeugbremsen. In den letzten 20 Jahren kamen bei Flugzeugbremsen zunehmend Koh-

lenstoff-Kohlenstoff-Verbundwerkstoffe als Hochleistungswerkstoff zum Einsatz. Das erste zivile Flugzeug, dessen Bremsen mit Kohlenstoffverbund - Reibwerkstoffen ausgerüstet wurde, war die Concorde (9).

#### 4. Derzeit aktuelle Reibwerkstoffe

##### 4.1. Organische Verbundwerkstoffe (Kompositmaterial)

Von den im Laufe der technischen Entwicklung entstandenen Reibwerkstoffen sind noch heute die meisten Werkstoffgruppen von Bedeutung. Damit stehen sie zwangsläufig auch im Wettbewerb mit pulvermetallurgischen Hochleistungsreibwerkstoffen.

Die Gruppe der organisch gebundenen Verbundwerkstoffe ist die größte und bedeutendste aus dem Gesamtspektrum des Reibmaterials. Das trifft sowohl für das mengenmäßige Volumen, als auch die Vielfalt der Anwendungsgebiete und der Werkstoffvarianten zu. Natürlich haben sich die Vielfalt der Anwendungsgebiete und die aus den unterschiedlichen Anforderungen ergebenden Werkstoffvarianten im Laufe der Zeit immer mehr erweitert. Aber auch andere Gesichtspunkte waren für neue Werkstoffentwicklungen ausschlaggebend. Die wohl wichtigste Änderung in der Zusammensetzung der organischen Verbund-Reibmaterialien war die in den 70er und 80er Jahren vollzogene Asbestsubstitution.

Ein Beispiel für die Zusammensetzung eines Komposit-Reibwerkstoffes für PKW - Scheibenbremsbeläge zeigt Bild 3 (10). Die relativ hohe Anzahl der Einzelkomponenten ist für organisch gebundene Verbundwerkstoffe typisch. Bei den Bindemitteln dominieren Phenolharz oder Synthesekautschuk. Dadurch kann man die tribologischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften der Verbundreibmaterialien in einem sehr breiten Bereich variieren. Auf Grund der organischen Bindung gelten diese Werkstoffe als wenig temperaturbeständig. Durch Pyrolyse der hochpolymeren Bindemittel zu Kohlenstoff an der Reibfläche infolge dort kurzzeitig herrschender hoher Betriebstemperaturen entsteht eine Reibschicht, die durchaus gute Hochtemperatureigenschaften aufweist.

Rohstoffe	Gew.%	Vol.%	
Stahirolle	20,0	6,2	14 Vol.% Metalle
Kupferpulver	10,0	5,8	
Aluminiumoxid	1,2	1,0	23 Vol.% Füllstoffe
Glümmehel	6,5	8,0	
Schwerspat	9,5	7,0	
Eisenoxid	10,0	7,0	
Antimontrisulfid	6,0	4,3	35 Vol.% Gleitmittel
Graphit	4,0	5,7	
Kokspulver	16,0	25,0	
Aramidfaser	1,4	3,1	28 Vol.% org. Anteil
Harzfüllstoffpulver	4,0	11,5	
Bindeharz	5,4	13,4	

FRAUNHOFER INSTITUT FÜR ANGEWANDTE MATERIALFORSCHUNG

Bild 3 Rezeptur für einen Komposit - Scheibenbremsbelag

Im Bild 4 sind an der Schnittfläche eines beanspruchten kautschukgebundenen Reibwerkstoffs Strukturänderungen mit einem Gradienten ins Materialinnere deutlich sichtbar.

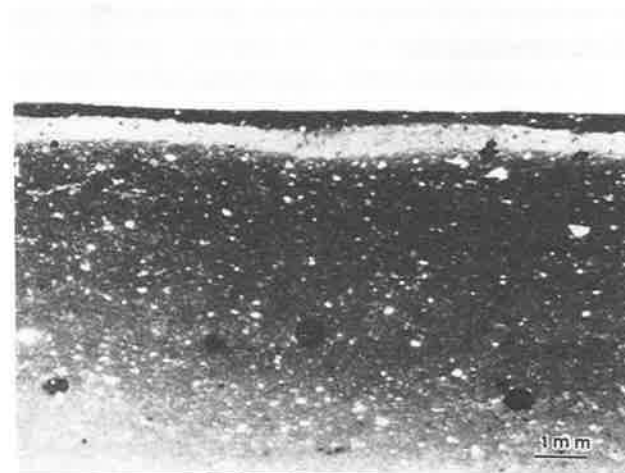


Bild 4 Thermisch beanspruchtes Komposit - Reibmaterial

Noch günstiger als Synthesekautschuk hinsichtlich Härte und Festigkeit sowie Restkohlenstoffanteil verhalten sich die Phenolharze (11). Erst bei länger andauernder thermischer Beanspruchung, bei der wesentlich mehr Wärme ins Werkstoffinnere eindringt, kommt es zu einer merklichen thermischen Schädigung des Reibbelages. Deshalb haben sich phenolharzgebundene Reibwerkstoffe heute soweit durchgesetzt, daß sie beispielsweise auch in Scheibenbremsen am PKW trotz der gegenüber Trommelbremsen deutlich höheren Beanspruchungen dominieren.

Die Vorteile der organisch gebundenen Reibwerkstoffe innerhalb des gesamten Reibwerkstoffspektrums sind ihr weiches, gleichmäßiges Reibverhalten, das niedrige spezifische Gewicht und niedrige Herstellungskosten.

