

## Beanspruchung des Kontaktrollenlagers eines Bahnstufenschalters

K. F. Stärk und G. Kiesling

### 1. Zusammenfassung

In Traktionsfahrzeugen werden zur Leistungsänderung der Motoren sog. Stufenschalter eingesetzt. Die Kontaktrollen, mit denen die 32 Schaltstufen angewählt werden, werden ständig mechanisch und elektrisch beansprucht was zu Verschleiss der Kontaktrollenlager führte. Da an der eingesetzten Kapillar-Bronze keine Veränderungen gegenüber früheren Lieferungen festgestellt werden konnte, wurde zuerst in einer praxisnahen Prüfung der Betriebsschadenzustand reproduziert.

Als Lösung wurde eine moderne PTFE/Pb-Sinterbronze und ein Hochleistungslagerwerkstoff (PTFE/Graphit-gefülltes Polyamid/-imid) vorgeschlagen und mit Erfolg getestet. Die neuen Lager haben sich in allen umgerüsteten Stufenschaltern in Hunderttausenden von Bahnkilometern inzwischen bewährt.

### 2. Sachliche Veranlassung

In Traktionsfahrzeugen wird der Bahnstufenschalter in prinzipiell unveränderter Bauweise seit über 40 Jahren benützt. Die Kontaktrollen mit denen die Schaltstufen angewählt werden, werden ständig mechanisch und elektrisch beansprucht. In den letzten Jahren nahmen Schäden durch Verschleiss der Kontaktrollenlager aus einer offenporigen Kapillar-Bronze

mit Oelimpregnierung, die in unveränderter Ausführung von Anfang an eingesetzt waren, zu.

### 3. Ziel

- Die Ursache für den Verschleiss der Kontaktrollenlager am Bahn-Stufenschalter NO 32 mit 32 Schaltstufen ist bekannt.
- Abhilfemassnahmen zur Vermeidung oder drastischen Reduzierung des Lagerverschleisses sind bekannt.

### 4. Aufbau und Funktionsweise des Stufenschalters

Der prinzipielle Aufbau des Bahn-Stufenschalters NO 32 im Bereich der Kontaktrolle ist in Bild 1 dargestellt. Die Kontaktrolle wird beim Abrollen von 4 Spiralfedern an den Kontaktring und den Laufring (bei Stromunterbruch) bzw. die Kontaktsegmente (bei Stromfluss) angepresst. Die Gleitlager werden ebenfalls mit dieser Kraft belastet. Der Stufenschalter ist mit Isolieröl gefüllt. Bild 2 zeigt die Abmessungen des kleinen Gleitlagers und des sich darin drehenden nitrierten Zapfens der Kontaktrolle und enthält einen Auszug aus den Technischen Unterlagen über die Kapillarbronze des Kontaktrollen-Lagers.

### 5. Schadensanalyse

#### 5.1 Metallographische Untersuchung eines Schadenslagers

Ein Schadenslager mit 1,3 mm Lagerverschleiss wurde mit einem im Versuch geprüften neuen Lager aus Kapillarbronze verglichen (Verschleiss 0,03 mm). Bild 3 macht ebenso wie andere Prüfungen deutlich, dass der Lagerverschleiss nicht in erster Linie durch Unterschiede im Lagerwerkstoff erklärt werden kann. Die Härte ist mit 54 bzw. 52 HB 2.5

praktisch gleich, das Gefüge und die Kapillarausbildung ist sehr ähnlich.

### 5.2 Untersuchung der Lagerzapfen

Der optische Eindruck der Lagerzapfen legte die Vermutung nahe, dass nicht in jedem Fall das Lagermaterial die Hauptursache für den Verschleiss war. Bild 4 zeigt einen Lagerzapfen einer Schadens-Kontaktrolle aus einer Lokomotive. Am Zapfen sind Anlaufspuren sichtbar, wie sie bei einem massiven Stromübergang entstehen können (was prinzipiell möglich ist, da der Lagerkasten aus eloxiertem Aluminium besteht). Kleine Vertiefungen und Ausbrüche erhöhen die Rauigkeit des Zapfens stark. An einem Zapfen wurde neben der Schwärzung ein Anriss von ca. 1 mm Länge gefunden. Auch die Zapfenoberfläche einer neuen Kontaktrolle zeigte unregelmässige Aufrauungen in Umfangsrichtung die als Spuren einer Schleifbehandlung identifiziert wurden, die mit ungenügendem Abtrag nach dem Nitrieren vorgenommen worden war. Stromüberschläge durch das Lager können zusätzliche Ausbrüche erzeugen. Die maximalen Rauhtiefen  $R_t$  sind an den Schadenszapfen  $> 3,5 \mu\text{m}$ . Die Streubreite der neu gefertigten Zapfen reichte von N4 ( $R_{t\text{max}}=1,28 \mu\text{m}$ ) bis N6 ( $R_{t\text{max}}=6,01 \mu\text{m}$ ). Ein Zapfen aus einem Versuchsschalter ergab  $R_t$ -Werte bis  $3,17 \mu\text{m}$  (N5). Im Vergleich hierzu hatte ein lagermässiger, gehärteter Zentrierstift die Qualität N2 ( $R_{t\text{max}}=0,67 \mu\text{m}$ ).

