

ISSN 0938-5553
ISBN 3-89429-211-3

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Forschungsbericht 186

**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen
an Gleitpaarungen aus ingenieurkeramischen
Werkstoffen in wässrigen Lösungen**

von Bernd Löffelbein, Dr.-Ing. Mathias Woydt
und Prof. Dr. Karl-Heinz Habig

Berlin 1992

86 Seiten, 54 Abbildungen, 7 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 8112029

Copyright © 1992 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 101110, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Danksagung

Die Verfasser danken Herrn Dipl.-Ing. N. Kelling für die Hilfe bei der Durchführung und Auswertung der Versuche, Herrn Ing. M. Gienau für die Anfertigung der Probenhalterungen, Frau S. Binkowski und Frau R. Pahl für die vielen metallografischen und fotografischen Arbeiten, Herrn Dipl.-Ing. J. Schwenzien für die zahlreichen Tastschnittmessungen, Herrn W. Hoffmann für die Herstellung der wäßrigen Lösungen, Frau B. Strauß und Herrn R. Müller für die REM-Aufnahmen, Herrn D. Treu und Herrn Prof. X. Yu für die ESCA-Untersuchungen, Herrn Ing. D. Schmidt für die AES-Untersuchungen und Herrn Ing. D. Meyer für die Messungen mit der Elektronenstrahlmikrosonde.

Ferner sei den Firmen Feldmühle AG, Hoechst CeramTec AG, Elektroschmelzwerk Kempten GmbH und Schunk Kohlenstofftechnik GmbH für die Bereitstellung der Probekörper gedankt.

Zusammenfassung

Neben einer Literaturübersicht zum tribologischen Verhalten ingenieurkeramischer Werkstoffe in wässrigen Zwischenstoffen bzw. feuchter Umgebung werden im vorliegenden Bericht Ergebnisse zum Reibungs- und Verschleißverhalten von sechs kommerziellen keramischen Werkstoffen vorgestellt. Artgleiche SSi_3N_4 -, HIP-RBSi₃N₄-, SSiC-, SiSiC-, MgO-ZrO₂- und Al₂O₃-Gleitpaarungen wurden in einem Stift-Scheibe-Tribometer unter Mischreibungsbedingungen getestet. Wasser und wässrige Lösungen verschiedener Säuren und Laugen dienten als Zwischenstoffe bzw. -medien. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur, mit einer Normalkraft von 22 N, einer Gleitgeschwindigkeit von 0,1 m/s und über einen Gleitweg von 2000 m durchgeführt.

Im Vergleich zu Festkörpergleitreibung resultierte unter Mischreibungsbedingungen in Wasser und wässrigen Lösungen für alle untersuchten Gleitpaarungen eine Reibungsminderung. Aufgrund tribochemischer Reaktionen und geglätteter Reibflächen sinken die Reibungszahlen für SSiC-Gleitpaarungen unter 0,1. Unabhängig vom Zwischenstoff liegen die Verschleißkoeffizienten von SSiC zwischen 10^{-7} und 10^{-6} mm³/Nm. Tribochemische Reaktionsschichten sowie deren Stabilität beeinflussen das Reibungs- und Verschleißverhalten der Si₃N₄-Werkstoffe. Stabile Schichten haben niedrige Reibungszahlen unter 0,1 sowie Verschleißkoeffizienten unter 10^{-7} mm³/Nm zur Folge. Die niedrigsten Verschleißkoeffizienten wurden für Al₂O₃-Gleitpaarungen bei Festkörperreibung und in Wasser mit Werten unter 10^{-8} mm³/Nm gemessen. In Säuren und Laugen kann die Erhöhung der Verschleißkoeffizienten auf Werte über 10^{-7} mm³/Nm auf Spannungsrißkorrosion zurückgeführt werden.

Summary

In this report an overview of the influence of water and environmental humidity on the tribological behaviour of engineering ceramics, and results of friction and wear tests with six commercial ceramic materials are presented. The friction and wear behaviour of self-mated couples of SSi_3N_4 , HIP-RBSi₃N₄, SSiC, SiSiC, MgO-ZrO₂ and Al₂O₃ was studied under mixed lubrication in a pin-on-disc-tribometer. Water and aqueous solutions of acids and alkalines were used as lubricants. The tests were carried out at room temperature with a normal force of 22 N, a sliding speed of 0.1 m/s and over a sliding distance of 2000 m.

In comparison to dry sliding tests, a friction reduction occurred in water and aqueous solutions for all sliding couples tested. Due to tribochemical reactions and surface polishing the friction coefficients of SSiC decreased under 0.1, inde-

pendent of the ambient medium. SiC showed a low wear; with wear coefficients between 10^{-7} and 10^{-6} mm^3/Nm in all solutions. Tribochemical reaction layers and its stability influence the friction and wear behaviour of Si_3N_4 . Stable layers cause low friction coefficients under 0.1 and wear coefficients lower than 10^{-7} mm^3/Nm . For Al_2O_3 sliding couples wear coefficients under 10^{-8} mm^3/Nm were measured for dry sliding and in water. Caused by stress corrosion cracking the wear coefficient increased over 10^{-7} mm^3/Nm in acids and alkalines.

Schlagworte

Keramik - Siliziumnitrid - Siliziumcarbid - Zirkonoxid - Aluminiumoxid - chemische Anlagen - Düsen - Ventilkomponenten - Gleitringdichtungen - Reibung - Verschleiß - Mischreibung - aggressive Medien - Mediensmierung - Wasserschmierung - Adhäsion - Abrasion - Tribochemie - Spannungsrißkorrosion - REM - ESMA - ESCA - Blitztemperaturen

<u>Inhalt</u>	<u>Seite:</u>
1. Einleitung	9
2. Aufgabenstellung	10
3. Theoretische Grundlagen und Literaturübersicht	11
3.1 Theoretische Grundlagen	11
3.1.1 Reibungszustände	11
3.1.2 Verschleißmechanismen	12
3.1.3 Gleichungen	15
3.2 Literaturübersicht	16
3.2.1 Einflüsse der Umgebung auf Reibung und Verschleiß von Keramik/Keramik-Gleitpaarungen	17
3.2.1.1 Bildung von Adsorptionsschichten	19
3.2.1.2 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Adsorptionsschichten	19
3.2.1.3 Tribochemische Reaktionen	23
3.2.2 Korrosionsverhalten keramischer Werkstoffe unter tribologischer Beanspruchung	29
4. Experimentelles	31
4.1 Versuchsaufbau und -durchführung	31
4.2 Versuchsbedingungen	33
4.3 Probekörper	33
4.4 Werkstoffe	34
4.4.1 Chemische Zusammensetzung und Gefüge	35
4.5 Zwischenstoffe	39
4.6 Untersuchungsmethoden	39
4.6.1 Rauheitsmessungen	39
4.6.2 Nachuntersuchungen der Probekörper	39
4.6.2.1 Berechnung der Verschleißvolumina von Grund- und Gegenkörper	39
5. Ergebnisse	41
5.1 Reibung	41
5.1.1 SSi_3N_4 und HIP-RBSi ₃ N ₄	41
5.1.2 SSiC	43
5.1.3 SiSiC	44
5.1.4 MgO-ZrO ₂	44

5.1.5	Al ₂ O ₃	45
5.2	Verschleiß	46
5.2.1	SSi ₃ N ₄ und HIP-RBSi ₃ N ₄	46
5.2.2	SSiC	48
5.2.3	SiSiC	49
5.2.4	MgO-ZrO ₂	50
5.2.5	Al ₂ O ₃	51
5.3	Verschleißerscheinungsformen	53
5.3.1	Morphologie der Verschleißflächen von Si ₃ N ₄ - Gleitpaarungen	53
5.3.2	Morphologie der Verschleißflächen von SSiC- Gleitpaarungen	53
5.3.3	Morphologie der Verschleißflächen von SiSiC- Gleitpaarungen	53
5.3.4	Morphologie der Verschleißflächen von MgO-ZrO ₂ - Gleitpaarungen	53
5.3.5	Morphologie der Verschleißflächen von Al ₂ O ₃ - Gleitpaarungen	55
5.4	Oberflächenanalytische Untersuchungen	56
5.4.1	Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES)	56
5.4.2	Elektronenstrahl-Mikroanalyse (ESMA)	57
5.4.3	Elektronenspektroskopie zur chemischen Analyse (ESCA)	60
5.5	Abschätzung von Blitztemperaturen	62
6.	Diskussion	65
6.1	SSi ₃ N ₄ und HIP-RBSi ₃ N ₄	65
6.2	SSiC	66
6.3	SiSiC	67
6.4	MgO-ZrO ₂	67
6.5	Al ₂ O ₃	67
7.	Zusammenfassung	69
8.	Literatur	70
9.	Anhang	80

1. Einleitung

Keramische Werkstoffe werden bevorzugt dann eingesetzt, wenn komplexe korrosive, tribologische und thermische Beanspruchungen auftreten, bei denen traditionelle Werkstoffe versagen. Es bieten sich besonders moderne ingenieurkeramische Werkstoffe wie Siliziumnitrid (Si_3N_4), Siliziumcarbid (SiC , SiSiC), Zirkonoxid (ZrO_2) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) an /1/.

Neben Anwendungen für chemisch und tribologisch beanspruchte Düsen, Ventilkomponenten und Gleitringdichtungen /2,3/, kommen ingenieurkeramische Werkstoffe insbesondere als Wälzlagerwerkstoff in Betracht. Bei den zwangsläufig auftretenden Gleitanteilen soll der Energieumsatz im Lager oder auch bei der Gleitbewegung in der Dichtung möglichst gering gehalten werden. Diesem idealen reibungsarmen Lager kommt man am nächsten, wenn Festkörperkontakte durch flüssige oder gasförmige Zwischenmedien verhindert werden. Solange eine ausreichende Schmierfilmdicke gewährleistet ist, haben die verwendeten Werkstoffe eine untergeordnete Bedeutung. Kommt es jedoch zu Mangelschmierzuständen und somit zu Festkörperkontakt, ist das Versagen der bisher meistens verwendeten metallischen Lagerkomponenten durch das gefürchtete "Fressen" vorprogrammiert. Zum Auftreten von Mangelschmierzuständen kommt es oft durch erhöhte Betriebstemperaturen, die dafür verantwortlich sind, daß herkömmliche Schmierstoffe durch Viskositätsabnahme versagen oder durch andere Medien mit schlechten Schmiereigenschaften verdrängt werden. Es ist naheliegend, die mit den entsprechenden Bauteilen in Kontakt tretenden, meist aggressiven Medien (Säuren und Laugen), direkt als Schmiermittel zu nutzen. Wegen der mangelnden Korrosionsbeständigkeit metallischer Werkstoffe, die im Falle von Lagerkomponenten eine aufwendige Abdichtung notwendig macht, bieten sich dem Konstrukteur Ingenieurkeramiken für eine Mediensmierung geradezu an.

Neben der guten chemischen Beständigkeit weisen keramische Werkstoffe weitere Vorteile gegenüber Metallen auf. Für den Einsatz von Si_3N_4 als Wälzlagerwerkstoff sind die geringe Dichte, die geringe Wärmeausdehnung, die hohe Härte (Widerstand gegen Abrasivverschleiß) und Warmfestigkeit, die gute Formstabilität auch bei extrem hohen Temperaturen, der hohe Elastizitätsmodul und der fehlende Magnetismus von großer Bedeutung /2-8/.

Infolge der einphasigen, homogenen Werkstoffqualität gibt es beim gesinterten SiC keine selektiven Korrosionsvorgänge, auch nicht an den Korngrenzen. Hinzu kommt ein hoher Verschleißwiderstand, demzufolge gesintertes SiC der geeignete Werkstoff für Gleitringdichtungen und Gleitlager ist. Pumpen, die aggressive Medien fördern, sind dafür ein Anwendungsbeispiel, wobei die entsprechenden Bauteile durch das Fördermedium mediengeschmiert werden können /2,9,10/.

Bei den Oxidkeramiken werden im Maschinenbau hauptsächlich nur zwei Basissysteme eingesetzt. Dies sind Al_2O_3 und ZrO_2 . Bei Al_2O_3 -Keramiken ist die chemische Beständigkeit bei hohen Al_2O_3 -Gehalten ausgeprägter als bei geringeren. Qualitäten mit 98,0 - 99,8% Al_2O_3 -Gehalt werden in Messgeräten und Ventilen /11/, als Schutzrohre für Funktionsteile (z.B. Thermoelemente) /12/ und für Gleitringdichtungen verwendet /3/.

Ähnliche Anwendungsmöglichkeiten gelten für ZrO_2 -Keramiken, die als hochfeste und hochzähe Werkstoffe nur in teilstabilisierter oder 100% tetragonaler Form für Verschleißbeanspruchungen von Bedeutung sind. Das vollstabilisierte, kubische ZrO_2 weist demgegenüber eine zu geringe Festigkeit und Bruchzähigkeit auf /1,13/.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das tribologische Verhalten von keramischen Werkstoffen in wäßrigen Zwischenstoffen bzw. -medien beschrieben.

2. Aufgabenstellung

Die Beanspruchungsbedingungen sollen so gewählt werden, daß der Mischreibungszustand gewährleistet ist. Bei Ausbildung eines hydrodynamischen Schmierfilms wäre der Werkstoffeinfluß weitgehend ausgeschlossen.

Bei Raumtemperatur sollen artgleiche Gleitpaarungen von sechs kommerziellen keramischen Werkstoffen in Wasser sowie verschiedenen Säuren und Laugen untersucht werden. Eine Variation der Beanspruchungsbedingungen, bei denen auch vergleichende Festkörpergleitreibungsversuche durchgeführt werden sollen, ist nicht vorgesehen. Ausnahme ist die geometrische Flächenpressung, die bei der hier verwendeten Geometrie durch verschleißbedingte Zunahme der Kontaktfläche abnimmt.

Punktuell sollen zur Aufklärung der Verschleißmechanismen geeignete Oberflächenanalysemethoden angewandt werden.

3. Theoretische Grundlagen und Literaturübersicht

Es wird kurz auf allgemeine tribologische Grundlagen eingegangen. Die Literaturübersicht beschränkt sich im wesentlichen auf die Darstellung der bei Mischreibung vorherrschenden Verschleißmechanismen. Zusätzlich werden einige Meßergebnisse vorgestellt.

3.1 Theoretische Grundlagen

In der Tribologie ergeben sich Reibung und Verschleiß von Werkstoffpaarungen durch Wechselwirkungen aller am Verschleißvorgang beteiligten Partner. Dieser komplexe Sachverhalt läßt sich am besten mit der Systemanalyse beschreiben /14-16/. Für ein tribologisches System ist dies in Abb. 1 getan.