Einen Sonderfall stellen innerhalb der organisch gebundenen Reibwerkstoffe die sogenannten Semimetallics dar. Diese Werkstoffe bestehen hauptsächlich aus Metallpulvern oder fein zerkleinerten Metallfasern, Festschmierstoffen und auch keramischen Substanzen. Sie sind damit in ihrer Zusammensetzung den pulvermetallurgisch hergestellten Reibwerkstoffen sehr ähnlich. Sie werden jedoch nicht gesintert, sondern sie enthalten Phenolharz als Bindemittel und werden dementsprechend verarbeitet (12).

#### 4.2. Metallische Werkstoffe

Reine, schmelzmetallurgisch hergestellte Werkstoffe werden als Reibwerkstoffe immer seltener verwendet und verlieren zunehmend an Bedeutung. Vor allem ihrer Belastbarkeit sind trotz guter Wärmeleitfähigkeit Grenzen gesetzt. Für metallische Reibwerkstoffe gibt es zwei größere Anwendungen. Einerseits ist es Sondermessing, das beim Synchronring von Schaltgetrieben gleichzeitig auch der Werkstoff des Gesamtbauteiles ist, und andererseits ist es Grauguß, aus dem Bremsklötze für Schienenfahrzeuge hergestellt werden.

Sondermessing wird bei nicht zu hohen Belastungen heute noch bei der Herstellung von Synchronringen angewendet. Es ist jedoch schon im starken Maße durch Sinterstahl ersetzt worden, der aber

auf Grund seiner schlechten tribologischen Eigenschaften mit einem Reibwerkstoffbelag versehen werden muß.

Grauguß wird auch heute noch als Reibwerkstoff in Klotzbremsen an Schienenfahrzeugen verwendet. Das Gefüge des Materials soll perlitisch bis perlitisch - sorbitisch sein und keinen freien Ferrit aufweisen (13). Zur Verbesserung des Verschleißverhaltens weist das Gußeisen in den meisten Fällen einen Phosphorgehalt von etwa 0,8 % auf.

#### 4.3. Pulvermetallurgische Verbundwerkstoffe

Pulvermetallurgisch hergestellte Verbundwerkstoffe bestehen aus einer metallischen Matrix, Festschmierstoffen, keramischen oder mineralischen Bestandteilen sowie Poren. Die metallische Matrix besteht entweder aus einem Kupfer- oder Eisenbasiswerkstoff mit den verschiedensten Legierungselementen. Bei Kupferbasiswerkstoffen dominiert Zinnbronze.

Die gute Wärmeleitfähigkeit sowie die hohe Temperaturbeständigkeit der metallischen Matrix sind der Grund für den Einsatz pulvermetallurgisch hergestellter Reibwerkstoffe bei hohen Beanspruchungen und hohen Dauertemperaturen in trockenlaufenden Kupplungen oder Bremsen. Diese Werkstoffe bestehen aus etwa 40 bis 60 Vol% Metall, 30 bis 50 Vol% Festschmierstoff, meist Graphit oder Koksmehl, aber auch Schwermetallsulfide, und bis zu 15 Vol % verschiedener keramischer oder mineralischer Bestandteile, die meist der Regulierung des Reibverhaltens dienen. Die Herstellung der Reibbeläge erfolgt nach dem klassischen Verfahren der Pulvermetallurgie, also Pressen und Sintern. Oft werden die Reibbeläge unter Druck und Verwendung einer Bindschicht auf Stahlblechträger aufgesintert.

Die Porosität ist der Grund für die Anwendung von pulvermetallurgisch hergestelltem Reibmaterial unter Öllauf. Als Matrixwerkstoff dominiert hier Bronze. Der Matrixanteil ist meist höher als bei den trocken laufenden Reibwerkstoffen, die Porosität liegt zwischen 15 und 35 %, der Festschmierstoffgehalt dementsprechend niedriger.

Die Reibbelagmischung wird gepreßt und aufgesintert. Sehr verbreitet ist das wirtschaftliche Aufstreuverfahren, bei dem die Reibwerkstoffmischung auf den Stahlträger aufgestreut und dann angesintert wird. Dadurch lassen sich dünne Reibbeläge mit hoher Porosität herstellen. Das nachträgliche Planieren und das Einbringen der beim Öllauf üblichen Nutungen in unterschiedlicher Form ist dadurch spanlos möglich.

#### 4.4. Kohlenstoffwerkstoffe

Die hervorragenden Eigenschaften des Kohlenstoffes bei hohen Temperaturen, aber auch das günstige tribologische Verhalten von Kohlenstoffwerkstoffen führte in den letzten Jahren zum Einsatz von kohlefaserverstärktem Kohlenstoff als Reibmaterial (14). Während bei den bisher beschriebenen Reibwerkstoffen meist Stahl oder Gußeisen als Gegenwerkstoff eingesetzt werden, besteht bei den Kohlewerkstoffen gewöhnlich die gesamte Reibpaarung, also der Bremsbelag und die Bremsscheibe aus kohlefaserverstärkten Kohlewerkstoffen. Diese Reibpaarung ist thermisch extrem belastbar und besitzt ein geringes spezifisches Gewicht. Auf Grund der hohen Herstellungskosten ist die Anwendung dieser Werkstoffe nur besonderen Anwendungsfällen wie Flugzeugbremsen und Rennwagen der Formel 1 vorbehalten. Auch in den Bremssystemen des TGV wurden diese Werkstoffe erprobt. Ihr breiter Einsatz erscheint jedoch derzeit aus Kostengründen unwahrscheinlich (1).