Die hohen maximalen Rauigkeiten der Zapfen können die Mikroerspannungsspuren in den Schadenslagern erklären.

#### 5.3 Analyse der Lagerbeanspruchung im Stufenschalter

- mittlere Flächenpressung  $p_m = 3 \text{ MPa}$
- mittlere Schaltgeschwindigkeit  $s_m = 120 \text{ mm/s}$
- mittlere Reibgeschwindigkeit am Lagerzapfen mit

- spez. Lagerbelastung  $p_m \cdot v_m = 0$  bis  $0,24 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$
- mittlerer Schaltweg für im Mittel 3 Schaltstufen  
 $s_m \approx 100 \text{ mm}$
- mittlere Anzahl Umdrehungen der Kontaktrolle bzw. des Lagerzapfens pro Schaltvorgang  $N = 1,8$
- Die Flächenpressung im Lager ist mit  $3 \text{ MPa}$  nicht sehr hoch (Streckgrenze ca.  $40 \text{ MPa}$  für KIMA-Bronze).
- Die Reibgeschwindigkeit ist mit  $0$  bis  $0,08 \text{ m/s}$  sehr niedrig. Eine hydrodynamische Schmierung (tragender Schmierstoffspalt) ist nicht zu erwarten.
- Trägt man Betriebswerte des Lagers in das Grenzlastdiagramm für die KIMA-Kapillarbronze, siehe Bild 5 ein, so liegt der Betriebspunkt ausserhalb des angegebenen Bereiches, im wesentlichen wegen den niedrigen Gleitgeschwindigkeiten. Hinzu kommt noch die für einen Schmierfilmaufbau sehr ungünstige alternierende Drehbewegung der Kontaktrolle.

## 6. Versuche

### 6.1 Reproduzierung des Lagerverschleisses

Der zweite Teil der Untersuchung hatte die Reproduzierung der Betriebsschäden in den Lokomotiven zum Ziel, um damit die praxisgerechte Simulation der Beanspruchung zu verifizieren. Hierzu standen Lager aus der Kapillarbronze KIMA aus Ersatzteilbeständen und Kontaktrollen (Schadensrollen und Rollen mit neuen Zapfen) zur Verfügung.

In Bild 6 ist der Prüfaufbau auf einer umgerüsteten Hobelmaschine dargestellt. Um Zeit zu sparen war es möglich, 4 Kontaktrollen gleichzeitig bei alternierender Drehbewegung zu prüfen. Bild 7 zeigt einen Ausschnitt der Prüfeinrichtung im montierten Zustand. Wie im Originalschalter waren alle Teile während der Prüfung von Isolieröl umspült.

Bis auf den nicht nachvollzogenen echten Stromschaltvorgang entspricht die Mechanik ziemlich genau dem Vorgang im Stufenschalter. Alle Materialien und Teile entstammten einem Originalschalter.

Der Hub von  $100 \text{ mm}$  in einer Zeit von  $1,84 \text{ s}$  pro Zyklus ergibt eine Hubgeschwindigkeit von  $v_{\min} = 0$  bis  $v_{\max} = 170,8 \text{ mm/s}$  und etwa gleiche Reibgeschwindigkeiten im Lager wie im Schaltbetrieb. Insgesamt wurden 3 Versuche mit je 4 Kontaktrollen (je 8 Lager) über eine Laufzeit von je  $143 \text{ h}$  durchgeführt. Der Versuch entspricht ca.  $2,8 \cdot 10^5$  Doppelhüben bzw. ca. 1,1 Millionen Schaltungen und erreicht damit Schaltzahlen, die im Betrieb zu gut messbarem Lagerverschleiss geführt hatten.

Im ersten Dauerversuch wurde bei allen Lagern aus KIMA-Bronze ein deutlicher Verschleiss von  $0,02$  bis  $0,12 \text{ mm}$  festgestellt (Mass- und Gewichtsmessungen).

Auffallend war der hohe Kupferabrieb an den Kontaktsegmenten und -ringabschnitten, der auf einen hohen Reibwert in den Lagern bzw. einem hohen Reibmoment an den Kontaktrollen schliessen liess, s. Bild 8.