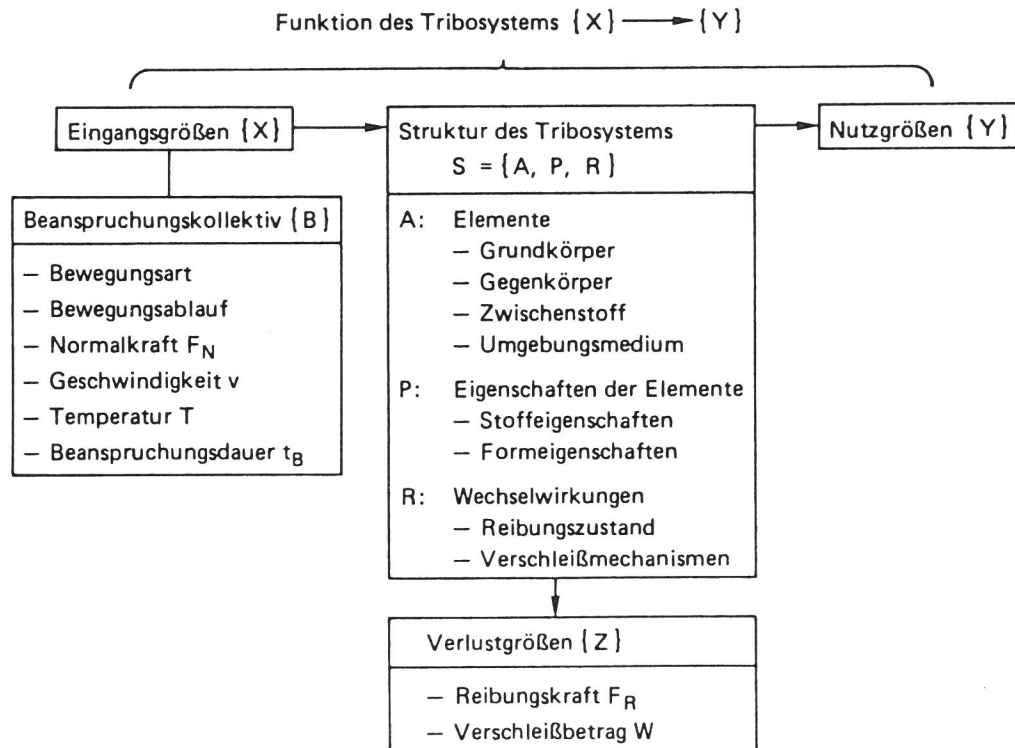


Abb. 1

Analyse eines tribologischen Systems /17/

Neben den Elementen und ihren Eigenschaften bestimmen die Wechselwirkungen zwischen den Elementen maßgeblich die Struktur des Tribosystems. Sie werden im folgenden kurz erläutert.

3.1.1 Reibungszustände

Bei Anwendung eines flüssigen Schmierstoffes können die Reibungszustände durch die Stribeck-Kurve gekennzeichnet werden (s. Abb. 2). Sie zeigt an, wie die Reibungszahl von einer Kombination von Größen abhängt, die vor allem durch die Visko-

sität des Schmierstoffes, die Normalkraft und die Gleitgeschwindigkeit gegeben ist /16/.

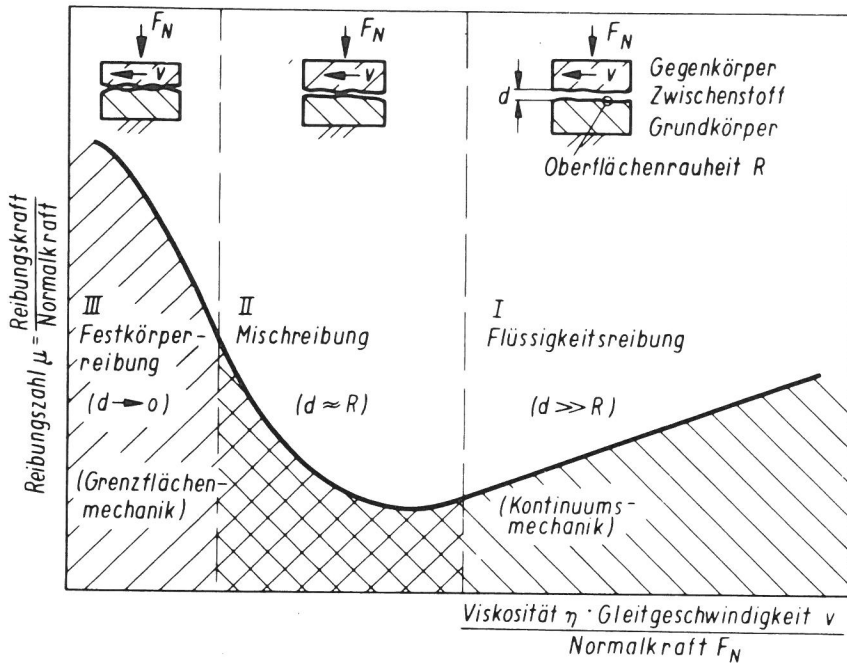


Abb. 2
Stribeck-Kurve /16/

3.1.2 Verschleißmechanismen

Die den Verschleiß verursachenden Wechselwirkungen werden als Verschleißmechanismen bezeichnet. Die hauptsächlich wirksamen Verschleißmechanismen sind in Abb. 3 dargestellt. Mit Hinblick auf keramische Werkstoffe werden sie kurz erläutert.

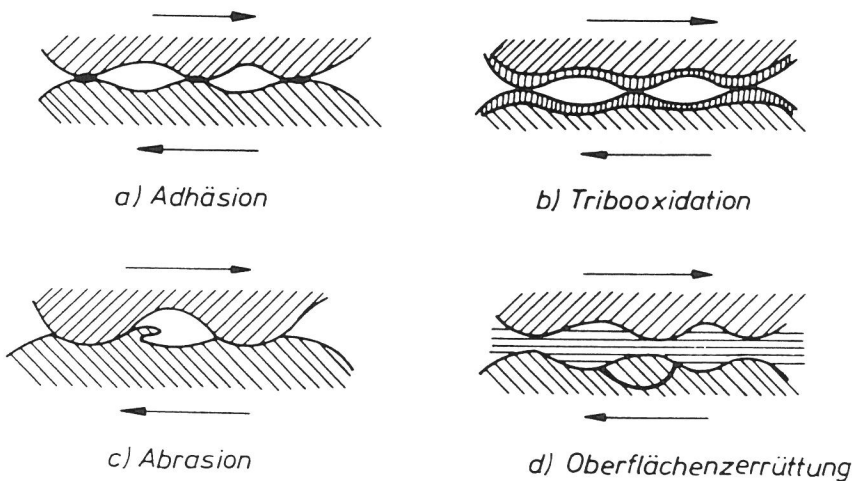


Abb. 3
Schematische Darstellung der wichtigsten Verschleißmechanismen /17/

- **Adhäsion:** Bildung und Trennung von atomaren Bindungen (Mikroverschweißungen) zwischen Grund- und Gegenkörper /17/.

Die Adhäsionsneigung zwischen Keramikoberflächen ist aufgrund des ionischen bzw. kovalenten Bindungstyps in keramischen Werkstoffen bei Raumtemperatur nur schwach. Die Aktivierungsenergie für das Verschweißen der Oberflächen ist bei diesen Bindungstypen wesentlich größer als für metallische Bindungen. Durch die hohen Härten keramischer Werk-

stoffe ist die wahre Kontaktfläche klein und damit die Adhäsion gering. Anders sieht es aus, wenn der Werkstoff bzw. die zuvor tribochemisch gebildete Oberflächenschichten erweichen oder schmelzen. Die wahre Kontaktfläche nimmt zu, wodurch Materialüberträge und Verschleißpartikeladhäsion möglich werden /5,18-20/. Eine gleichmäßige Verschleißpartikelschicht kann als Schutzschicht wirken, indem sie Kontaktspannungen und somit den Verschleiß senkt /21/.

- Tribooxidation: Chemische Reaktion von Grund- und/oder Gegenkörper mit Bestandteilen des Zwischenstoffes oder Umgebungsmediums infolge einer reibbedingten Aktivierung /17/.

Tribochemische Reaktionen beeinflussen das tribologische Verhalten keramischer Werkstoffe wesentlich, sowohl unter Trockenreibung wie auch unter geschmierten Bedingungen. Die Tribochemie in wäßrigen Medien wird detailliert in Kap. 3.2.1.3 besprochen.

- Abrasion: Ritzung und Mikrozerspannung des Grundkörpers durch harte Rauheitshügel des Gegenkörpers oder durch Verschleißpartikel im Zwischenstoff /17/.

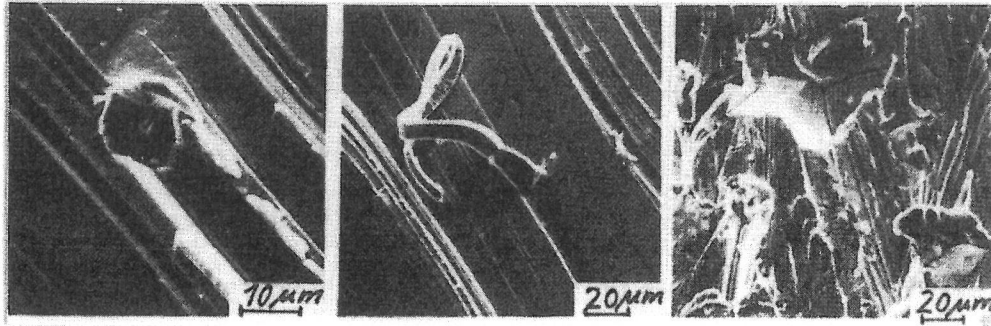
Die Vorgänge bei abrasivem Verschleiß lassen sich nach K.-H. Zum Gahr /22/ in Mikropflügen, Mikrospanen und Mikrobrechen unterteilen (s. Abb. 4).

Ideales Mikropflügen führt durch Einwirkung eines einzelnen abrasiven Teilchens nur zu plastischer Verformung und nicht zu einem Werkstoffabtrag. Dieser Vorgang tritt bei keramischen Werkstoffen nur bei hohen Temperaturen oder hohen Kontaktspannungen auf. Der sich beim Mikrospanen bildende Span hat im Idealfall das gleiche Volumen wie die entstehende Furche. Dagegen ist das Volumen des durch Mikrobrechen erzeugten Verschleißteilchens etwa zehnmal größer als das der entstehenden Furche. Mikrobrechen tritt in spröden Werkstoffen im Bereich hoher Spannungskonzentrationen auf und wird durch Ribildung und -ausbreitung bestimmt. Dieser bei keramischen Werkstoffen vorherrschende Mechanismus ist durch verformungsarmes Ausbrechen größerer Verschleißpartikel gekennzeichnet /23,24/.

Ideale Oberflächen reagieren auf Punktbelastung mit elastischer Verformung der Mikrokontakte, plastischem Fließen und der Bildung von Rissen (s. Abb. 5).

Man erkennt deutlich, daß laterale Risse einen größeren Beitrag zum Verschleißvolumen liefern können als radiale Risse /25/. Bildet man aus den Beziehungen für die Verschleißvolumina bei Mikrobrechen /26/ und Mikrospanen /27/ das Verhältnis, resultiert Gleichung (1) /26/:

$$\frac{W_{V \text{ brechen}}}{W_{V \text{ spanen}}} = 11 \cdot \left(\frac{H^2 \cdot F_N}{K_{IC}^3} \right)^{1/4} \quad (1)$$



Mikropflügen

Mikrospanen

Mikrobrechen

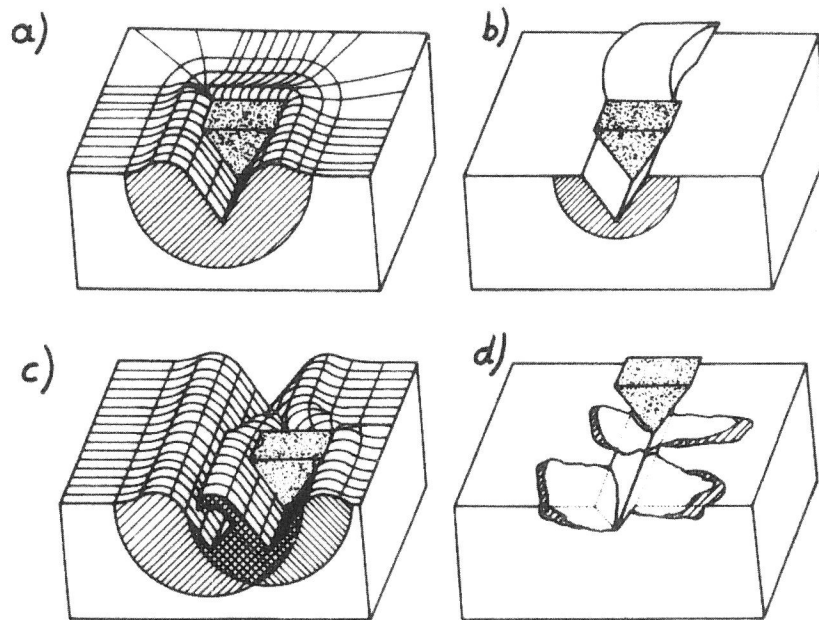


Abb. 4

Verschiedene Arten der Werkstoffbeanspruchung durch abrasive Teilchen: a) Mikropflügen, b) Mikrospanen, c) mehrmaliges Mikropflügen, d) Mikrobrechen /22/

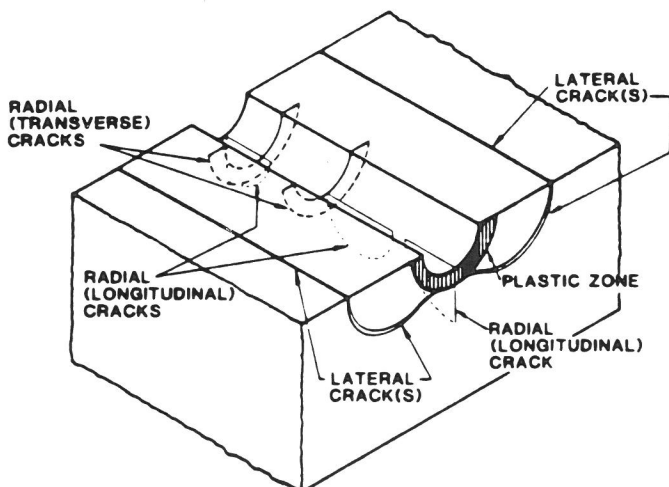


Abb. 5

Schemazeichnung der plastischen Zone und der Lage der lateralen und radialen Risse nach gleitender Beanspruchung /25/

in der H die Härte, F_N die Normalkraft und K_{IC} die Bruchzähigkeit darstellen. Aufgrund der verwendeten Werkstoffe und Kontaktgeometrie (s. Kap. 4.3 und 4.4) kann davon ausgegangen werden, daß es unter der gegebenen Gleitbeanspruchung (s. Kap. 4.2) zu elastischer Verformung der Mikrokontakte oder Mikrobrechen kommt, da aus Gleichung (1) Verhältnisse zwischen 16 ($MgO-ZrO_2$) und 48 ($SSiC$) resultieren (s. Tab. 1). Tribochemische Effekte bleiben dabei unberücksichtigt.

Material	HV 0.5 [GPa]	K_{IC} [MPa·m ^{1/2}]	$\frac{W_v \text{ brechen}}{W_v \text{ spanen}}$
SSi_3N_4	14.3	6.0	23.5
HIP-RBSi ₃ N ₄	13.6	5.6	24.1
SSiC	23.5	3.2	48.3
SiSiC	23.6	5.0	34.6
MgO-ZrO ₂	10.9	8.1	16.4
Al ₂ O ₃	15.8	3.8-5.7	34.8-25.7

Tab. 1
Abschätzung der Verhältnisse der Verschleißvolumina bei Mikrobrechen und Mikrospanen für keramische Werkstoffe

Es sei noch auf die Delaminationstheorie von N.P. Suh /28/ hingewiesen, die für metallische Werkstoffe entwickelt wurde. Demnach können sich parallel zur Oberfläche Ermüdungsrisse bilden, die sich entlang der Korngrenzen oder anderen Fehlstellen, die Gefügeschwachpunkte darstellen, ausbreiten.

- Oberflächenzerrüttung: Rißbildung und Rißwachstum bis zum Abtrennen von Partikeln infolge wechselnder mechanischer Spannungen, die in den Oberflächenbereichen von Grund- und Gegenkörper wirksam sind /17/.

Insbesondere der Gleitpartner mit einem kleinen Eingriffsverhältnis ist zyklischen mechanischen und thermischen Beanspruchungen unter Festkörperreibungsbedingungen ausgesetzt. Die Temperaturerhöhung in den Mikrokontakten führt infolge von Dehnungen zu zusätzlichen Spannungen /23,29,30/.