#### 5. Pulvermetallurgisch hergestellte Hochleistungsreibwerkstoffe für Klotzbremsen an Schienenfahrzeugen.

Wie bereits erwähnt, war Grauguß lange Zeit der bestimmende Reibwerkstoff für Klotzbremsen an Schienenfahrzeugen mit Fahrgeschwindigkeiten bis 120 km/h. Die vielen Unzulänglichkeiten dieses Reibwerkstoffes gehörten noch vor einigen Jahrzehnten zum Alltag für Benutzer der Eisenbahn, vor allem, als auch die Personenwagen noch mit Klotzbremsen ausgerüstet waren. Erinnerung sei an das oft unerträglich laute, kreischende Bremsgeräusch beim

Einfahren der Züge in den Bahnhof oder den durch die starke Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes hervorgerufenen "Halteruck", der auf den deutlichen Anstieg des Reibwertes bei gegen 0 gehender Geschwindigkeit zurückzuführen ist.

Neben diesen offensichtlichen Nachteilen erforderte außerdem die relativ geringe Standzeit der Graugußklötze ein häufiges Auswechseln. Weiterhin erzeugen diese Bremsklötze Riffeln auf der Lauffläche des Radreifens. Dadurch verstärkt sich das Rollgeräusch der Fahrzeuge. Das Reibwertniveau von Grauguß ist mit etwa 0,1 relativ niedrig.

Zur Verminderung dieser Nachteile gab es schon zeitig Bestrebungen, organisch gebundene Verbundwerkstoffe auch an Klotzbremsen von Schienenfahrzeugen einzusetzen. Mit diesen Werkstoffen kann auch eine Reihe von Verbesserungen erreicht werden. Ein großer Vorteil aller Kompositwerkstoffe besteht darin, daß die Zusammensetzung in einem sehr weiten Bereich variiert werden kann und damit die Reibeigenschaften entsprechend beeinflussbar sind. So gibt es ein breites Sortiment an organisch gebundenen Kompositionsbremssohlen mit unterschiedlicher Reibcharakteristik, darunter Werkstoffe mit einem dem Grauguß entsprechenden Reibwertniveau, die für den direkten Austausch geeignet sind, sowie Werkstoffe mit einem Reibwertniveau um 0,25. Deren Verwendung gestattet es, die Anzahl der Bremssohlen herabzusetzen und damit das Gestänge und den Aufbau des Drehgestells wesentlich zu vereinfachen. Allerdings erhöhen sich durch derartige Maßnahmen die Reibungstemperaturen, so daß das Einsatzgebiet der organischen Verbundwerkstoffe auf niedrigere Geschwindigkeiten beschränkt bleibt. Ein ganz entscheidender Nachteil ist das schlechte Reibverhalten der Verbundbremssohlen unter Nässeeinwirkung. Der Reibwert sinkt dabei drastisch. Es kann außerdem zu einem starken Radreifenangriff kommen, bei dem sich aus dem Radreifen stammende Metallteile in die Sohle einlagern.

Obwohl aufgrund der steigenden Belastungen, insbesondere durch höhere Fahrgeschwindigkeiten und wegen der Forderung nach Verbesserung des Bremskomforts im Schienenfahrzeugbau die Tendenz zum Einsatz von Scheibenbremsen stark zunimmt, ist ein erhebli-

cher Anteil von bestehenden, aber auch von neuen Güterwagen, Lokomotiven und Triebfahrzeugen mit Klotzbremsen ausgerüstet. Dies führte zur Entwicklung von Sinter - Reibwerkstoffen für Klotzbremsen an Schienenfahrzeugen. Einen solchen Bremsklotz zeigt Bild 5.

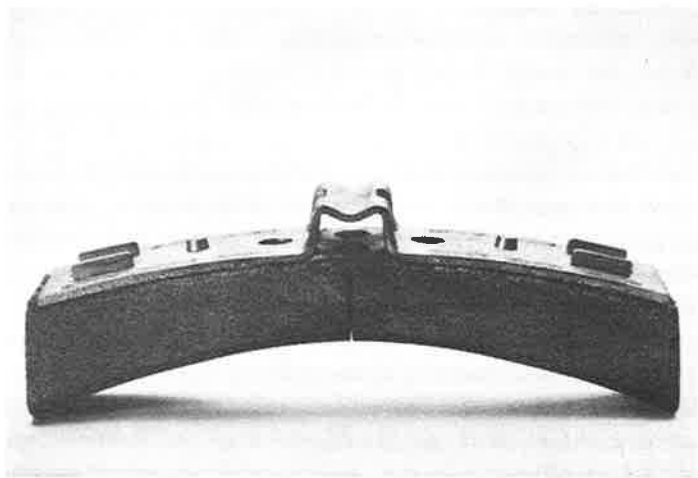


Bild 5 Bremsklotz aus PM - Reibmaterial

Die Reibwerkstoffmischung, in den meisten Fällen auf Eisen- oder Eisen-Bronze-Basis, wird auf den Stahlblechhalter aufgepreßt und dann gesintert. Die Masse eines solchen Klotzes beträgt zwischen 5 und 9 kg, je nach Klotzabmessung und Werkstofftyp. Bild 6 zeigt eine Übersicht über das Preisniveau der angeführten Bremsklotzarten. Der Preis für pulvermetallurgisch hergestellte Bremsklötze ist deutlich höher als der für Guß- oder organische Kompositionsbremssohlen. Pulvermetallurgisch hergestellte Bremsklötze weisen aber folgende vorteilhafte Eigenschaften auf:

1. Wie bei allen Kompositwerkstoffen kann über die Zusammensetzung auch das Eigenschaftsbild variiert werden.
2. Es existieren verschiedene Werkstoffe mit unterschiedlichem Reibwert, so daß eine individuelle Anpassung an das



Bild 6 Preisniveau unterschiedlicher Bremsklötze

Bremssystem, und auch der direkte Austausch gegen Gußeisen möglich wird. Das Nässeverhalten ist gegenüber den organisch gebundenen Sohlen deutlich besser und mit dem von Grauguß vergleichbar. Die Reibwertstabilität ist sowohl im Vergleich zu Guß, als auch gegenüber Verbundstoff - Reibmaterial wesentlich besser. Dadurch können Bremsungen mit hohem Energieumsatz (erhöhte Geschwindigkeiten bis 200 km/h und längere Gefällebremsungen) realisiert werden. Belastungen mit Dauertemperaturen von 500°C und kurzzeitigen Temperaturen von 850°C können ohne Probleme realisiert werden. Die Standzeiten sind gegenüber Gußeisen deutlich besser. Auch im Vergleich zu Verbundbremssohlen ist die Lebensdauer der gesinterten Bremsklötze höher. Die Radreifenabnutzung ist beim Einsatz der gesinterten Klötze etwas stärker als bei den organischen Verbundsohlen (15). Im Vergleich zum Grauguß erzeugt der Sinterklotz praktisch keine Riffeln, so daß sich das Rollgeräusch um 6 - 8 dBA reduziert.

Das Material für gesinterte Bremsklötze ist mit bis zu 7 % Porenvolumen relativ porös. Seine Dichte liegt je nach Materialzusammensetzung zwischen 3,5 und 5,5 g/cm<sup>3</sup> und damit

zwischen dem organischen Verbundmaterial und Grauguß. Auch die Härte variiert in einem relativ weiten Bereich von 20 bis 100 HRV (nach ASTM E 18-60 T).

Trotz des hohen Preises ist der Einsatz dieser Klötze besonders in Spezialgüterwagen mit thermisch hoch beanspruchten Bremsen sowie in allen klotzgebremsten Fahrzeugen gerechtfertigt, wenn maximale Sicherheit unter Winterbedingungen gefordert ist und die Standzeit deutlich verbessert werden muß.

#### 6. Pulvermetallurgisch hergestellte Reibwerkstoffe für den Einsatz in Scheibenbremsen

Bereits 1924 wurden die ersten Scheibenbremsen in Straßenbahnwagen erprobt. Obwohl als Reibpaarung Gußeisen gegen Gußeisen angewendet wurde, war die Bremswirkung angenehm weich und besser als mit der herkömmlichen Klotzbremse (3). Bereits wenige Jahre später wurde in Scheibenbremsen von Schienenfahrzeugen das organisch gebundene Verbundmaterial, damals noch auf Asbestbasis, verwendet. Heute wird weltweit ein breites Sortiment an asbestfreien organischen Verbundmaterialien angeboten. Der Reibungskoeffizient dieser Beläge, dessen Mittelwert bei  $\mu = 0,35$  liegt, soll während der gesamten Anwendungszeit konstant bleiben, unabhängig vom Stand der Abnutzung. Außerdem soll sich sein Betrag um nicht mehr als  $\pm 15\%$  verändern, und dies sowohl in Gegenwart von Feuchtigkeit oder die Scheibe benetzenden Wassers als auch innerhalb des Variationsbereiches der anliegenden Flächenpressung. Zur Zeit gibt es nur sehr wenig Verbundmaterialien, die diese beiden Bedingungen erfüllen. Die Scheibenbremse mit organischen Bremsbelägen erreicht ihre Leistungsgrenze bei ca.  $400^{\circ}\text{C}$ , die bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 200 km/h auftreten.

Diese Umstände führten zur Entwicklung von Scheibenbremsbelägen auf Sintermetallbasis für Schienenfahrzeuge. Da die pulvermetallurgischen Werkstoffe gegenüber organisch gebundenen Werkstoffen eine große Starrheit aufweisen, beinhaltet die Entwicklung eines Hochenergiereibbelages nicht nur die reine

Werkstoffentwicklung, sondern umfaßte auch das Finden einer Belaganordnung, die folgende, eigentlich unvereinbare Merkmale aufweist:

1. Sicherung einer guten Auflagefläche des Reibbelages auf der Bremsscheibe, um eine einheitliche Verteilung des Wärmestromes auf die gesamte Reibungsbahn zu erreichen und damit unterschiedlich warme Bereiche und Spuren zu vermeiden, bei gleichmäßiger Abnutzung aller Einzelbeläge.
2. Minimierung der Verringerung der Reibung in Gegenwart von Wasser, Schnee und Eis.

Das Haupteinsatzgebiet von Sintermetall - Scheibenbremsbelägen für Schienenfahrzeuge sind Hochgeschwindigkeitszüge mit Geschwindigkeiten von gegenwärtig 250 km/h und einer Entwicklung hin zu Geschwindigkeiten von 300 bis 350 km/h.