Im zweiten Versuch wurde eine Originalpaarung aus einem Schadensschalter eingesetzt und hierbei das Lager um  $(180^\circ)$  gedreht) erneut eingebaut. Der Schaden aus dem Bahnbetrieb (Verschleiss  $\Delta D = 1,3 \text{ mm}$ ) wurde im Versuch mit  $\Delta D = 1,05 \text{ mm}$  praktisch identisch reproduziert, s. Bild 3 (links). Da sich das Lager in Gefügezustand, Kapillarverteilung und Härte praktisch nicht von anderen Lagern unterscheidet, war die wesentliche Ursache des Verschleisses in der Kombination der ungenügenden Oberflächenqualität des Zapfens mit einem weniger geeigneten Lagermaterial zu suchen.

### 6.2 Erprobung alternativer Lagerwerkstoffe

Zur Lösung des Verschleissproblems wurden als weiterentwickelte Lagerwerkstoffe die Teflon-Blei-Sinterbronze DQ1 (ein GLACIER/TRISTAR-Patent) und das hochbeanspruchbare ge-

füllte Polyamid-imid TORLON von AMOCO-Chemical Corporation, s. Tafel 1 vorgeschlagen.

Der mit Graphit und Teflon gefüllte Polymerwerkstoff hat den Vorteil besonders niedriger Reibwerte und ist ein elektrischer Isolator, der Stromdurchgänge über das Lager und den Kontaktrollenkasten verhindert.

Im Versuch zeigten die TORLON- und DQ1-Lager keinen Verschleiss oder Gewichtsverluste (die Sinterbronze nimmt in ihren Poren etwas Isolieröl auf).

Auch im Kontrollversuch mit Schadensrollen aus dem Bahnbetrieb war im Rahmen der Messgenauigkeit kein Lagerverschleiss bzw. Gewichtsverlust feststellbar. Auch das TORLON-Lager das gegen die Schadens-Kontaktrolle aus dem Reproduzierversuch eingesetzt worden war, zeigte keinerlei Anzeichen von Verschleiss (eine leichte Glättung der herstellungsbedingten Drehriefen in der Bohrung). Der Kupferabrieb im Oelbad ging bei gleicher Laufzeit auf ca. 1/10 zurück.

Von den ersten in der Praxis eingesetzten Lagerserien wurden bei Inspektionen Lagertoleranzmessungen vorgenommen, s. Bild 9. Die gewünschte Lagertoleranz D9 von ca. 30-60 µm wurde beim TORLON gut eingehalten und hat sich mit der Fahrtstrecke nicht verändert. Auch beim GLACIER-Material ist keine Tendenz zur Zunahme der Lagertoleranz mit der Fahrtstrecke der Lokomotive zu erkennen, obwohl die Herstellungstoleranzen bedeutend höher lagen als D9.

### 7. Schlussfolgerungen

- Das bisher eingesetzte Lagermetall KIMA-Kapillarbronze ist für niedrige Gleitgeschwindigkeiten und alternierende Drehbewegung des Zapfens nicht geeignet.
- Die Herstellungsabläufe des Zapfens sind für eine gute Oberflächenqualität nicht empfehlenswert.

- Das tribologische System Lager/Zapfen wird an seiner Einsatzgrenze betrieben, d.h. bereits kleine Verschlechterungen einer Komponente können zum Versagen bzw. zu grossem Verschleiss führen. Der Verschleiss konnte unter praxisnahen Bedingungen im Versuch reproduziert werden.
- Zwei neue, besser geeignete Lagerwerkstoffe wurden vorgeschlagen und im Laborversuch unter gleichen Bedingungen überprüft, wobei kein Verschleiss festgestellt werden konnte und auch der Abrieb an den Kupferkontakten drastisch reduziert wurde.
- Die neuen Lagerwerkstoffe wurden als Lösung des Problems gesehen und haben sich bereits in Stufenschaltern in Lokomotiven bewährt.