3.1.3 Gleichungen

Aus den Verlustgrößen des Tribosystems (Reibungskraft F_R und Verschleißbetrag W , s. Abb. 1) lassen sich die folgenden tribologischen Kenngrößen ableiten:

- Reibungszahl: $f = F_R / F_N$ (2)

F_R : Reibungskraft [N]

F_N : Normalkraft [N]

- volumetrischer

$$\text{Verschleißkoeffizient: } k_v = W_v / (F_N \cdot s) \text{ [mm}^3/\text{Nm]} \quad (3)$$

W_v : Verschleißvolumen [mm³]

s : Gleitweg [m]

- differentieller

$$\text{Verschleißkoeffizient: } k_{v, \text{diff}} = \Delta W_v / (F_N \cdot \Delta s) \text{ [mm}^3/\text{Nm]} \quad (4)$$

3.2 Literaturübersicht

Die Umgebungseinflüsse (Luftfeuchtigkeit, Wasser) auf das tribologische Verhalten diverser Werkstoffe werden in einer Literaturrecherche von J.K. Lancaster /31/ zusammengefaßt. Tab. 2 zeigt einige Beispiele der Auswirkungen von Wasser und steigender Luftfeuchte auf Reibung und Verschleiß von Keramik-Gleitpaarungen. Es fällt auf, daß bei den Oxidkeramiken (Al₂O₃, ZrO₂) das tribologische Verhalten sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden kann, wobei zwei konkurrierende Prozesse für dieses Verhalten verantwortlich gemacht werden. Einerseits können tribochemisch gebildete Reaktionsschichten reibungs- und verschleißmindernd wirken, andererseits führt beschleunigtes Rißwachstum, das durch Spannungsrißkorrosion hervorgerufen wird, zu einer Verschlechterung des tribologischen Verhaltens. Die angegebenen Referenzen (102)-(111) entsprechen den Zitatstellen /32-41/ in dieser Arbeit.

Combination	Experimental configuration	Environment	Effect of water on		Ref
			friction	wear rate	
Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	Pin/disc	Varying rh	Decrease	Decrease	(102)
	Ball/disc	"	Increase	Increase	(103)
	4-ball	Water	Decrease	Decrease	(104)
	Pin/disc	"	—	Increase	(105)
Si ₃ N ₄ /Si ₃ N ₄	Pin/disc	Varying rh	Decrease	Decrease	(102)
	Pin/disc	" ,water	"	"	(106)
SiC/SiC	Pin/disc	Varying rh	Decrease	Decrease	(102)
	Fretting	"	"	"	(107)
ZrO ₂ /ZrO ₂	Pin/disc	Varying rh	Increase	Increase	(108)
	Fretting	"	Unchanged	Decrease	(109)
	Pin/plate	Water	Increase	Increase	(110)
	Pin/ring	"	Decrease	Increase	(111)

Tab. 2

Einflüsse von Wasser und steigender Luftfeuchtigkeit auf Reibung und Verschleiß von artgleichen Keramik-Gleitpaarungen /31/

Im folgenden werden die Einflüsse von wäßrigen Zwischenstoffen bzw. feuchter Umgebung auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von artgleichen Keramik-Gleitpaarungen bei Raumtemperatur genauer betrachtet. Auf das Korrosionsverhalten keramischer

Werkstoffe in Verbindung mit tribologischer Beanspruchung wird abschließend kurz eingegangen.

Ergebnisse von Festkörpergleitreibungsversuchen, insbesondere die dabei auftretenden Verschleißmechanismen (s. Kap. 3.1.2), werden an anderen Stellen ausführlicher besprochen /20,23,24,42-48/. Auch die Anwendung organischer Schmierstoffe /42,43,49-54/ bzw. von Festschmierstoffen /55-59/ für keramische Gleitpaarungen werden hier nicht genauer betrachtet.

3.2.1 Einflüsse der Umgebung auf Reibung und Verschleiß von Keramik/Keramik-Gleitpaarungen

Nach S. Sasaki /32,60/ können mögliche Einflüsse der Umgebung auf das tribologische Verhalten keramischer Werkstoffe folgendermaßen zusammengefaßt werden (s. Abb. 6):

- (1) Bildung von Adsorptionsschichten
- (2) Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Adsorptionsschichten
- (3) Tribochemische Reaktionen

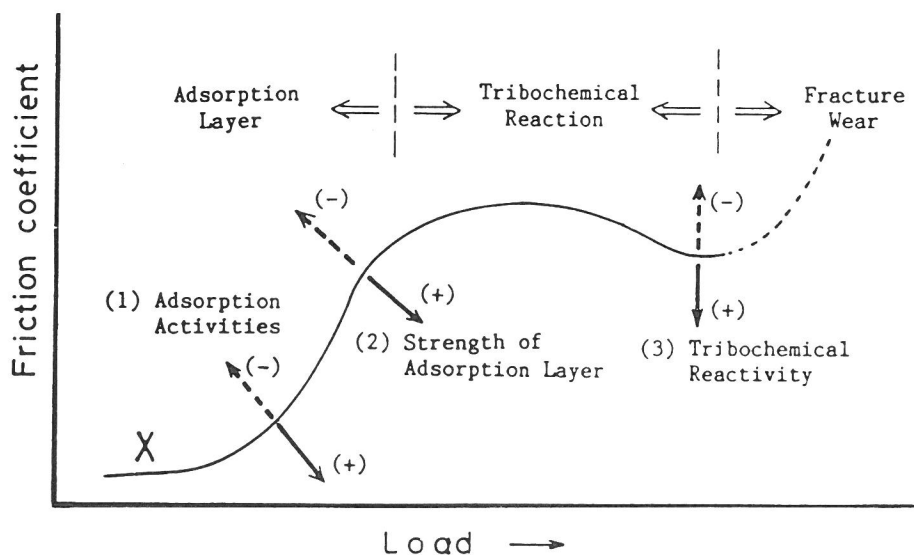


Abb. 6

Einfluß der atmosphärischen Effekte auf das Reibungsverhalten von Aluminiumoxid bei Schmierung mit Wasser und verschiedenen organischen Verbindungen /60/

Die Einflüsse der atmosphärischen Effekte auf das Reibungsverhalten eines hochreinen Aluminiumoxides (99,9% Al_2O_3 -Gehalt) bei Schmierung mit Wasser und verschiedenen organischen Verbindungen standen bei neueren Untersuchungen von S. Sasaki /60/ im Mittelpunkt. In Abb. 6 wird dies graphisch dargestellt. Die Änderung des Kurvenverlaufes in Abhängigkeit von

den möglichen Effekten (1)-(3) ist durch die eingezeichneten Pfeile gekennzeichnet.

Bevor in den nachfolgenden Kapiteln die atmosphärisch bedingten Effekte genauer beschrieben werden, sollen einige experimentelle Ergebnisse vorangestellt werden, die einen Vergleich des tribologischen Verhaltens verschiedener Keramik-Gleitpaarungen ermöglichen.

Das tribologische Verhalten von Al_2O_3 , MgO-ZrO_2 (PSZ), SiC und Si_3N_4 wurde von S. Sasaki /32,61/ in unterschiedlichen Umgebungsatmosphären untersucht. Verwendet wurde eine Stift-Scheibe-Anordnung. Die Versuche in Wasser liefen unter 50 N Normalkraft, mit einer Gleitgeschwindigkeit von 0,4 m/s und über einen Laufweg von 1256 m. Die Verschleißraten und Reibungszahlen sind über der Gleitgeschwindigkeit in Abb. 7 aufgetragen. Auffällig ist das ungünstige Verhalten von MgO-ZrO_2 . Eine starke Erhöhung der Verschleißraten mit steigender Gleitgeschwindigkeit sowie Reibungszahlen um 0,5 über den gesamten Gleitgeschwindigkeitsbereich sind zu erkennen. Positiv fallen die niedrigen Verschleißraten von Al_2O_3 und die teilweise unter 0,1 liegenden Reibungszahlen von SiC - und Si_3N_4 -Gleitpaarungen auf.

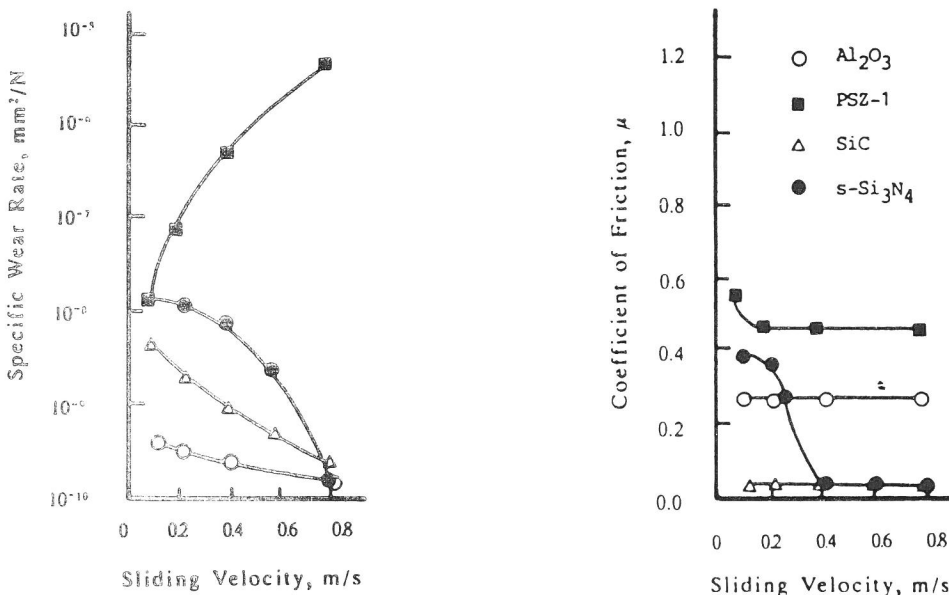


Abb. 7

Reibungs- und Verschleißverhalten verschiedener Keramik-Gleitpaarungen als Funktion der Gleitgeschwindigkeit in Wasser (50 N, 1256 m) /32/

Im Rahmen einer umfassenden Arbeit haben P. Salonen et al. /62/ öl- und wassergeschmierte Versuche mit Ingenieurkeramiken durchgeführt. Die Gleitpaarungen liefen in einem Stift-Scheibe-Tribometer ($F_N = 10$ N, $v = 0,1$ m/s, $s = 2500$ m). Hochreines Al_2O_3 (A999), Al_2O_3 mit 20% $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (ZTA), MgO-ZrO_2 (PSZ), SiC und SiAlON wurden untersucht. Die Verschleißkoeffizienten von stationärem (pin) und rotierendem

Probekörper (disc) sowie Reibungszahlverläufe der artgleichen, unter Wasser gelaufenen Gleitpaarungen zeigt Abb. 8.

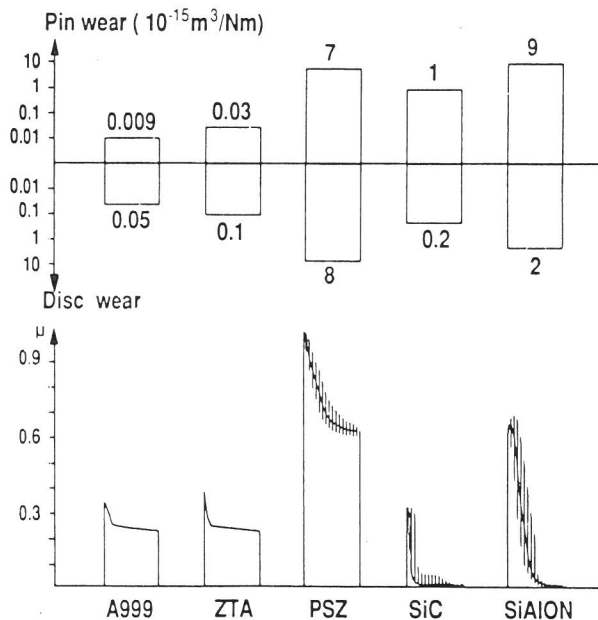


Abb. 8

Verschleißkoeffizienten von Grund- und Gegenkörper sowie Reibungszahlverläufe für artgleiche Keramikgleitpaarungen unter Wasserschmierung (10 N, 0,1 m/s, 2500 m) /62/

In Anbetracht dieser Ergebnisse fällt auf, daß bei den Nicht-Oxidkeramiken (SiC, SiAlON) nach einer erhöhten Einlaufreibung die Reibungszahl stark abfällt. Ferner sei auf die niedrigen Verschleißraten der Al₂O₃-Paarungen hingewiesen. Schlechte Eigenschaften bezüglich des Reibungs- und Verschleißverhaltens von MgO-ZrO₂ sind ebenfalls aus den Diagrammen von P. Salonen et al. /62/ abzulesen.

In den folgenden Kapiteln werden an den entsprechenden Stellen Hinweise auf Abb. 7+8 gegeben.

3.2.1.1 Bildung von Adsorptionsschichten

Gleitreibungsversuche von S. Sasaki /32/ zeigen, daß die Reibung bei verschiedenen Keramik-Paarungen durch eine Schicht aus adsorbierten Molekülen reduziert wird. Beobachtet wurde dies in N₂- und O₂-Atmosphären im Dampfdruckbereich von 10⁻³ bis 10³ Pa. Voraussetzung dafür sind kleine Gleitgeschwindigkeiten und die daraus resultierende geringe Reibungswärme, die ansonsten die Desorption der adsorbierten Moleküle beschleunigen würde /26/. Im Vakuum (<10⁻³ Pa) sorgt die adhäsive Wirkung freier Oberflächenvalenzen für höhere Reibungszahlen /32/.

3.2.1.2 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Adsorptionsschichten

Die Adsorption polarer Moleküle (z.B. H₂O) auf SiO₂-, Al₂O₃- und ZrO₂-Oberflächen verursacht Spannungsrißkorrosion /63-65/. Schematisch ist dieser Vorgang für Wasser in Abb. 9 dargestellt.