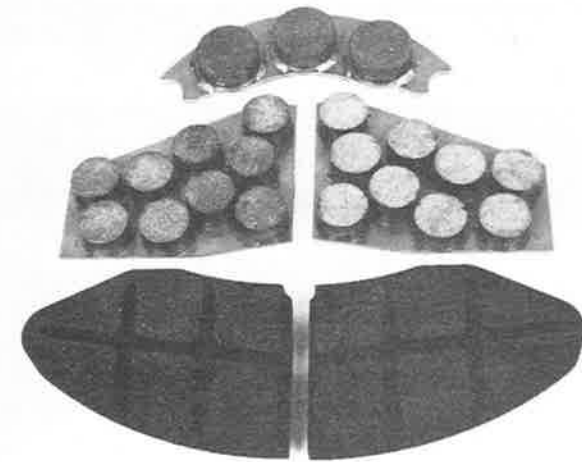


Bild 7 Scheibenbremsbeläge für Schienenfahrzeuge

Neben einem organisch gebundenen Monoblockbelag zeigt Bild 7 Scheibenbremsbeläge auf Sintermetallbasis, bei denen das Prinzip der Anordnung einzelner Belagenden zum Zweck einer gleichmäßigen Wärmeverteilung realisiert ist.



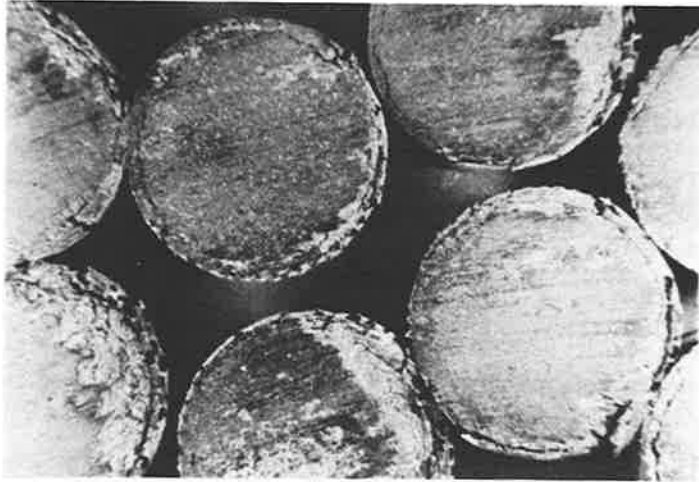


Bild 8 Ausschnitt der Reibfläche eines Gesamtbelages nach einer Bremsung aus 350 km/h.

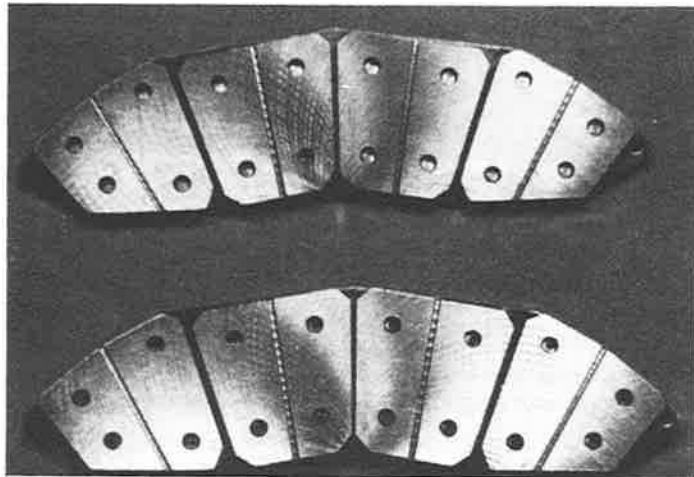


Bild 9 Bremsbelag für den japanischen Hochgeschwindigkeitszug Shinkansen, bei dem der Belag einem Monoblockbelag noch sehr ähnlich sieht.

Bild 10 zeigt das Gefüge eines Sinterbelagwerkstoffes für Scheibenbremsen von Schienenfahrzeugen. Da auch hier die Eigenschaften über die Zusammensetzung des Werkstoffs variiert werden können, existieren unterschiedliche Materialtypen, die in ihrer Charakteristik verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten angepaßt sind. Die metallische Matrix besteht bei diesen Werkstoffen meist aus Bronze, bei dem japanischen Belag kommt eine Cu-Fe-Ni Matrix zur Anwendung (16). Die nichtmetallischen Bestandteile wie verschiedene Kohlenstoffe und Mineralanteile sind gut zu erkennen.

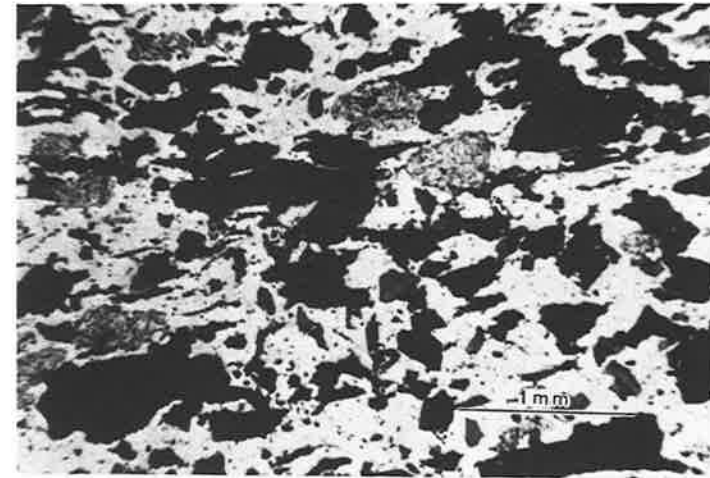


Bild 10 Gefüge eines PM - Reibwerkstoffes für Scheibenbremsbeläge von Schienenfahrzeugen

Auch bei den Scheibenbremsen für Schienenfahrzeuge sind die Preise für Bremsbeläge auf Sintermetallbasis etwa 6 mal höher als für organisch gebundene Verbundwerkstoffbeläge. Trotzdem existiert für die Sinterbeläge mit ihren vorteilhaften Eigenschaften keine kostengünstigere Alternative. Die Temperaturbeständigkeit ist bis mindestens 700°C, meist jedoch bei noch höheren Temperaturen gewährleistet.