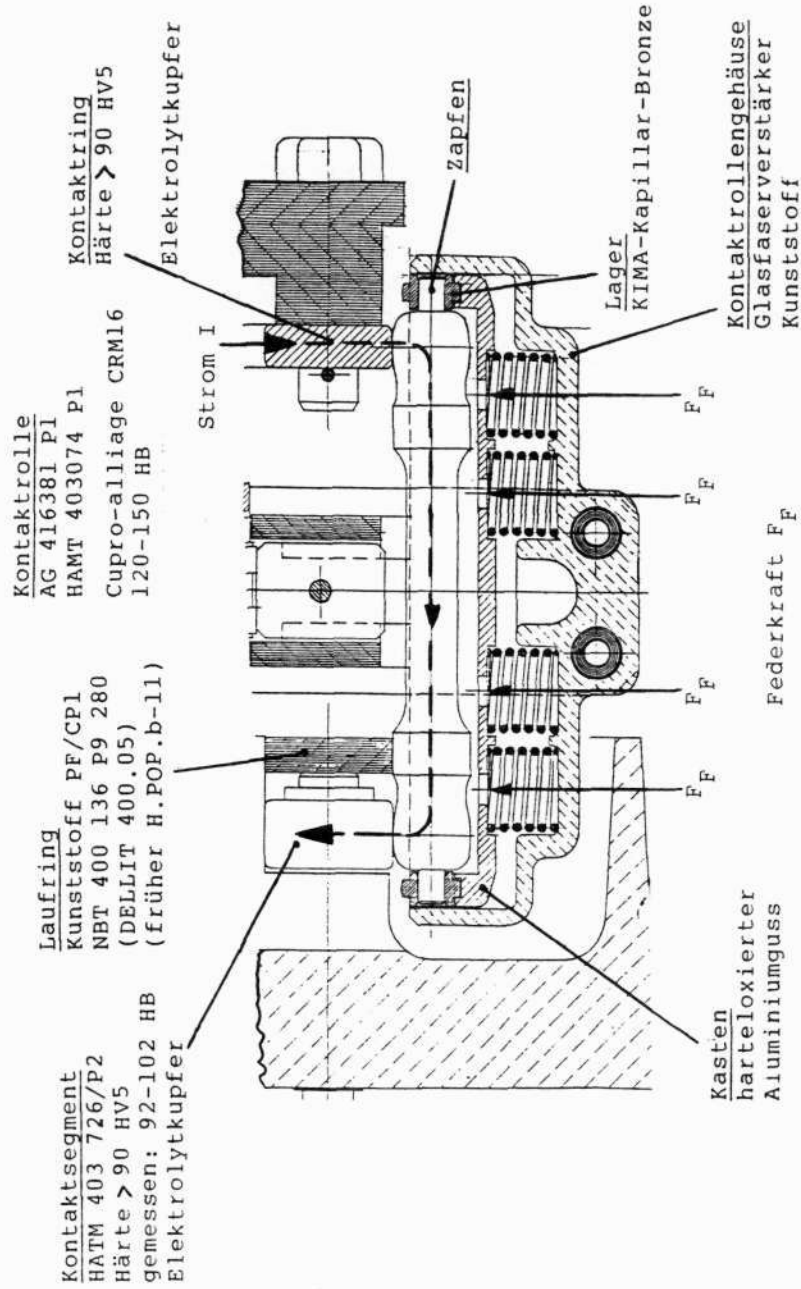
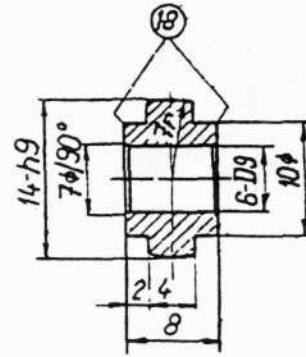
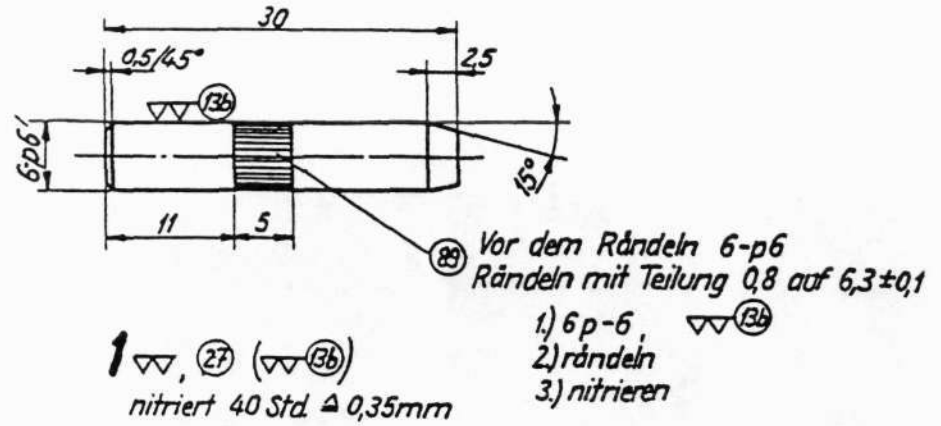


Bild 1: Uebersicht über Kontaktrolleneinbau in Bahnstufenschalter N032

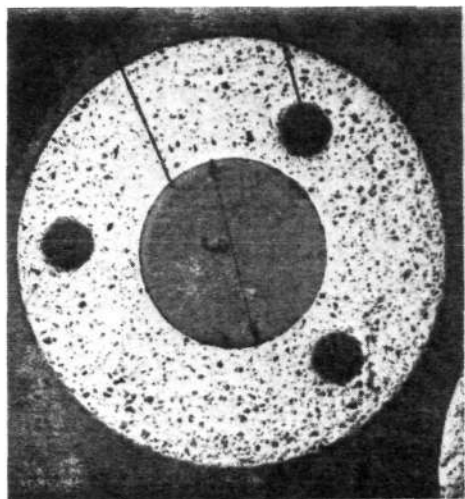


Werkstoff: KIMA-Kapillar-Bronze (schmiermittelhaltige Sinterbronze)