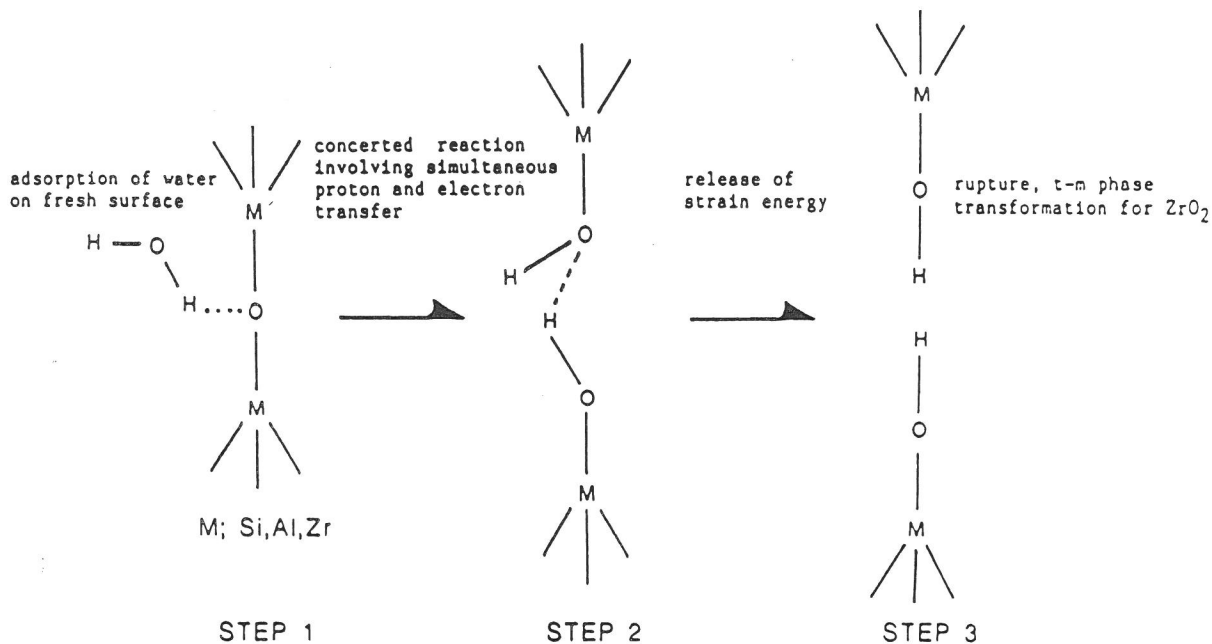


Abb. 9

Schematische Darstellung der Spannungsrißkorrosion an einer Rißspitze /32/

Im ersten Schritt wird Wasser an der $M(Si,Al,Zr)-O-M$ -Bindung in der Rißspitze adsorbiert. Dabei orientiert sich das partiell negativ geladene Sauerstoff-Atom des H_2O -Dipols zum M-Atom. Zwischen Wasserstoff und Sauerstoff bildet sich eine Wasserstoffbrückenbindung. Während des zweiten Schrittes findet gleichzeitig ein Elektronenübergang von $O(H_2O)$ -Atom zum M-Atom sowie der Protonentransfer zum $O(M)$ -Atom statt. Zwei neue Bindungen, $M-O(H_2O)$ und $H-O(M)$, entstehen. Aus der Trennung der schwachen Wasserstoffbrückenbindung resultieren im dritten Schritt $M-OH$ -Oberflächengruppen, eine Rißaufweitung hat stattgefunden /63/.

Aluminiumoxid

Im Fall von Al_2O_3 und SiO_2 (auch als Oxid auf Si_3N_4 - und SiC -Oberflächen) hat die aus den $M-OH$ -Oberflächengruppen gebildete Hydratschicht eine Schutzwirkung, das Fortschreiten der Spannungsrißkorrosion wird gehemmt. Dabei ist der Übergang zur tribochemischen Reaktionsschichtbildung, die sich reibungs- und verschleißmindernd auswirkt, fließend /21,32,34,61,66/ (s. Kap. 3.2.1.3).

Wie andere Autoren jedoch feststellen, bleibt diese Schutzwirkung nicht unter allen Bedingungen erhalten. H. Kim et al. /67/ kommen aufgrund ihrer Untersuchungen (Stift-Scheibe, $F_N=62,7$ N, $v=11,5$ mm/s) an einem kommerziellen, hochreinen Aluminiumoxid zu dem Ergebnis, daß, im Vergleich zu Trockenreibungsversuchen, nach kurzen Gleitwegen (<1000 m) der Zwischenstoff Wasser das Verschleißvolumen vermindert. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von S. Sasaki /32,61/ (s. Abb. 7) und R.S. Gates et al. /34,66/ überein. Aber nach längeren

Laufwegen (>1000 m) kehrt sich die Bewertungsfolge um, d.h. der Verschleißbetrag bei Trockenreibung liegt niedriger. Auch andere Autoren /64/ folgern aus dieser Erkenntnis die Möglichkeit eines durch Adsorption verursachten Bruchvorganges (Spannungsrißkorrosion).

Eine grundsätzliche Verschleißerhöhung bei Mischreibung in Wasser, gegenüber Festkörperreibung, stellen N. Wallbridge et al. /35/ für Al_2O_3 fest (Drei Stifte-Scheibe, $F_N = 7,5$ und 40 N/Stift , $v = 0,24 \text{ m/s}$). In Anlehnung an zahlreiche Arbeiten /68-71/, nehmen die Autoren an, daß in wäßriger Umgebung, durch Erhöhung der Versetzungsbeweglichkeit, die Festigkeit und Härte von Aluminiumoxid gesenkt und eine plastische Verformung begünstigt wird (Rehbinder-Effekt /72/). Damit können das "sanfte" Reibungsverhalten (glatte Reibflächen) und der höhere Verschleiß auf die geringere Festigkeit und Härte zurückgeführt werden. Diese Empfindlichkeit des Werkstoffes gegenüber Wasser wird durch Ergebnisse von Mikrohärtmessungen belegt. Dabei ergeben sich bei großer Prüflast ($0,5 \text{ kg}$) keine gravierenden Unterschiede zwischen der Härte des Werkstoffes in trockener Umgebung und der Härte in Wasser. Unter kleiner Last ($0,1 \text{ kg}$) liegen die Meßwerte in Wasser unter denen in trockenen Umgebung, was den Schluß zuläßt, daß die Härte von Al_2O_3 in oberflächennahen Bereichen in Anwesenheit von Wasser gesenkt wird.

Zirkondioxid

S. Sasaki /32,61/ stellt fest, daß mit Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit teilstabilisiertes Zirkonoxid stärker verschleißt (s. Abb. 7). Grund ist die damit verbundene beschleunigte Rißbildung sowie steigende Hot-Spot-Temperaturen, die für fortschreitenden Verschleiß und gleichbleibend hohe Reibungszahlen ($0,4-0,6$) verantwortlich sind. Die Ausbildung einer tribochemischen Schutzschicht wird bei Steigerung der Gleitgeschwindigkeit mehr und mehr unterdrückt, da es verstärkt zur Desorption von H_2O -Molekülen kommt.

Ein sprödes $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ($K_{IC} = 2,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) mit $5,5 \text{ Gew.}\%$ Y_2O_3 , das die kubische Phase stabilisiert, sowie ein zähes $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ($K_{IC} = 11,6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) mit stabilisierter tetragonaler Phase ($3 \text{ Gew.}\%$ Y_2O_3) wurden von T.E. Fischer et al. /73/ in unterschiedlichen Umgebungsmedien bzw. Zwischenstoffen untersucht. Die artgleichen Gleitpaarungen liefen in einem Stift-Scheibe-Tribometer bei einer Gleitgeschwindigkeit von 1 mm/s und einer Last von $9,8 \text{ N}$. Abb. 10 gibt einen Überblick der ermittelten Kenngrößen.

Grundsätzlich liegen die Reibungszahlen und Verschleißkoeffizienten für das zähe Material niedriger, wobei der höchste Verschleißkoeffizient aus den Versuchen in Wasser resultiert. Der erhöhte Verschleiß des tetragonalen ZrO_2 in den polaren

Zwischenstoffen (Wasser, Hexadecan + 0,5% Stearinsäure) wird auf die Versprödung des Materials, infolge verstärkter Spannungsrißkorrosion, zurückgeführt. In Übereinstimmung mit S. Sasaki /32,61/ beschreiben T.E. Fischer et al. /73/ interkristalline Bruchvorgänge bei dem tetragonalen ZrO_2 (s. Abb. 11).

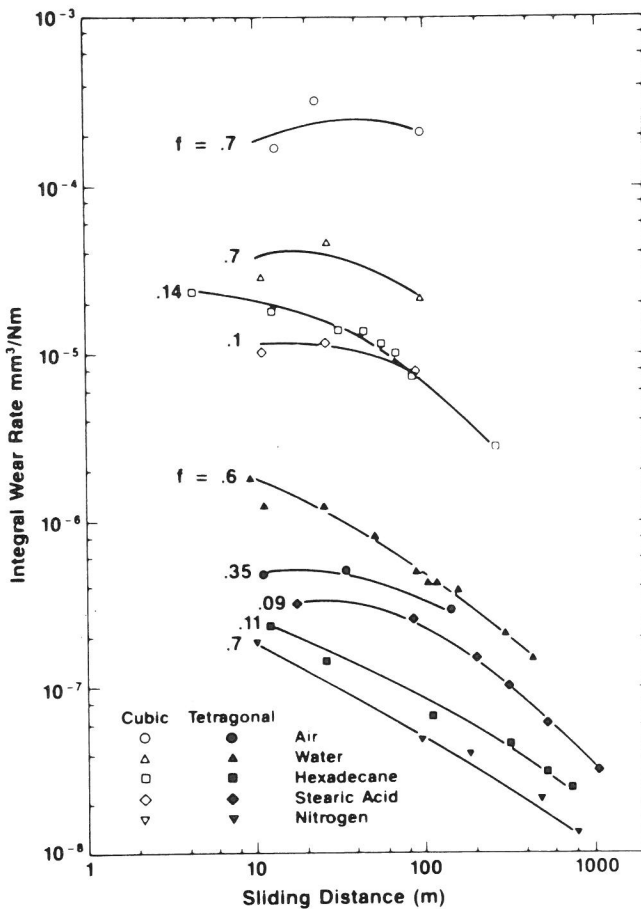


Abb. 10
Verschleißkoeffizienten von tetr. und kub. ZrO_2 in unterschiedlicher Umgebung als Funktion des Gleitweges mit Angabe der Reibungszahlen (9,8 N, 1 mm/s) /73/

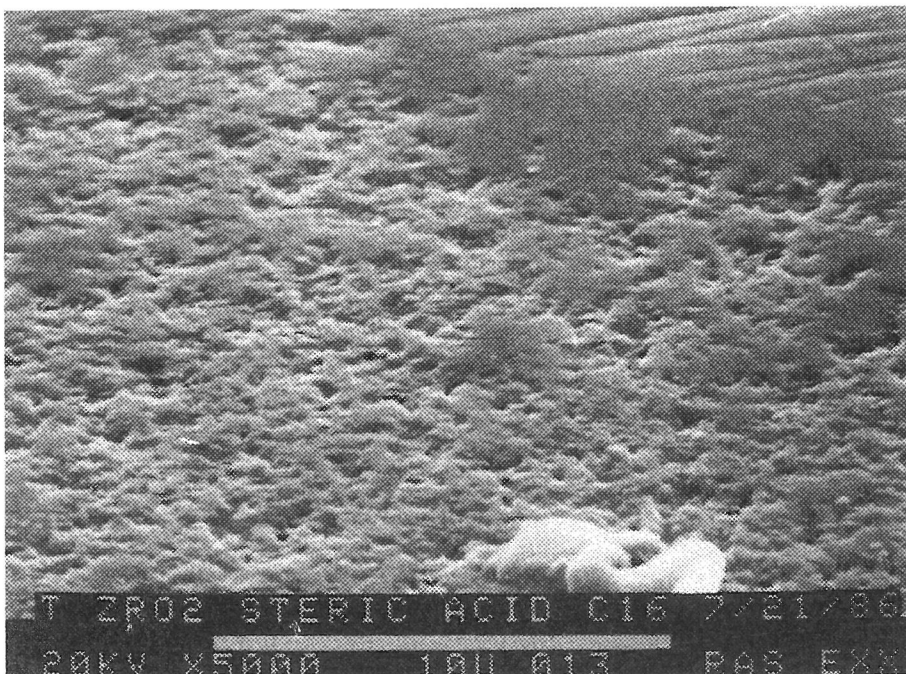


Abb. 11
REM-Aufnahme von $Y_2O_3-ZrO_2$ (tetr.) -Reibfläche nach Gleitbeanspruchung in Hexadecan + 0,5% Stearinsäure, Verschleißspur des Stiftes, unbeanspruchtes Material oben rechts (Stift-Scheibe, 9,8 N, 1 mm/s) /73/

Eine starke Abnahme der Reißfähigkeit eines $Y_2O_3-ZrO_2$ (TZP) nach wassergeschmierten Gleitreibungsversuchen (Stift-Ring, $F_N = 10$ N bzw. 30 N, $v = 0,8$ m/s, $s = 50$ m) stellen W. Bundschuh und K.-H. Zum Gahr /74/ fest. Demnach begünstigt Wasser die Reißausbreitung durch Spannungsrißkorrosion, was durch REM-Aufnahmen belegt werden konnte. Insbesondere bei den stark porösen Proben (bis 15% Porosität) wurden Risse senkrecht und parallel zur Oberfläche festgestellt.

H.G. Scott /40/ weist ebenfalls auf den verschleißerhöhenden Einfluß von Spannungsrißkorrosion bei $MgO-ZrO_2$ (PSZ) hin.

3.2.1.3 Tribochemische Reaktionen

Unter tribologischer Beanspruchung kann es zur Anregung oder Beschleunigung chemischer Reaktionen kommen, die ohne reibungsbedingte Aktivierung nicht bzw. mit geringem chemischem Umsatz verlaufen.

Durch tribochemische Reaktionen gebildete Oberflächenschichten sind im allgemeinen weicher als der Grundwerkstoff. Die damit verbundene geringere Scherfestigkeit begünstigt die Funktion als Festschmierstoff. Eine Verstärkung des reibungsmindernden Effekts ergibt sich aufgrund der hohen Härte keramischer Werkstoffe und den damit verbundenen kleinen Mikrokontaktflächen. Die im allgemeinen sehr dünnen tribochemischen Reaktionsschichten schließen diesen Einfluß des Substrates nicht aus. Kommt es zum kontinuierlichen Abtrag der Schicht, folgt daraus eine starke Glättung der Reibflächen. Andererseits kann eine Reaktionsschicht als Schutz gegen Mikrobrechen und Oberflächenzerrüttung wirken /21,75/.

Siliziumnitrid

T. Sugita et al. /76/ untersuchten die Verschleißmechanismen von Siliziumnitrid mit einem Anteil von 5 Gew.% MgO und einem reaktionsgesinterten Si_3N_4 (RBSN) hoher Reinheit (99 Gew.%). Die artgleichen Gleitpaarungen liefen in einem Stift-Scheibe-Tribometer unter Wasser-Tropfenschmierung. Das Ergebnis, daß die von der Kontaktzeit abhängige Verschleißrate bei allen Gleitgeschwindigkeiten konstant bleibt, veranlaßt die Autoren zu vermuten, daß tribochemische Reaktionen den Verschleißmechanismus bestimmen. Mit Ionenmikromassenanalyse (IMMA) wurde in der Reibspur ein erhöhter Anteil Si-Ionen in Verbindung mit Wasserstoff und Sauerstoff nachgewiesen. Aus Ergebnissen von XRD-Messungen schließen die Autoren auf amorphe Rückstände im Wasser, die sich durch nachträgliches Aufheizen (1170 K, 1 h) in α -Cristobalit (SiO_2) umwandeln. Abb. 12 zeigt die XRD-Diagramme für beide Fälle.