Bei den hohen thermischen Belastungen ist der Verschleiß im Vergleich zu organischem Material wesentlich geringer und es gibt keine Geruchsbelästigung. Der Bremsscheibenverschleiß ist vertretbar, allerdings ist bei den hohen Belastungen bei gesintertem Reibmaterial Stahl als Gegenmaterial erforderlich. Wie auch bei der Klotzbremse ist die Nässeempfindlichkeit von Sinterreibbelägen geringer.

#### 7. Pulvermetallurgisch hergestellte Reibwerkstoffe für Synchronringe

Die Notwendigkeit, an Synchronringen Reibbeläge einzusetzen, ergab sich mit der Herstellung von pulvermetallurgisch hergestellten Synchronringen aus Sinterstahl. Der verbreitetste Reibbelag für Synchronringe sind derzeit thermisch gespritzte Molybdänschichten. Bild 11 zeigt einen solchen Synchronring und

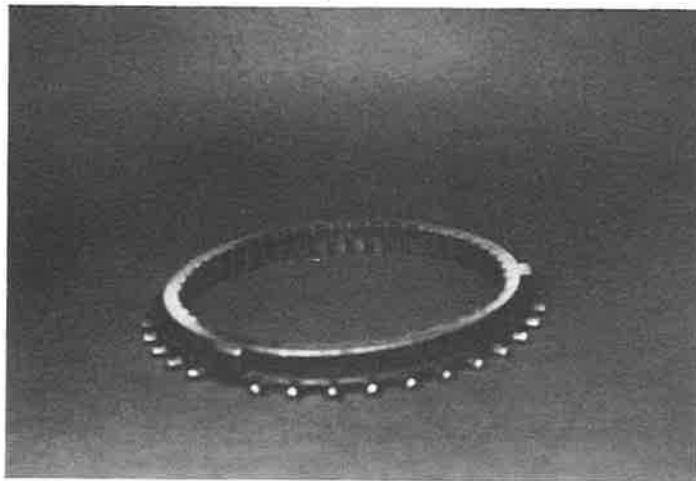


Bild 11 Synchronring mit Molybdänspritzschicht als Reibbelag

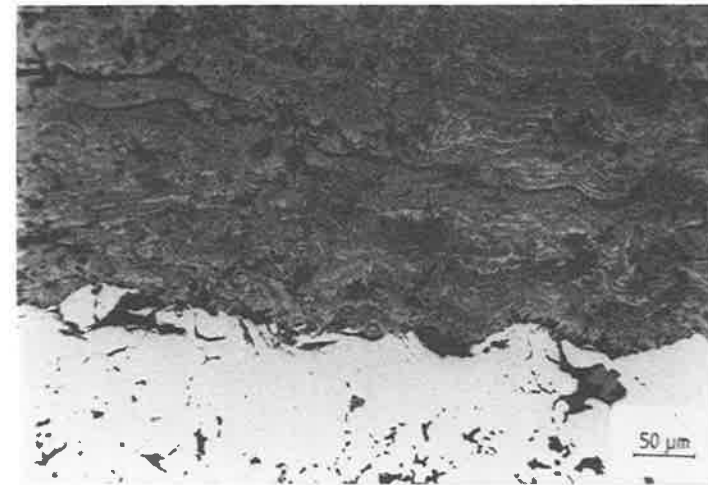


Bild 12 Gefüge der Molybdänspritzschicht

Bild 12 das Gefüge der Schicht auf dem Grundwerkstoff. Man sieht, daß die Schicht mehrphasig ist und nicht nur aus Molybdän, sondern auch aus Molybdänoxiden und Poren besteht. Nur dieser mehrphasige Werkstoff besitzt die guten tribologischen Eigenschaften. Das Einbringen reinen Molybdäns, beispielsweise als Blech, führt zu keinem befriedigenden Reibverhalten.

Neben den Molybdänspritzschichten werden in einzelnen Fällen auch Papierbeläge verwendet. Diese Reibbeläge, die sich durch einen hohen Reibwert unter Öl auszeichnen, aber empfindlich gegen thermische Überlastung sind, bestehen aus Baumwollfasern mit Kunstharzbindung. In den hochporösen Papierwerkstoff sind Graphitanteile und Hartstoffteilchen eingelagert. Dieser Papierbelag wird ausgeschnitten und in den Synchronring eingeklebt (17).

Sehr gute Eigenschaften besitzt ein pulvermetallurgisch hergestellter Reibbelag auf Bronzebasis für Synchronringe. Dieser Reibbelag wird nach der Aufstreutechnologie hergestellt. Das bedeutet, daß die pulverförmige Reibwerkstoffmischung mit Festschmierstoffen und harten mineralischen Bestandteilen auf ein Trägerblech aufgestreut und dann gesintert wird. Nutzungen

können spanlos eingebracht werden. Aus diesen Blechen werden der Abwicklung des Innenkonus entsprechende Streifen ausgeschnitten, die dann eingebogen und mittels Laser in den Sinterstahlsynchronring eingeschweißt werden. Derartige Synchronringe weisen ein ausgezeichnetes Reibverhalten bei geringem Verschleiß und guter Überlastbeständigkeit auf (18). Bild 13 zeigt einen solchen Synchronring.