Zugfestigkeit	: ca. 100 N/mm <sup>2</sup>
Streckgrenze	: ca. 40 N/mm <sup>2</sup>
Dehnung (L=5d)	: ca. 1 %
Brinellhärte (10/1000/30)	: ca. 40
Quetschgrenze	: ca. 100 N/mm <sup>2</sup>
Biegefestigkeit	: ca. 180 N/mm <sup>2</sup>
Dauerbiegefestigkeit	: ca. +5 N/mm <sup>2</sup>

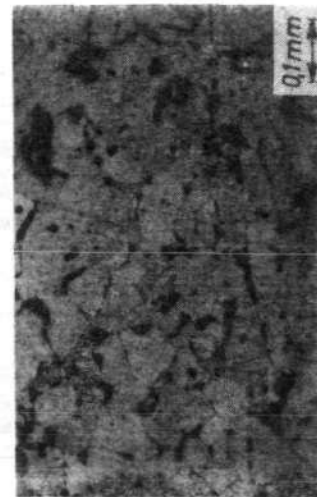
(Eigenschaften abhängig vom Porositätsgrad, Porengröße und Legierungszusammensetzung)

Bild 2: Fertigungszeichnungen der Zapfen der Kontaktrolle aus Nitrierstahl (oben) und der Lager aus Kapillar-Bronze (unten)



Verschleiss  
Versuch  
 $\Delta D = 1,05\text{mm}$   
Härte  
53-55 HB2,5/  
62,5/30

Verschleiss  
Bahnbetrieb  
 $\Delta D = 1,3\text{mm}$   
Verdreh-  
sicherung



Kapillare  
Gefüge

Verschleiss  
Versuch  
 $\Delta D = 0,03\text{mm}$   
-Härte  
51-52 HB2,5/  
62,5/30



Gefüge  
-Kapillare

Bild 3: Querschliff durch Schadenslager und Lager aus Versuch (beide KIMA-Kapillarbronze)