T. Sugita et al. /76/ folgern aus diesen Ergebnissen, daß im Anschluß an eine Tribooxidation die gebildete Oxidschicht (α -Cristobalit) in eine amorphe Hydratphase ($SiO_2 \cdot xH_2O$) umgewandelt wird. Es wird die Möglichkeit angenommen, daß der

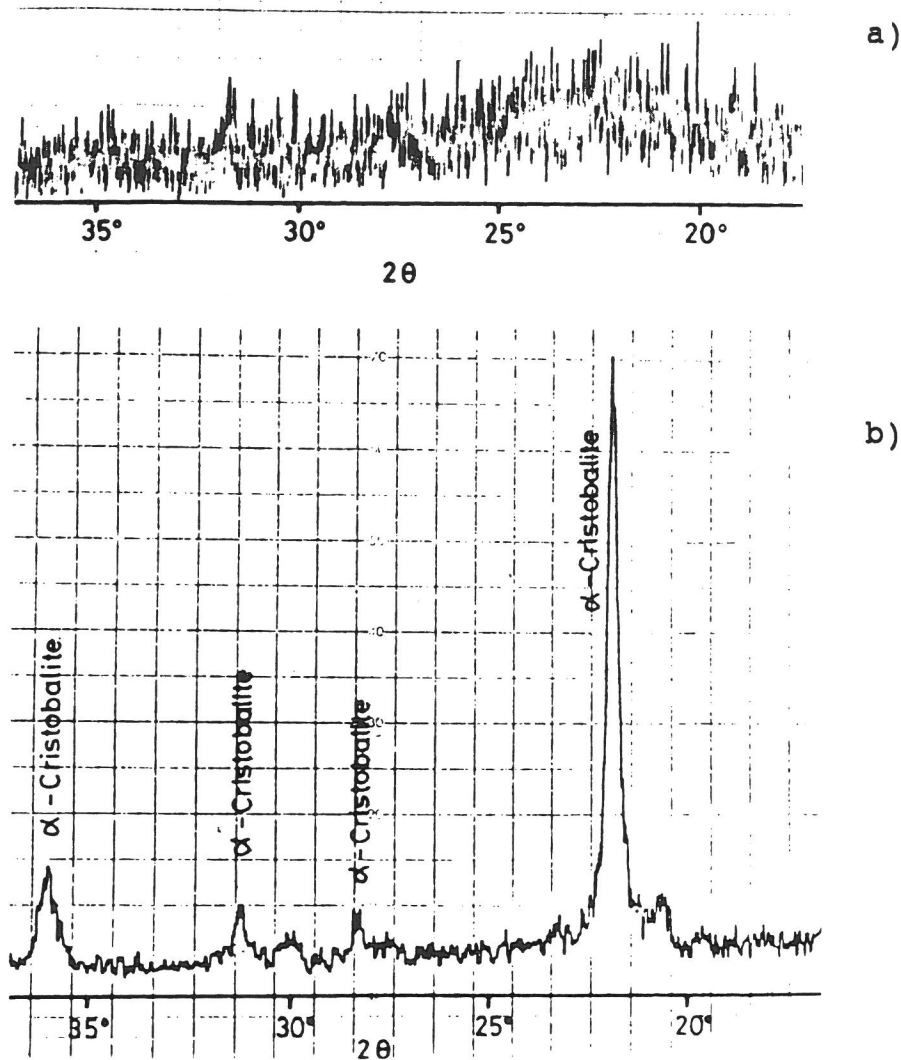


Abb. 12

XRD-Diagramme von amorphen Rückständen im Wasser (a) nach Reibbeanspruchung von artgleichen RBSi_3N_4 -Gleitpaarungen und der nachträglich aufgeheizten Rückstände (1270 K für 1 h) (b) /76/

auftretende Verschleiß dem Abtrag des hydratisierten Materials entspricht.

Neben anderen Zwischenstoffen wurde auch von S. Jahanmir und T.E. Fischer /77/ Wasser als Schmierstoff für Si_3N_4 -Paarungen verwendet. Untersucht wurde heißgepreßtes Siliziumnitrid (HPSN, Norton NC-132) in einer Stift-Scheibe-Anordnung ($F_N = 9,8 \text{ N}$, $v = 1 \text{ mm/s}$). Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen dienten zur Veranschaulichung der Verschleißerscheinungsformen. In Wasser ist eine starke Oberflächenglättung durch die Gleitbeanspruchung festzustellen.

In einer früheren Arbeit von H. Tomizawa und T.E. Fischer /78/ wird die Glättung der Reibflächen (s. Abb. 13) auf tribochemische Reaktionen zwischen Wasser und Siliziumnitrid zurückgeführt. Dabei entsteht eine amorphe SiO_2 -Schicht, die sich

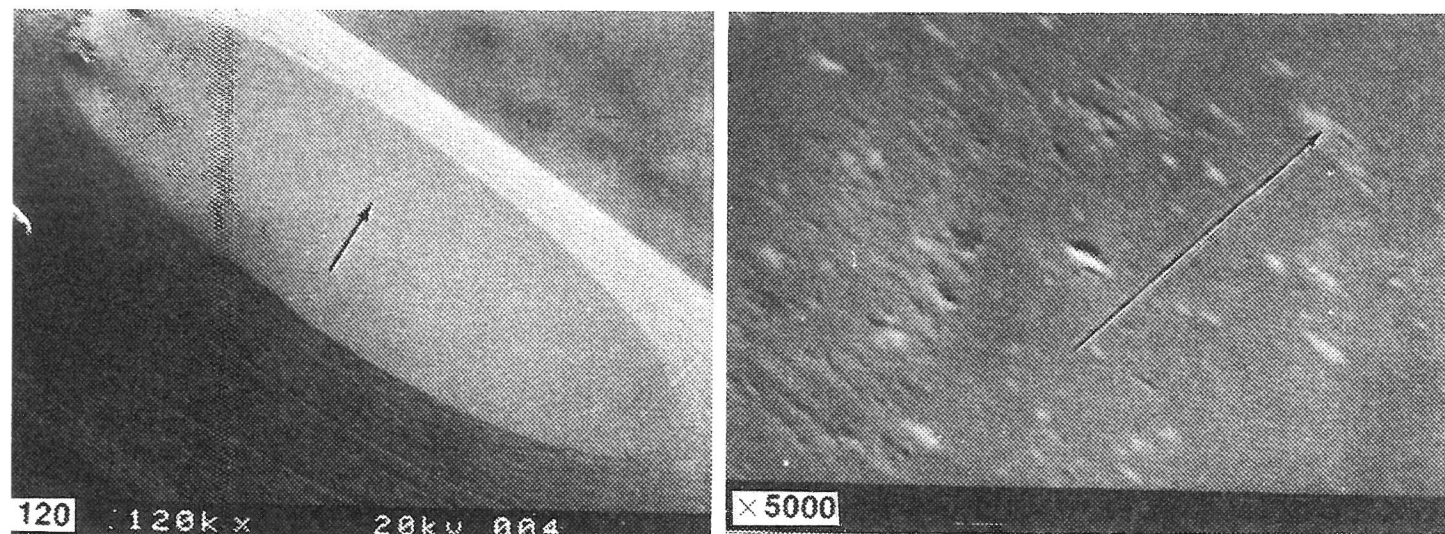
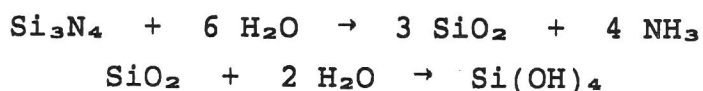


Abb. 13

REM-Aufnahmen von Verschleißspur eines HfSi_3N_4 -Stiftes nach Gleitbeanspruchung in Wasser, Pfeil entspricht $10 \mu\text{m}$ und gibt die Gleitrichtung an (Stift-Scheibe, $4,9 \text{ N}$, $0,06 \text{ m/s}$) /78/

unter Bildung von Kieselsäure auflöst /79/. Berücksichtigt man die Erkenntnisse von Y. Kanno et al. /80/ und S. Sasaki /32,61/, die bei der Oxidation von Si_3N_4 durch Wasser die Bildung von NH_3 beschreiben, können folgende Reaktionen formuliert werden:



Dabei ist die Löslichkeit von SiO_2 in wäßrigen Lösungen abhängig von der Struktur des Materials. Im basischen Bereich ab pH 9 löst sich SiO_2 stärker /79/. H. Tomizawa und T.E. Fischer /78/ folgern weiter, daß durch die tribologische Beanspruchung in Kombination mit chemischem Angriff die Zersetzung von SiO_2 schneller erfolgt als es für unbeanspruchte SiO_2 -Partikel der Fall wäre. Die Bildung von Ammoniak wird von S. Sasaki /32,61/ durch Messungen belegt. Der pH-Wert des Wassers liegt im basischen Bereich, zudem werden Ammonium-Ionen nachgewiesen. Der Verschleißmechanismus wird folgendermaßen gedeutet /78/: Der tribochemische Materialabtrag vollzieht sich Molekül für Molekül, im Gegensatz zum Abtrag ganzer Werkstoffpartikel infolge von Bruchvorgängen. Resultat sind fehlende Verschleißpartikel sowie sehr glatte Oberflächen, die in diesem speziellen Fall die Bildung eines hydrodynamischen Schmierfilms bei Gleitgeschwindigkeiten um $0,06 \text{ m/s}$ und einer Last von $4,9 \text{ N}$ zulassen. Niedrige Reibungszahlen ($f \leq 0,01$) sind die Folge (s. Abb. 14), wobei gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von S. Sasaki /32,61/ besteht (s. Abb. 7). Aufgrund fortschreitender Reaktionsschichtbildung zeigen die Resultate von P. Salonen et al. /62/ bei SiAlON eine mit dem Laufweg abnehmende Reibungszahl (s. Abb. 8).

Auf den Einfluß von wäßrigen Zwischenstoffen bzw. feuchten Umgebungsmedien auf den Verschleißmechanismus von Si_3N_4 -Werkstoffen wird in weiteren Arbeiten eingegangen. Mikrobrennen bzw. Delamination und/oder Oberflächenzerrüttung sind die vorrangigen Mechanismen in trockener Umgebung. Mit zunehmender Feuchte treten tribochemische Reaktionen verstärkt in den Vordergrund /81-84/.

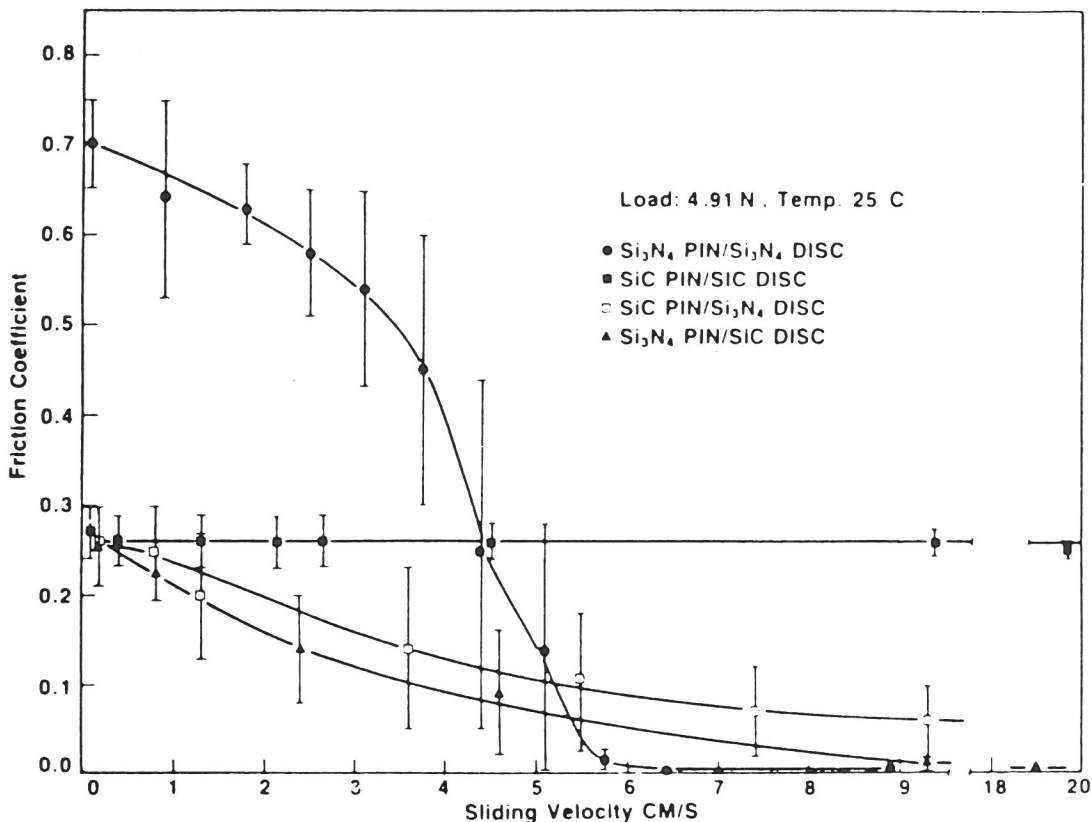


Abb. 14

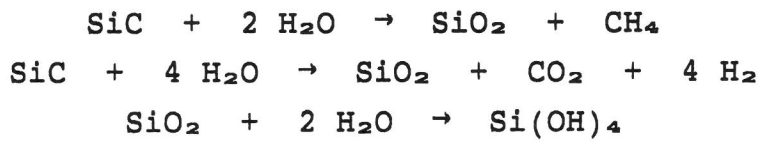
Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das Reibungsverhalten von Si_3N_4 - und SiC-Gleitpaarungen in Wasser (Stift-Scheibe, 4,9 N) /78/

Siliziumcarbid

Auch SiC wurde von H. Tomizawa und T.E. Fischer /78/ in die Untersuchungen einbezogen (s. Abb. 14). Die Reibflächen werden nicht so stark geglättet wie im Fall von Siliziumnitrid, hydrodynamische Schmierung könnte unter 5 N Last erst bei einer Gleitgeschwindigkeit von 0,65 m/s wirksam werden (Si_3N_4 : $v = 0,06$ m/s, s. Abb. 14). Die Existenz zylinderförmiger Verschleißpartikel, die wahrscheinlich das Produkt tribochemischer Reaktionen zwischen Siliziumcarbid und Wasser sind, wird durch REM-Aufnahmen nachgewiesen. Es wird vermutet, daß unter kontinuierlicher Gleitbewegung die Reaktionsschicht teilweise abgetragen wird und es zur Bildung von Verschleißpartikeln kommt, die 2 μm bis 3 μm lang sind sowie einen Durchmesser von ca. 0,2 μm haben. Auf Ermüdungsbrüche zurückzuführende Vertiefungen werden auf Stift- und Scheiben-Oberflächen gefunden.

Bei den beschriebenen Verschleißmechanismen bleiben trotz steigender Gleitgeschwindigkeit die Anfangsreibungszahlen konstant ($f = 0,26$, s. Abb. 14). Ferner zeigen REM-Aufnahmen eine Abhängigkeit des Verschleißbetrages von der kristallographischen Orientierung der einzelnen Körner. Dieses anisotrope Verschleißverhalten des SiC-Kristalles /85/ hat nach H. Knoch und J. Kracker /10/ die Ausbildung einer Reliefstruktur zur Folge, die in Gleitlagern und Gleitringdichtungen beste Gleitverschleiß Eigenschaften aufweist, da in Notlaufsituationen die Vertiefungen als Schmierstoffreservoir dienen.

Die Ausbildung sehr glatter Reibflächen an SSiC-Paarungen sowie Reibungszahlen um 0,01 beschreiben S. Sasaki /32,61/ und P. Salonen et al. /62/ (s. Abb. 7+8). In Anlehnung an die Erkenntnisse von H. Tomizawa und T.E. Fischer /78/ führen die Autoren dies auf tribochemische Reaktionen zwischen Wasser und Werkstoff zurück, die, in bezug auf die weiter oben aufgeführten Reaktionen für Si_3N_4 , folgendermaßen formuliert werden können /61/:



Ergebnisse zum tribologischen Verhalten modifizierter SiC-Keramiken in aggressiven Medien liefern D. Klaffke und P. Lucke /86/. Artgleiche Paarungen von fünf verschiedenen SiC-Modifikationen (01: Standardwerkstoff EkaSiC D, 02: größeres Gefüge, 03: 15% B_4C , 04: erhöhter Porenanteil) wurden Gleitverschleiß- und Schwingungverschleißprüfungen unterzogen. In Abb. 15 sind die Gleitverschleißkoeffizienten und die Beanspruchungsbedingungen zusammengefaßt.