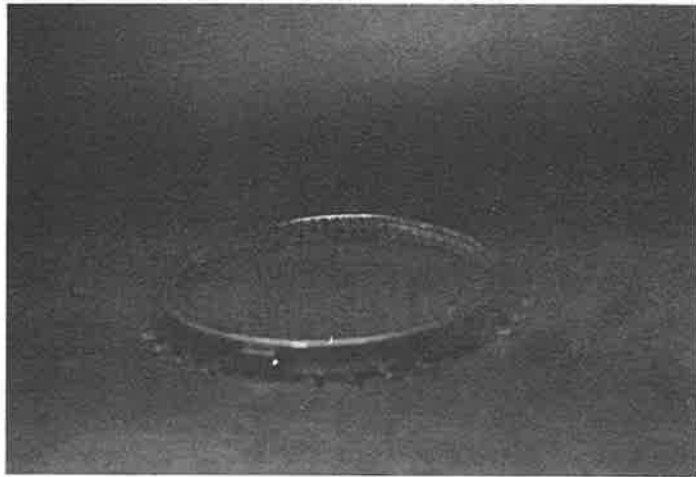


Bild 13 Synchronring mit Streusinter - Reibbelag

Sowohl das Aufspritzen von Molybdän als auch das Einbringen des Streusinter- oder Papierreibbelages sind zusätzliche Arbeitsgänge, die trotz Automatisierung zusätzliche Kosten verursachen und, wenn sie nicht beim Hersteller des Sinterstahlringes erfolgen, auch zusätzliche Transportvorgänge erforderlich machen.

Daher gibt es Versuche, die Kosten beim Einbringen eines Sinterreibbelages dadurch zu senken, daß eine Reibmaterialmischung auf Bronzebasis mit einem organischen Binder versehen wird und dann in einem Werkzeug auf den Sinterstahlträger aufgepreßt wird. Der Binder wird anschließend ausgetrieben und das Teil wird gesintert (19). Dieses Verfahren ist durch

mehrfache Wärmebehandlung wie Sintern des Stahlringes, Entwachsen des Reibmaterials, Einsintern des Reibmaterials immer noch sehr aufwendig.

Ein sehr günstiges Konzept, das alle Vorteile der Pulvermetallurgie ausnutzt, ist die Herstellung eines Synchronringes mit einem Eisenbasis - Reibbelag als Verbundbauteil (20). Bild 14 zeigt den Prototyp eines derartigen Ringes.

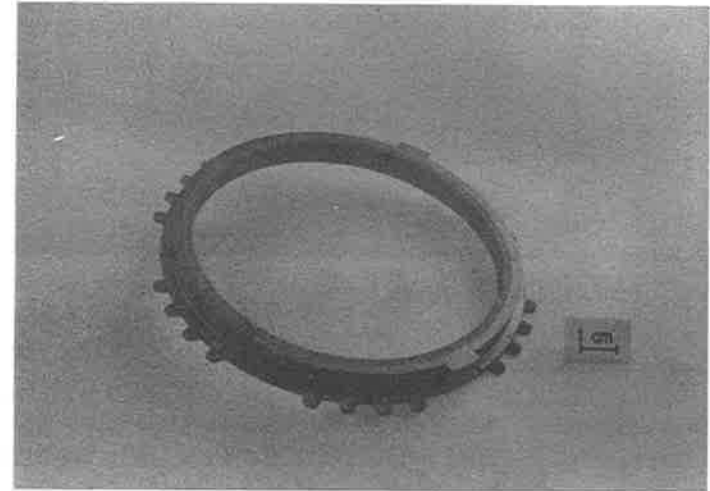


Bild 14 Synchronring mit intergriertem Eisenbasis - Reibbelag

Es hat sich gezeigt, daß bei der Entwicklung von Reibwerkstoffen auf Eisenbasis für Synchronringe gute tribologische Eigenschaften erreicht werden können (21). Durch die Verwendung von Eisen als Matrixmetall ist es möglich, Verbundbauteile aus zwei verschiedenen Pulvern bzw. Pulvermischungen zu pressen und das Teil mit beiden Werkstoffen gemeinsam zu sintern. Bild 15 zeigt den Schnitt durch einen als Verbundbauteil hergestellten Synchronring. Die Verbindung ist hier sehr innig. Ein besonderer Vorteil ist jedoch die Möglichkeit zur Reduzierung der Herstellungskosten.