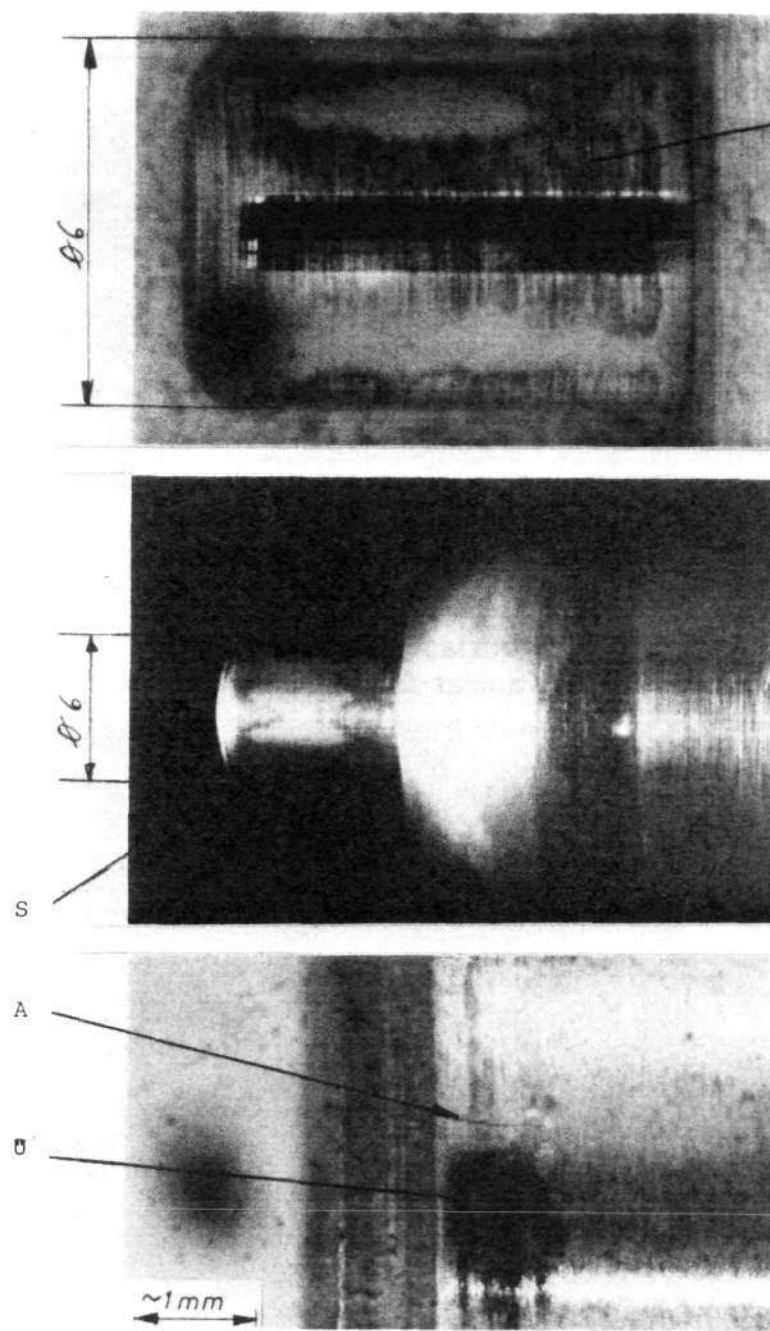
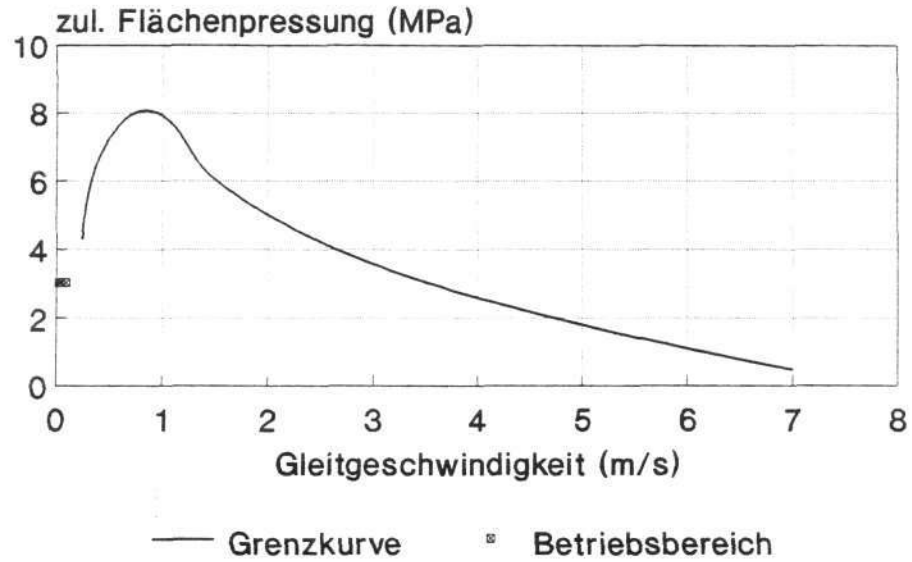
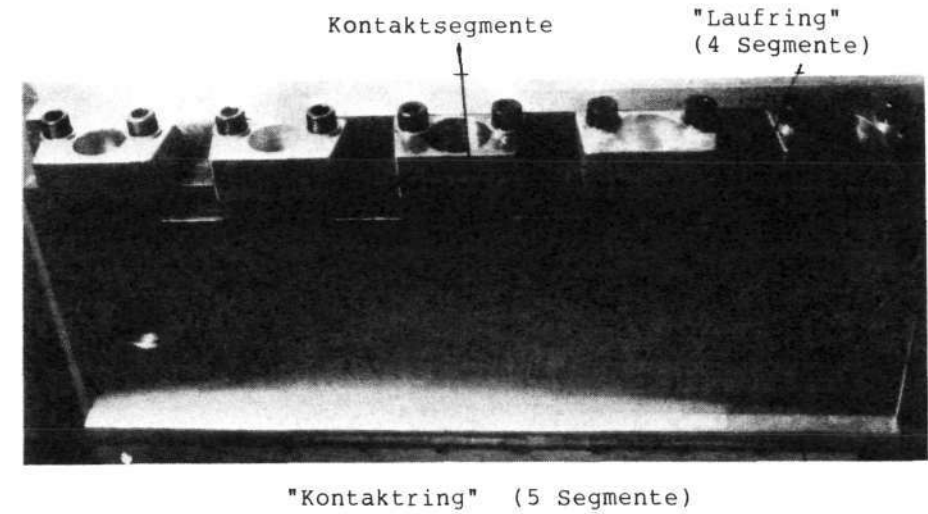