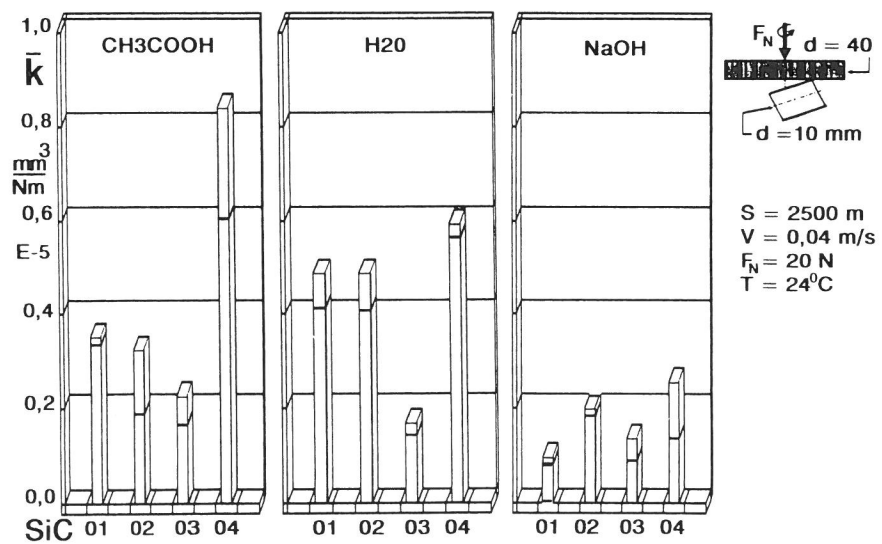


Abb. 15 Verschleißkoeffizienten artgleicher SiC-Gleitpaarungen in verschiedenen Zwischenmedien (20 N, 0,04 m/s, 2500 m, CH_3COOH : pH 3, NaOH: pH 12) /86/

Die Unterschiede im Verschleißverhalten der einzelnen Modifikationen sind relativ gering, wobei in Natronlauge generell die niedrigsten Werte ermittelt wurden. In allen Fällen resultieren Anfangsreibungszahlen zwischen 0,25 und 0,30, die nach ca. 10 h auf ungefähr 10% des Anfangswertes sinken.

Aluminiumoxid

In Kap. 3.2.1 sind die Einflüsse der atmosphärischen Effekte auf das Reibungsverhalten eines hochreinen Al_2O_3 graphisch dargestellt (s. Abb. 6).

In den schon oft zitierten Arbeiten von S. Sasaki /32,61/ wird ebenfalls bei Al_2O_3 die Erzeugung glatter Reibflächen auf tribochemische Verschleißmechanismen, wie auch bei Si_3N_4 und SiC , zurückgeführt. Im Vergleich zu anderen keramischen Werkstoffen liegen die Verschleißbeträge für Al_2O_3 am niedrigsten (s. Abb. 7+8).

Eine sehr ausführliche Darstellung der tribochemischen Mechanismen zwischen Aluminiumoxid (99% Al_2O_3 -Gehalt) und Wasser geben die Arbeiten von R.S. Gates et al. /34,66/ (Vier Kugeln, $F_N = 5-69$ kg, $v = 0,23$ m/s). Die Autoren unterteilen die Mechanismen in mechanische und chemische Wechselwirkungen, wobei der mechanische Anteil mehrere Beiträge liefert. Zum einen resultieren Schubspannungen und hohe Pressungen, die Phasenumwandlungen von $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ in eine Übergangsform hervorrufen. Hinzu kommt der reibungsbedingte Temperaturanstieg, der den Ablauf der chemischen Reaktionen begünstigt (chemische Wechselwirkungen). Dabei bilden sich Aluminiumhydroxid-Schichtgitter, die durch ihre schmierende Wirkung die Reibung herabsetzen und somit für eine Reduzierung der Schubspannungen und der Temperatur im Reibkontakt sorgen. Im Vergleich zur Trockenreibung wird dadurch auch der Verschleiß vermindert. Die beschriebenen tribochemischen Reaktionen werden durch REM-Aufnahmen untermauert, die die Existenz einer Reaktionsschicht im Kontaktbereich zeigen. Auf die zahlreichen Modifikationen von Aluminiumoxid und Aluminiumhydroxid und deren Verhalten bei tribologischer Beanspruchung sei hier nicht näher eingegangen. In /66/ wird dies ausführlich getan.

Im Gegensatz zu R.S. Gates et al. /34,66/, hatten P. Kapsa et al. /87/ eine wesentlich geringere Belastung ihrer Gleitpaarungen (polykristallines Al_2O_3) gewählt (Kugel-Platte, reversierend, $F_N = 5$ N, $v = 24$ mm/s). Im Vordergrund der Untersuchungen stand der Einfluß der Umgebung (Luftfeuchte, Wasser, Reinigungsprozeß) auf Adsorption und Anhäufung von Verschleißpartikeln im Reibkontakt. Bei den ungeschmierten Versuchen (40-60% r.F.) ergaben sich, in Abhängigkeit vom Reinigungsprozeß, Reibungszahlen zwischen 0,33 und 0,41. Mit Wasser als Zwischenstoff ist diese Abhängigkeit nicht festzustellen ($f = 0,16$). Aus SIMS-Analysen (Sekundär-Ionen-Massen-Spektrometrie) der gereinigten, unbean-

spruchten Oberflächen folgern P. Kapsa et al. /87/ den reibungsmindernden Einfluß erhöhter OH⁻-Konzentration, wobei der Reinigungsprozeß deren Höhe bestimmt. Ferner wird die Adsorption von Wassermolekülen durch hohe OH⁻-Konzentrationen begünstigt. REM- und TEM-Untersuchungen sowie XRD-Messungen zeigen, daß Verschleißpartikel unterschiedlicher Form vorliegen, die alle aus amorphen Aluminiumhydroxiden bestehen.

Zirkonoxid

Die Verschleißmechanismen von MgO-ZrO₂-Gleitpaarungen (PSZ) unter Wassertropfenschmierung beschreibt K.-H. Zum Gahr /41/, der neben Keramik/Keramik- auch Keramik/Stahl- und Stahl/Stahl-Gleitpaarungen unter hoher Belastung in geschmiertem und ungeschmierten Zustand getestet hat. Anhand von REM-Aufnahmen (s. Abb. 16) sind plastische Verformung (Einfluß hoher Blitztemperaturen /62/), adhäsiv bedingter Materialübertrag und durch Delamination verursachter Abtrag von Oberflächenschichten zu erkennen. Die teilweise geglätteten Reibspuren deuten auf tribochemische Reaktionsschichten hin, die aber nicht weiter untersucht wurden.

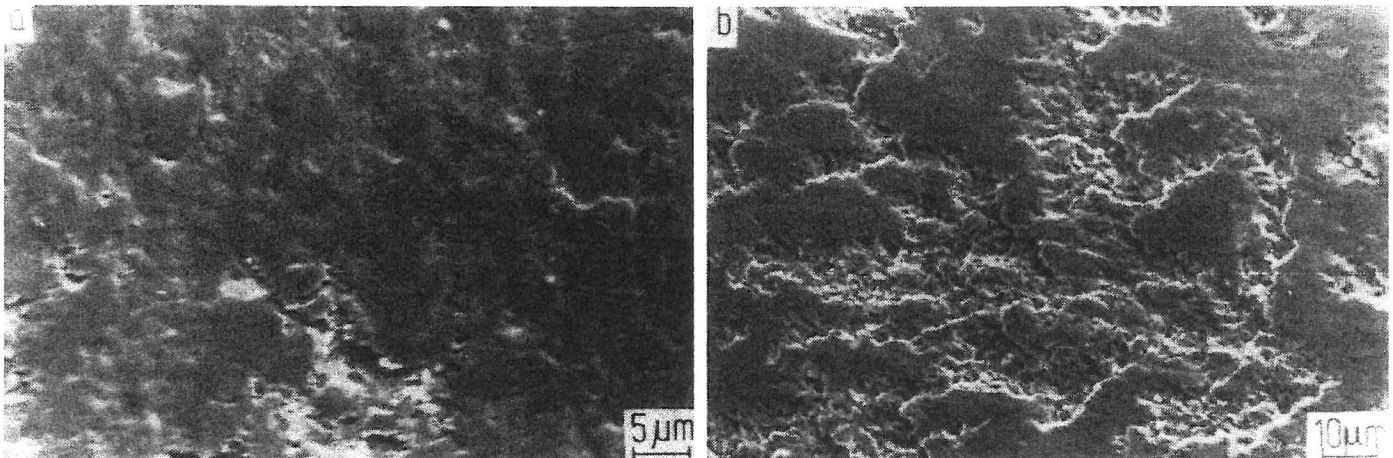


Abb. 16

REM-Aufnahmen von MgO-ZrO₂-Reibflächen nach Gleitbeanspruchung in Wasser, Verschleißspur auf Stift (a) und Ring (b) (Stift-Ring, 200 N, 0,77 m/s, 8,7 km) /41/

3.2.2 Korrosionsverhalten keramischer Werkstoffe unter tribologischer Beanspruchung

Das Reibungs- und Verschleißverhalten verschiedener artgleicher Keramik-Gleitpaarungen an Luft, in Wasser, organischen Flüssigkeiten und Schwefelsäure beschreiben Y. Mizutani et al. /88/. An dieser Stelle sollen nur die Einflüsse unterschiedlicher H₂SO₄-Konzentrationen gezeigt werden. Zum Einsatz kam ein Stift-Scheibe-Tribometer, das im Gleitgeschwindigkeitsbereich von 0,01-0,3 m/s und unter einer Pressung von 5,9 MPa betrie-

ben wurde. Die Abhängigkeit der Verschleißrate sowie der Korrosionsrate von der H_2SO_4 -Konzentration sind in Abb. 17 für Si_3N_4 , Al_2O_3 , $Y_2O_3-ZrO_2$ (PSZ) und SiC dargestellt. Abb. 18 gibt die Reibungszahlverläufe wieder.

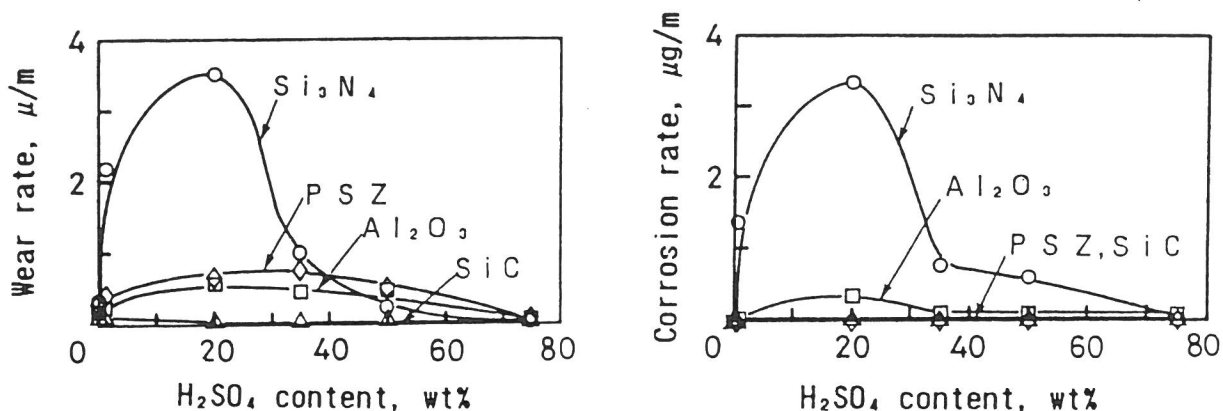


Abb. 17 Verschleißrate artgleicher Keramik-Gleitpaarungen und Korrosionsrate keramischer Werkstoffe als Funktion der H_2SO_4 -Konzentration (5,9 MPa, 0,01-0,3 m/s) /88/

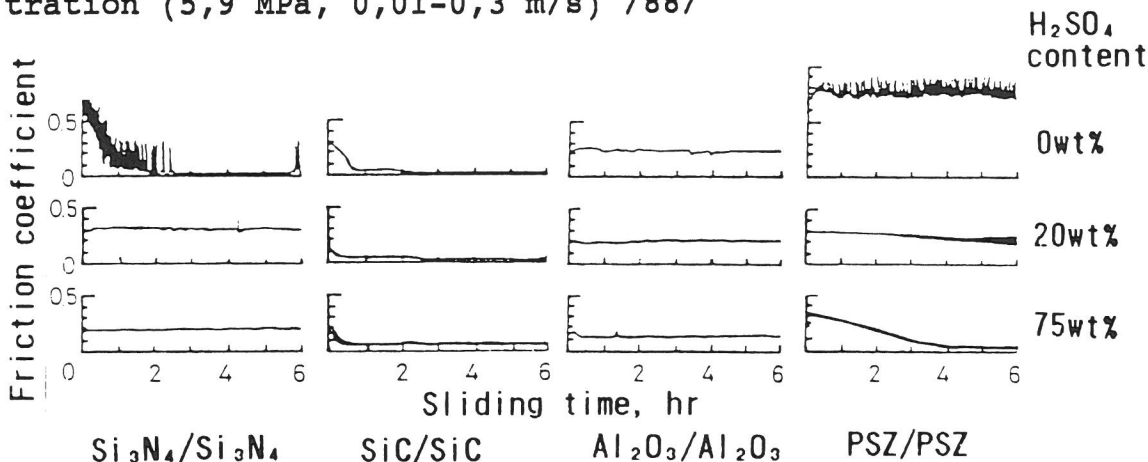


Abb. 18 Reibungszahlverläufe artgleicher Keramik-Gleitpaarungen als Funktion der H_2SO_4 -Konzentration (5,9 MPa, 0,01-0,3 m/s) /88/

Aus dem Vergleich der Kurven für Verschleiß- und Korrosionsrate wird deutlich, daß die erhöhte Verschleißrate des Si_3N_4 bei ca. 20 wt% H_2SO_4 auf korrosive Einflüsse zurückzuführen ist. Es entstehen stark poröse Oberflächen, wobei ESMA-Analysen (Elektronenstrahl-Mikroanalyse) in den Porenräumen Auflösungsvorgänge an den Korngrenzen (Y_2O_3 -Glasphase) belegen. Dagegen ist für PSZ und Al_2O_3 der verschleißerhöhende korrosive Einfluß gering, im Fall von SiC ist er nicht meßbar. Zu den Reibungszahlverläufen sei nur gesagt, daß bei Si_3N_4 (nur in H_2O , 0 wt% H_2SO_4)- und SiC-Gleitpaarungen Reibungszahlen um 0,01 resultieren. Grund ist die tribochemisch bedingte Reibflächenglättung (s. Kap. 3.2.1.3).

Auf das reine Korrosionsverhalten keramischer Werkstoffe wird hier nicht eingegangen. Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit diesem Thema /89-93/. In /89/ ist eine entsprechende Literaturübersicht enthalten.

4. Experimentelles

4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Den schematischen Aufbau des verwendeten Mitteltemperatur-Tribometers (MT) zeigt Abb. 19. Das von der BAM entwickelte Gerät ist hier als Stift-Scheibe-Tribometer ausgeführt. Es dient zur Untersuchung von Reibung und Verschleiß bei Gleitbeanspruchungen unter kontinuierlichem Bewegungsablauf. Es kann bei Festkörperreibung ohne Schmierung und bei Grenz- oder Mischreibung mit flüssigen Schmierstoffen betrieben werden.

Wegen der geringen Korrosionsbeständigkeit des vorhandenen Messingbehälters wurden der Behälter für den Zwischenstoff sowie die Probenhalterungen für den stationären (Stift, Segment einer balligen Ringscheibe) und rotierenden Probekörper (Scheibe) aus PVC (Vinidur) angefertigt. Festgeklemmt wurden stationärer und rotierender Probekörper mit einem Blech bzw. einer Scheibe und Schrauben aus rostfreiem Stahl (V2A) (s. Abb. 20). Die Ausrichtung des rotierenden Probekörpers wurde mit einem Feintaster kontrolliert.