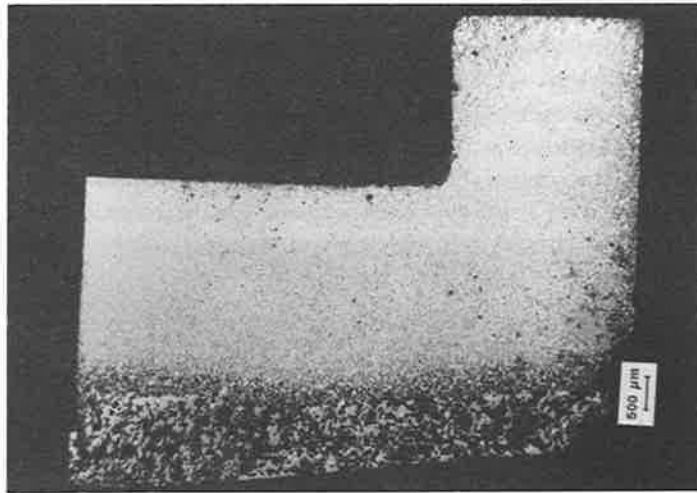


Bild 15 Schnitt durch einen Verbund - Synchronring

#### 8. Abschlußbemerkung

Pulvermetallurgisch hergestellte Reibwerkstoffe sind heute aus dem Gesamtsortiment aller Reibwerkstoffe nicht mehr wegzudenken. Sie haben in diesem Sortiment ihren Platz für die Anwendung im Öllauf und/oder im Trocklenlauf bei hohen und sehr hohen Beanspruchungen. Auf Grund ihres vergleichsweise hohen Preises, aber auch einiger technischer Nachteile gegenüber organisch gebundenem Material, wie eine gewisse Starrheit und ein geringeres Schwingungsdämpfungsvermögen, werden sie kaum eine ausschließliche Anwendung erfahren und andere Reibwerkstoffe überflüssig machen. In den für Sintermetall - Reibbelägen typischen Anwendungsfeldern haben sie sich im Wettbewerb jedoch durchgesetzt und es wird auch künftig, nicht zuletzt durch Weiterentwicklungen, nicht auf sie verzichtet werden können.

Die Autoren danken Herrn Dr. W. Schröder (AlliedSignal Bremsbelag GmbH) und Herrn D. Gonia (Sintermetallwerk Krebsöge) für das zur Verfügung gestellte Bildmaterial und die zusätzlichen Informationen.

#### Literaturverzeichnis

1. Dolbear, K. D.  
Friction materials in rail transportation  
Powder Metallurgy 1992 Vol. 35 No. 4
2. Tracey, V. A.  
Powder materials in rail transport  
Powder Metallurgy 1992 Vol. 35 No. 1
3. Sander, K.  
Scheibenbremsen für Schienenfahrzeuge  
herausgegeben von der Bergischen Stahl-Industrie (BSI)  
Remscheid, 1971
4. Buberl, A.  
Auto Mobile  
Wien 1950 S. 93
5. Bohmhammel, H.  
Entwicklung von Reibbelägen für Kupplungen und Bremsen  
Gummi, Asbest, Kunststoffe 1973/11 S.925
6. ...  
Sicherheit kennt keine Kompromisse  
Firmenschrift Allied Signal Technologies,
7. Heller, A.  
Motorwagen und Fahrzeugmaschinen für flüssigen Brennstoff  
Berlin, Verlag von Julius Springer, 1912
8. Löcker, K.-D.  
Friction materials - an overview  
Powder Metallurgy 1992 Vol. 35 No. 4

9. Wells, T. C.  
Friction materials in aerospace applications  
Powder Metallurgy 1992 Vol. 35 No. 4
10. Oehl, K.-H.; Paul, H.-G.  
Bremsbeläge für Straßenfahrzeuge  
Die Bibliothek der Technik Band 49  
Verlag Moderne Industrie
11. Schneider, L.  
Über den Einfluß der Temperatur auf das Reibverhalten von  
Brems- und Kupplungsbelägen  
Schmierungstechnik, Berlin 19 (1988) 7
12. Liu, T.; Rhee, S.K.  
High temperature wear of semimetallic disc brake pads  
Wear, 46 (1978) 213 - 218
13. Schatt, W.  
Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaues  
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig  
3. Auflage 1987 S. 367
14. Moergenthaler, K.; Maiwald-Hiller, I.  
Carbon fibre reinforced carbon in car brake systems  
Adv. Mater. Technol. Intern. (1990) S.123 ff
15. Raison, J.  
Les matériaux frittés pour le freinage dans le domaine  
ferroviaire  
GESINTERTE MATERIALIEN FÜR BREMSEN IM EINSATZ AUF DEM  
GEBIET DES EISENBAHNWESENS  
Communications papers  
Colloque sur les matériaux à propriétés physiques particu-  
lières obtenus à partir de poudre, Paris- 6,7,8 avril 1992
16. Tomiyama, Y.  
About the development of sintered contact strip and brake  
lining for high speed trains  
Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress  
S. 1055 - 1058
17. Thelen, E. u.a.  
"Reibungs- und Verschleißverhalten moderner Reibschichten  
für Synchronisierungen"  
Zahnradfabrik Friedrichshafen AG  
Schriftenreihe "Praxis - Forum"
18. Wagner, D.  
Neue Reibmaterialien und Konzepte für Einfach- und Mehr-  
fachsynchronisierungen  
ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 95 (1993) 7/8
19. Romero, A.  
"Clutch technology moves into gear boxes"  
Metal Powder Report Vol.48 No.6 June 1993 p. 30 - 33
20. Gonia, D.; Schneider, L.  
Gesinterte Verbundbauteile für Schaltgetriebe  
Vortrag, gehalten zum Symposium "Beschichten und Verbinden  
in Pulvermetallurgie und Keramik"  
26. - 27. November 1992 in Hagen  
Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis  
Band 8 S. 204 - 222
21. Schneider, L.; Gonia, D.  
Ein pulvermetallurgischer Reibwerkstoff auf Eisenbasis für  
Synchronringe  
International Conference on Materials by Powder Technology  
1993, Dresden  
Proceed. "Materials by Powder Technology" - PTM '93, S. 125