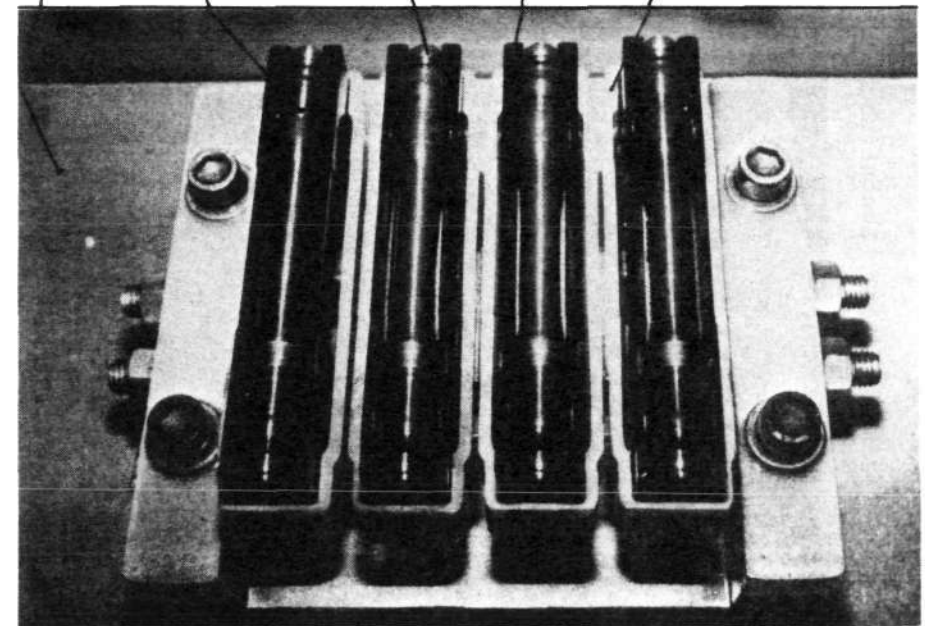
Bild 4: Anriss (A) und Spuren vom Stromübergang (S) am Lagerzapfen ( $\varnothing 6$ ) einer Schadenskontaktrolle