Über einen Lastarm wird die Normalkraft, die den stationären Probekörper gegen die rotierende Scheibe drückt, aufgebracht. Zur Einstellung der Normalkraft wird ein Gewicht auf dem Last-

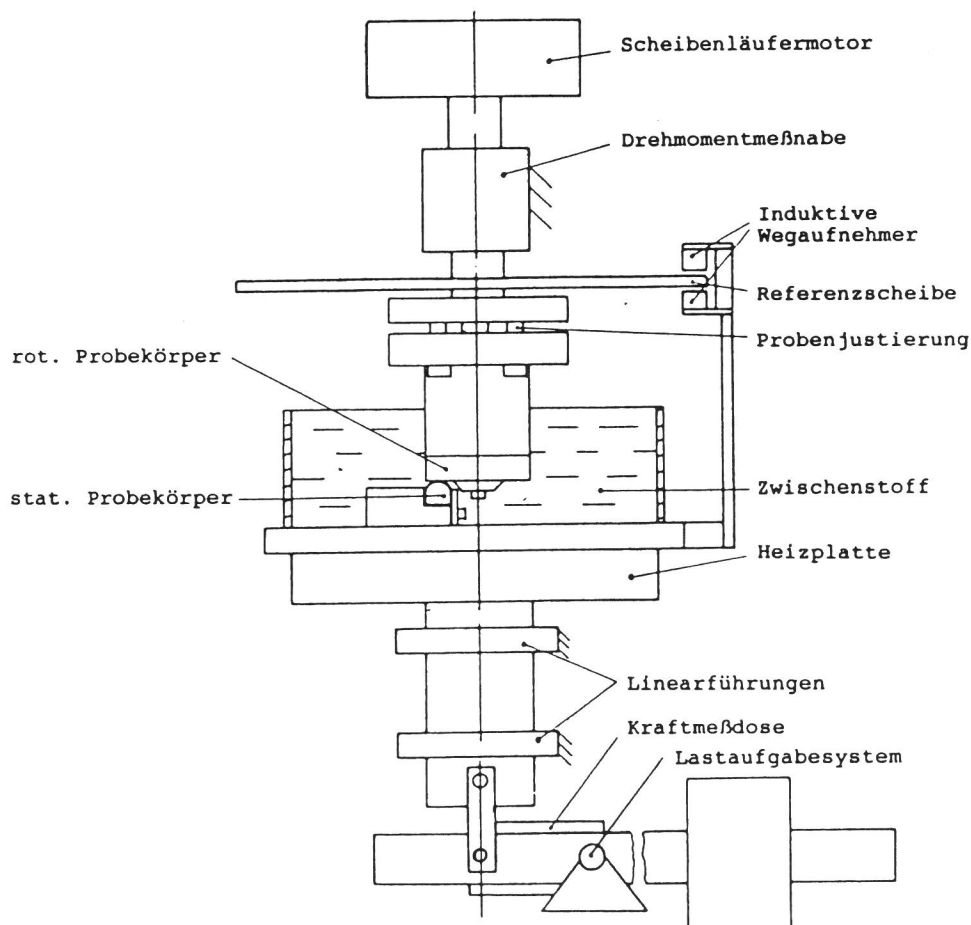


Abb. 19
Schematischer Aufbau des Tribometers

arm verschoben, wobei Prüflasten bis 100 N aufgebracht werden können. Die rotierende Scheibe wird von einem 1,6 kW BBC-Scheibenläufermotor angetrieben. Die Drehzahl kann bis 3000 min^{-1} gesteigert werden. Dies entspricht bei der gegebenen Kontaktgeometrie (s. Abb. 21) einer maximalen Gleitgeschwindigkeit von 5 m/s. Eine Heizplatte unter der Probenanordnung kann den Zwischenstoff bis auf 300°C erhitzen.

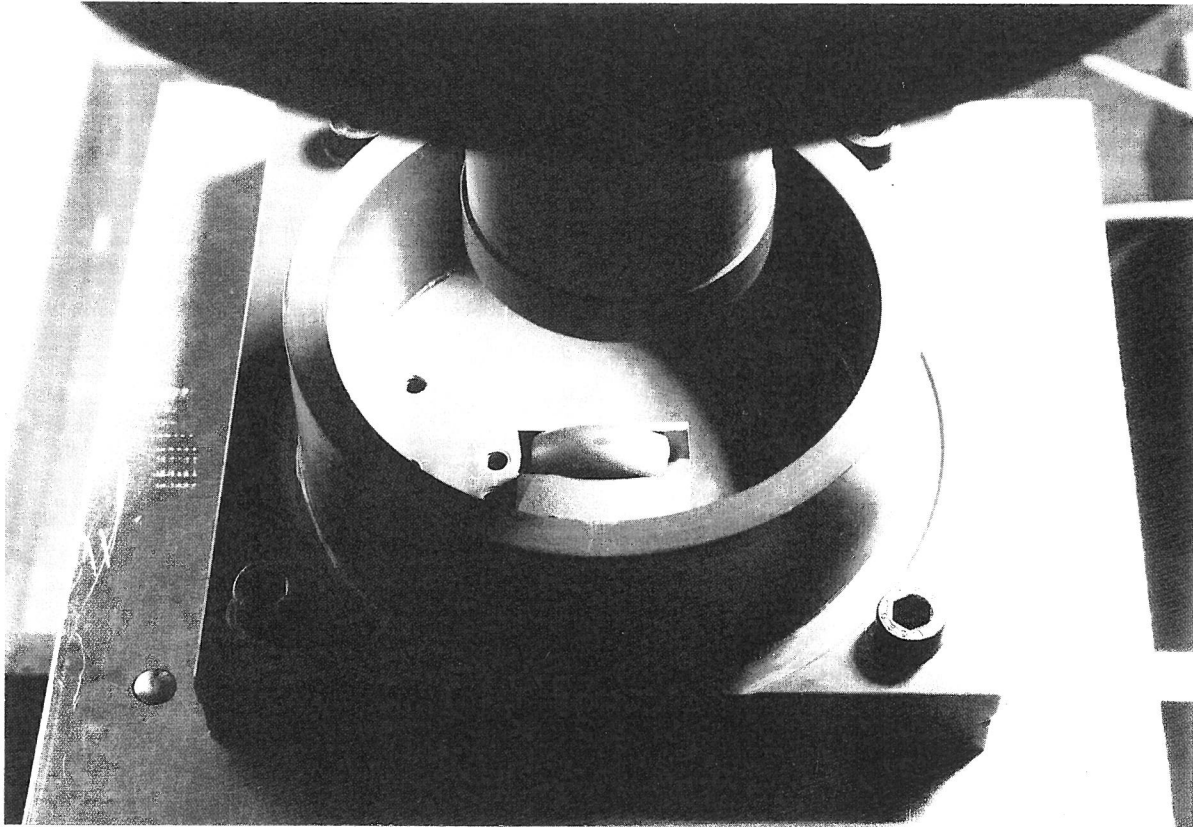


Abb. 20
Anordnung der Probekörper im Einbauzustand

Als Meßgrößen werden Normalkraft F_N , Reibungskraft F_R , linearer Verschleißbetrag W_1 und Zwischenstofftemperatur T kontinuierlich erfaßt. Die Normalkraft wird mit einer Kraftmeßdose (Fa. HBM, Typ Z6H2) und die Reibungskraft bzw. das Drehmoment mit einer Drehmomentmeßnabe (Fa. Dr. Staiger) gemessen. Zwei induktive Wegaufnehmer (Fa. HBM, Typ Tr 8) messen an einer Referenzscheibe den gesamten linearen Verschleißbetrag, d.h. den Verschleiß von stationärem und rotierendem Probekörper. Ein NiCr-Ni-Thermoelement mißt die Temperatur im Zwischenstoff.

Zur tribologischen Auswertung werden diese Meßwerte erfaßt und zum Steuerschrank weitergeleitet. Dort werden die Signale aufbereitet und für die weitere Auswertung sowohl analog als auch digital abgenommen /94/. Die Verläufe von F_R , W_1 , und T werden von einem 3-Kanal-Schreiber aufgezeichnet. Zusätzlich werden die verstärkten Analogsignale auf einen Analog/Digital-Wandler gegeben und im Rechner bzw. im Massenspeicher (Cassette) gespeichert /95/.

4.2 Versuchsbedingungen

Um den Werkstoffeinfluß nicht zu unterdrücken, was bei hydrodynamischer Schmierung weitestgehend der Fall wäre, dienten Vorversuche zur Bestimmung von Beanspruchungsbedingungen, die den Mischreibungszustand gewährleisten. Sie lassen sich folgendermaßen charakterisieren /17/:

I. Elemente des Prüfsystems

- Grundkörper: stationärer Probekörper (Stift)
Eingriffsverhältnis: 100%
- Gegenkörper: rotierender Probekörper (Scheibe)
Eingriffsverhältnis: $\leq 2\%$
- Zwischenstoffe: wäßrige Medien bzw. keine
- Umgebungsmedium: Laborluft (15-30% r.F. bei 23°C)

II. Beanspruchungskollektiv

- Bewegungsart: gleiten
- Bewegungsablauf: kontinuierlich
- Normalkraft F_N : 22 N
- Gleitgeschwindigkeit v : 0,1 m/s
- Drehzahl: 60 min^{-1}
- Umgebungstemperatur T : 23°C
- Laufweg s : 2000 m
- Prüfdauer t : 333 min

III. Tribologische Kenngrößen

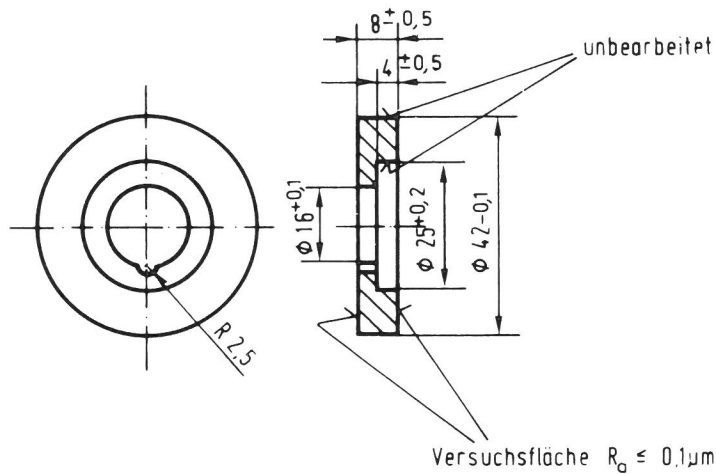
- Reibungszahl f
- Verschleißbetrag W_1 und W_v
- volumetrischer Verschleißkoeffizient $k_v = W_v / (F_N \cdot s)$
- differentieller Verschleißkoeffizient $k_{v, diff} = \Delta W_v / (F_N \cdot \Delta s)$
- Verschleißerscheinungsformen

4.3 Probekörper

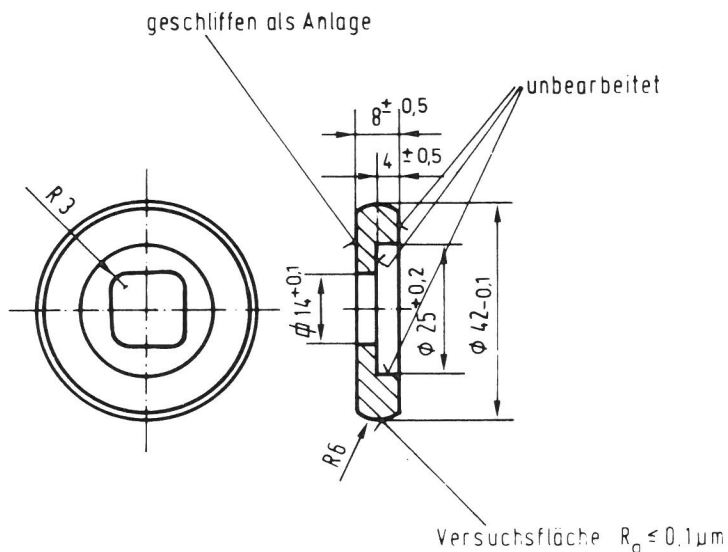
Die Geometrie der für Modellreibungs- und Verschleißuntersuchungen von ingenieurkeramischen Werkstoffen entwickelten Probekörper ist in Abb. 21 dargestellt /24,96/.

Für die durchgeführten Untersuchungen konnte der rotierende Probekörper im ursprünglichen Zustand belassen werden. Der Spurdurchmesser beträgt bei gegebener Probenanordnung ca. 32 mm. Als stationäre Probekörper dienten Segmente der dargestellten balligen Ringscheibe, die durch Formschleifen aus einer Scheibe hergestellt wird. Mit einer Diamant-Trennscheibe wurden sechs Segmente aus einer Ringscheibe gesägt. Der Radius auf dem Umfang der Scheibe gewährleistet Punktkontakt zu Versuchsbeginn und damit definierte Einlaufbedingungen, die bei harten Werkstoffen wichtig für die Beurteilung des tribologischen Verhaltens sind. Mit zunehmendem Verschleiß wird aus dem Punktkontakt ein Flächenkontakt. Es bildet sich

eine elliptische Fläche, was zur Folge hat, daß die geometrische Flächenpressung sinkt. Auf diese Weise ist es möglich, anhand der kontinuierlichen Messung des linearen Verschleißbetrages, den Einfluß der Flächenpressung auf das Verschleißverhalten zu untersuchen /96/.



a)



b)

Abb. 21
Abmessungen des rotierenden (a)- und des stationären Probekörpers (b)

Bevor die Versuche am Tribometer durchgeführt wurden, mußten die Probekörper entsprechend vorbereitet werden. Die schon gebrauchten Siliziumnitrid-Scheiben (rotierende Probekörper) wurden zur Beseitigung alter Reibspuren mit 50 µm-Diamantpaste geläppt. Diamant-Polieren mit 6 µm- und 3 µm-Körnung sorgte für die gewünschten Rauheiten ($R_a = 0.05-0.08 \mu\text{m}$, s. Tab. 3). Als Reinigungsmittel diente ein Aceton-Ethanol-Gemisch, womit die Probekörper zwischen den Bearbeitungsschritten und unmittelbar vor Versuchsbeginn im Ultraschallbad gereinigt wurden. In Heißluft wurden die Probekörper getrocknet.

4.4 Werkstoffe

Tab. 3 faßt wichtige Materialkennwerte und die Oberflächenrauheiten der untersuchten Werkstoffe zusammen.

Material	E [GPa]	K _{IC} [MPa · m ^{1/2}]	λ [W/(m · K)]	c _p [J/(g · K)]	α (20-1000°C) [10 ⁻⁶ /K]	HV 0.5* [GPa]	ρ [g/cm ³]	R _a * (rot. Probek.) [μm]	R _z * (rot. Probek.) [μm]	R _{PK} * (rot. Probek.) [μm]
SSi ₃ N ₄ ND 200 ¹	280	6.0	30	0.8	3.4	14.3 ±0.9	3.25	0.08 ±0.01	1.38 ±0.24	0.005
HIP-RBSi ₃ N ₄ HIP-RBSN 411 ²	290-315	5.6	46	0.7	3.9 (20-1200°C)	13.6 ±0.9	3.26	0.05 ±0.01	0.43 ±0.09	0.01
SSiC EkaSiC D ³	410	3.2	110	0.6	4.0 (20-500°C)	23.5 ±1.2	3.10	0.02 ±0.006	0.20 ±0.06	0.005
SiSiC SiSiC-P ⁴	340	5.0	150	0.9	4.5	23.6 ±5.1	3.10	0.02 ±0.004	0.17 ±0.05	0.005
MgO-ZrO ₂ ZN 40 ⁵	210	8.1	2.1	0.4	9.8	10.9 ±0.4	5.74	0.01 ±0.004	0.30 ±0.15	0.01
Al ₂ O ₃ A1999.7 ⁶	380	3.8-5.7	26	0.9	8.0	15.8 ±0.6	3.90	0.06 ±0.03	1.40 ±0.30	0.01

^{1,5} Feldmühle AG; ^{2,6} Hoechst CeramTec AG; ³ Elektroschmelzwerk Kempten GmbH; ⁴ Schunk Kohlenstofftechnik GmbH

Tab. 3

Materialkennwerte und Oberflächenrauheiten (* Labormessungen)

4.4.1 Chemische Zusammensetzungen und Gefüge

Si₃N₄-Werkstoffe

Die Phasenzusammensetzungen der Siliziumnitrid-Werkstoffe sind in Tab. 4 enthalten.