**Bild 5:** Grenzlast-Diagramm für  
KIMA-Kapillar-Bronze-Lager



Kontaktrolle    Lager    Kasten    Kontaktrollen-  
Cu-Abrieb    gehäuse



**Bild 6:** Versuchsaufbau für Lagerprüfung mit 4 Kontaktrollen

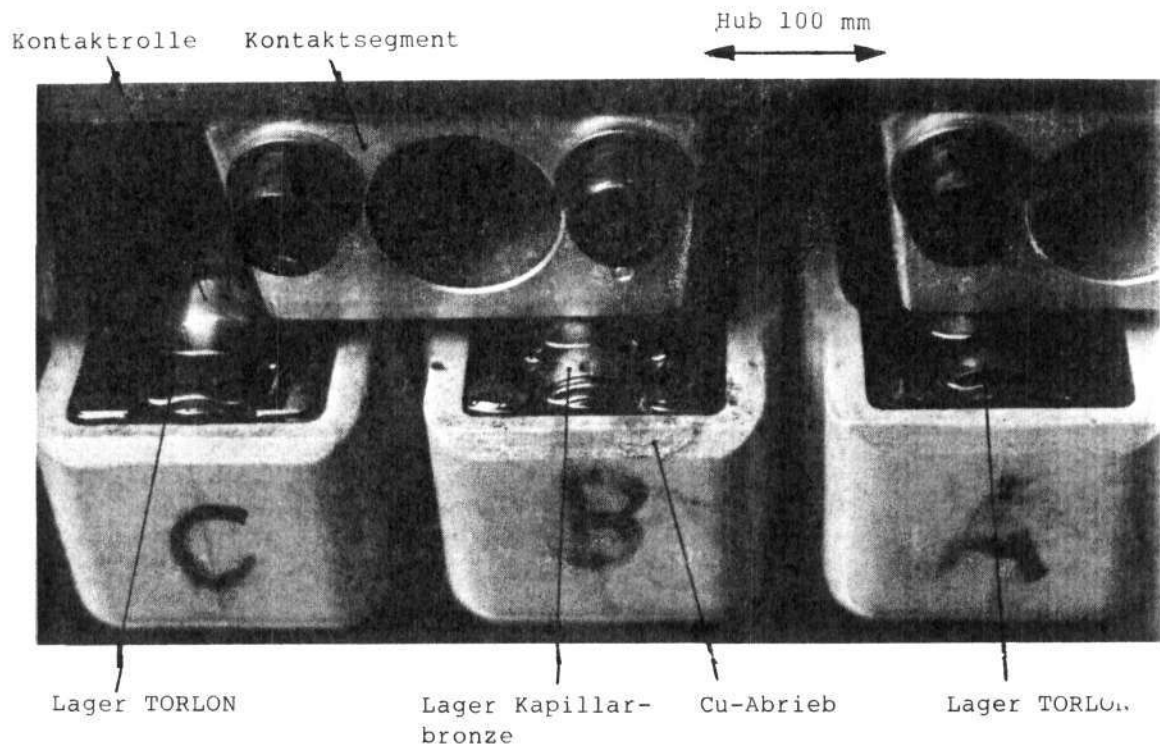


Bild 7: Prüfaufbau, Detailansicht Kontakttrolle-Kontaktsegment

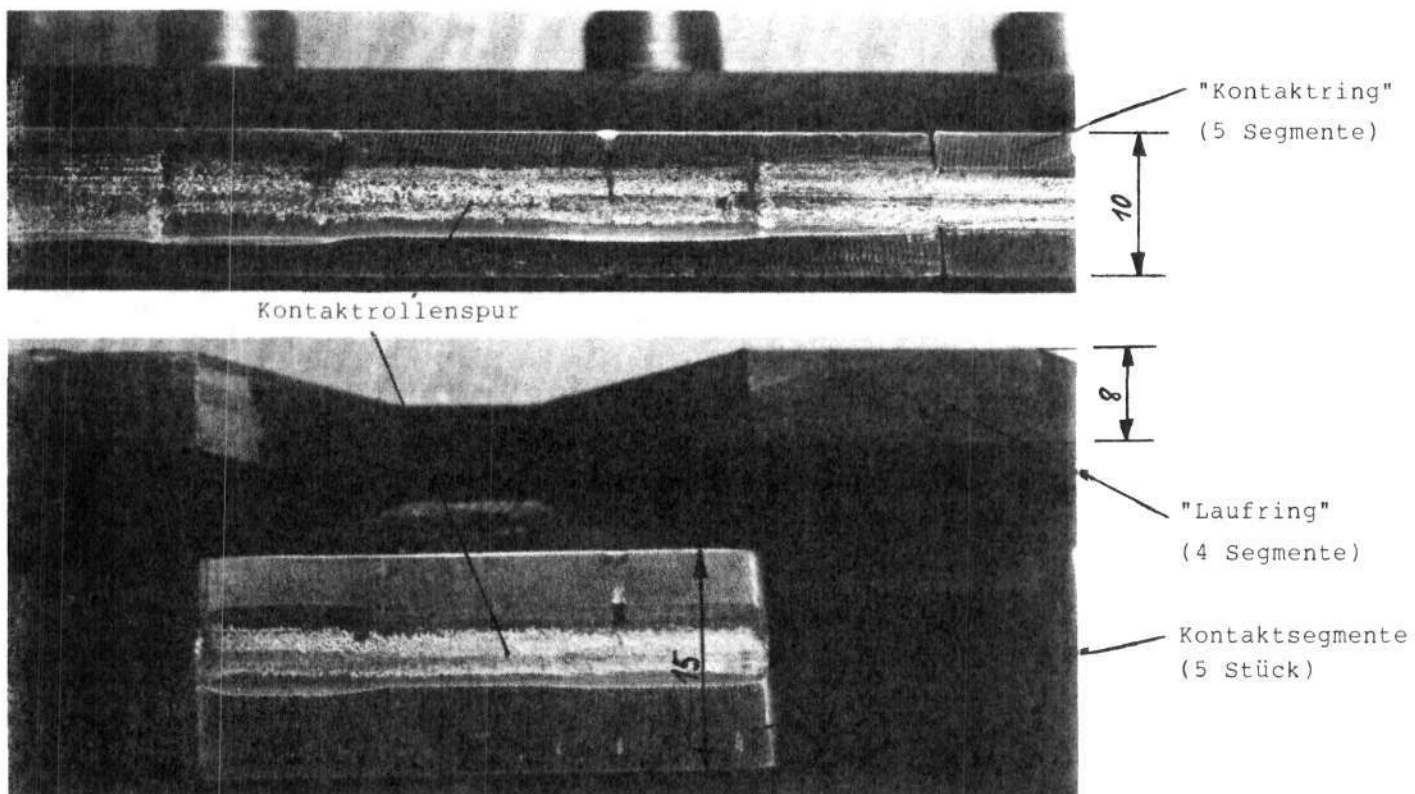


Bild 8: Verschleisspuren auf dem "Kontaktring" und einem Kontaktsegment nach dem Dauerversuch mit 8 Lagern aus Kapillarbronze



Tafel 1: Eigenschaften der Lagerwerkstoffe

\* TORLON 4301 Poly (AMID-IMID)  
mit 12% Graphitpulver und 3% PTFE

\* GLACIER DQ1 (PTFE und Blei)

Eigenschaft	Einheit	TORLON 4301	GLACIER DQ1
spez. Gewicht	g/cm <sup>3</sup>	1,45	3,4
Feuchtigkeitsaufnahme	%	0,22	0,1
Zugfestigkeit (RT)	MPa	140	7,4
Zugfestigkeit bei 150°C	MPa	75	-
Bruchdehnung (RT)	%	6	-
E-Modul (RT)	MPa	6500	-
E-Modul bei 150°C	MPa	5100	-
Biegefestigkeit (RT)	MPa	185	-
Biegefestigkeit bei 150°C	MPa	145	-
ISOD-Schlagzähigkeit (RT)	J/m	59	-
Scherfestigkeit (RT)	MPa	113	11,6
Druckfestigkeit (RT)	MPa	210	-
Druckmodul (RT)	MPa	4800	350
lin. Wärmeausdehnung	/K	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,36	-
Reibungskoeffizient ( $p \cdot v < 0,7 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ )	-	0,13-0,25	-
spez. elektr. Widerstand	$\Omega \cdot \text{m}$	$8 \cdot 10^{13}$	0,14