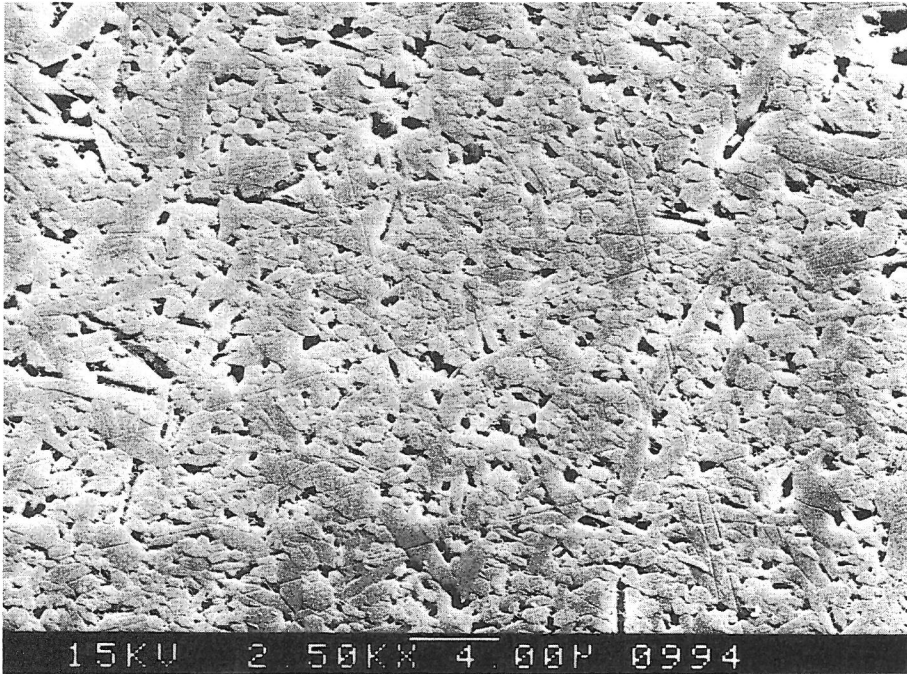
Anteile in Gew. %	SSi ₃ N ₄ ND 200	HIP-RBSi ₃ N ₄ HIP-RBSN 411
β-Si ₃ N ₄	78,64	90,53
SiO ₂	6,41	2,33
Al ₂ O ₃	3,97	2,27
Y ₂ O ₃	10,16	4,83
MgO	0,008	0,008
Fe ₂ O ₃	0,62	-
CaO	0,14	-
La ₂ O ₃	0,047	0,035

Tab. 4
Phasenzusammensetzungen
der Si₃N₄-Werkstoffe
(Laboranalysen /23/)

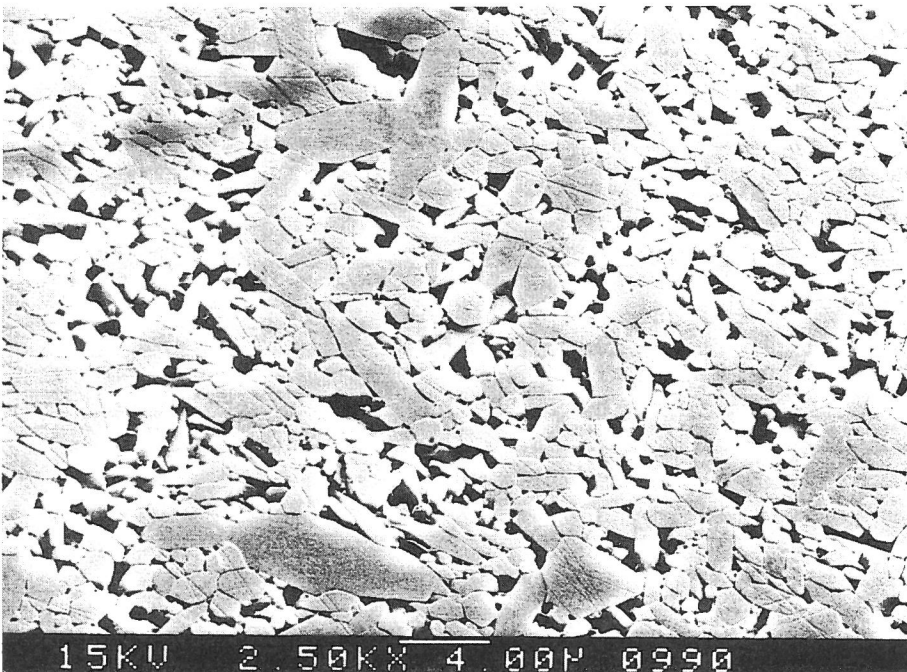
Aufgrund der relativ großen Menge von Zuschlagstoffen liegt der Glasphasenanteil des SSi₃N₄ mit ca. 21 % besonders hoch. Die Gefügebilder (s. Abb. 22) zeigen mit kochender Flußsäure geätzte Oberflächen. Das Gefüge des SSi₃N₄ (s. Abb. 22a) ist

homogen und gut verzahnt, weist jedoch Poren mit einem Durchmesser von ca. 10 μm auf. Die mittlere Korngröße liegt unter 1 μm /23/.

Beim nahezu porenfreien HIP-RBSi₃N₄ ist die sonst charakteristische β -Si₃N₄-Stäbchenform nur schwach ausgeprägt (s. Abb. 22b). Die mittlere Korngröße liegt bei 2 μm , wobei das Gefüge schlecht verzahnt ist /23/.



a



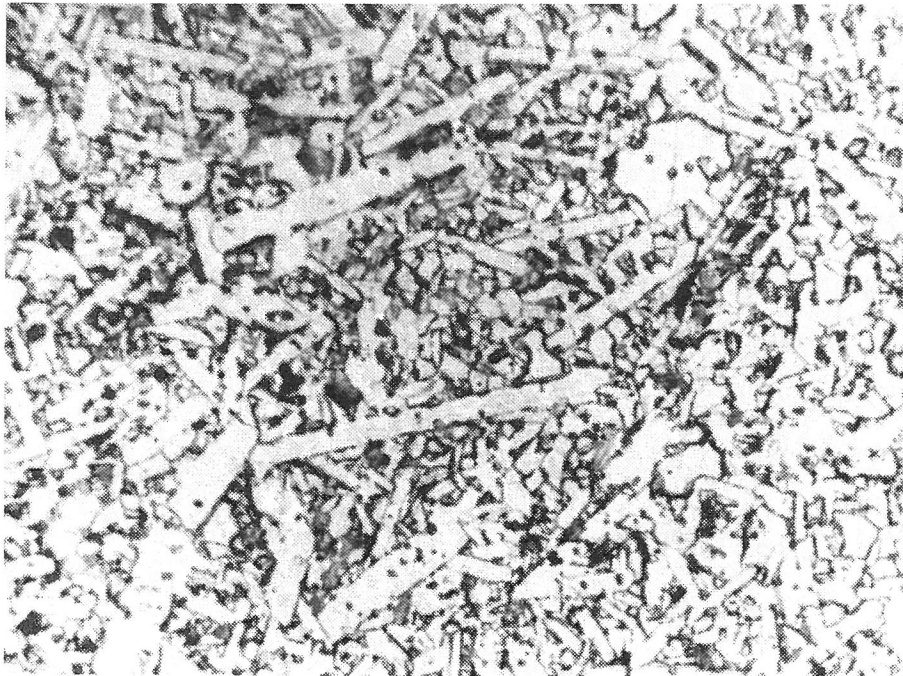
b

Abb. 22

Geätzte Gefüge von a) SSi₃N₄ (ND200), b) HIP-RBSi₃N₄ (HIP-RBSN 411) /23/

SSiC

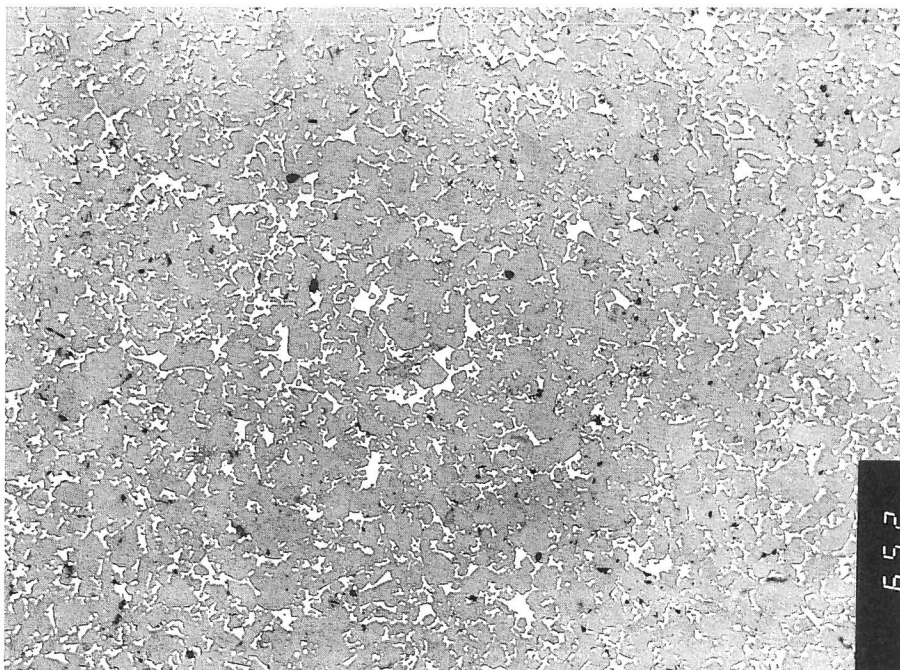
Das gesinterte Siliziumcarbid enthält über 98,5 Gew.% α -SiC, 1 Gew.% freien Kohlenstoff, 0,3 Gew.% Al sowie Spuren von Sauerstoff und Stickstoff. Die Porosität liegt unter 3,5 Vol.%, bei Porengrößen im Mikrometerbereich /10/. Das mit NaOH-Schmelze geätzte Gefüge ist in Abb. 23 dargestellt.



500:1

Abb. 23
Geätztes
Gefüge von
SSiC
(EkaSiC D)/10/

SiSiC



100:1

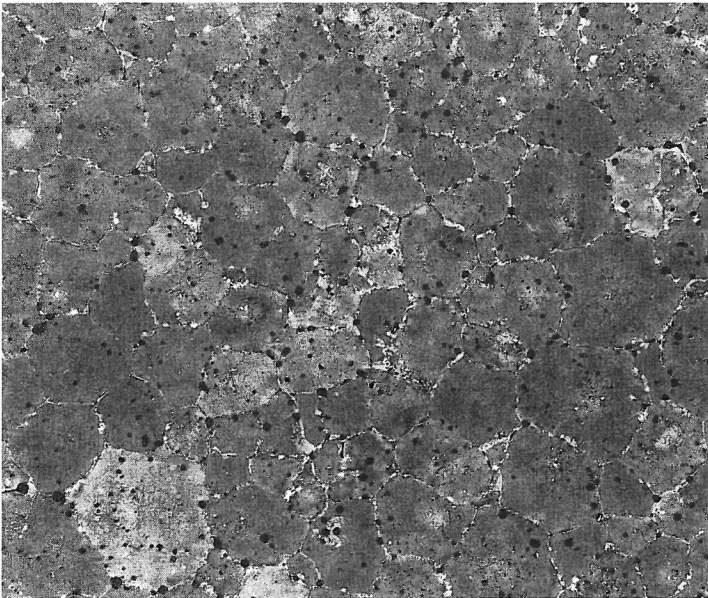
Abb. 24
Ungeätztes
Gefüge von
SiSiC-P

Das Si-infiltrierte Siliziumcarbid enthält unter 12 Gew.% freies Silizium (im Gefüge weiß), jeweils unter 0,5 Gew.% freien Kohlenstoff und andere Verunreinigungen. Der Rest ist α - und β -SiC. Die Porosität liegt unter 1 Vol.% /97/. Die

stellenweisen Ausbrüche (s. Abb. 24) sind auf die Oberflächenbearbeitung zurückzuführen.

MgO-ZrO₂

Das teilstabilisierte Zirkondioxid (PSZ) mit 3,3 Gew.% MgO (ZN40) enthält nach Herstellerangaben 5 Vol.% monoklines, 40-50 Vol.% tetragonales und als Differenz kubisches ZrO₂. Gefügeaufnahmen des MgO-ZrO₂ zeigt Abb. 25. Die polierten Probekörper wurden in 40%-iger, kochender Phosphorsäure geätzt. Die mittlere Korngröße beträgt ca. 80-95 µm. Auf den Korngrenzen erkennt man MgO-Ausscheidungen. Die Poren (schwarze Punkte im Gefüge) mit einer mittleren Größe von ca. 3-6 µm sind gleichmäßig im Gefüge verteilt /24/.

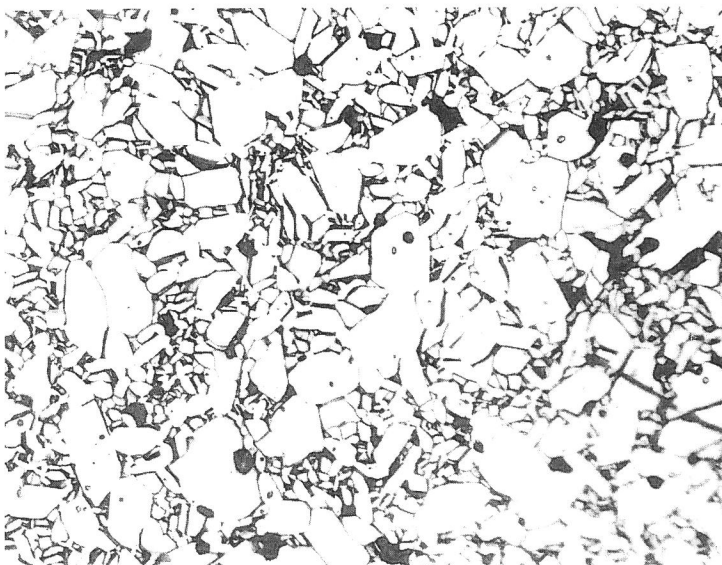


100:1

Abb. 25:
Geätztes Gefüge von
MgO-ZrO₂ (ZN40) /24/

Al₂O₃

Das hochreine Aluminiumoxid mit 99,7 Gew.% Al₂O₃ weist ein bimodales Gefüge mit mittleren Korngrößen von 2 µm und 8 µm auf. Die Porosität liegt unter 3 Vol.% /98/. Das mit Phosphorsäure geätzte Gefüge zeigt Abb. 26.



500:1

Abb. 26:
Geätztes Gefüge von
Al₂O₃ (A 1999.7), mit
Gold besputtert

4.5 Zwischenstoffe

Als Zwischenstoffe dienten deionisiertes Wasser, Salpetersäure, Schwefelsäure, Phosphorsäure, Essigsäure, Salzsäure, Perchlorsäure, Natronlauge, Kalilauge und Ammoniakwasser. Die Säuren und Laugen wurden mit deionisiertem Wasser angesetzt, wobei die Säuren auf pH 3 und die Laugen auf pH 13 eingestellt wurden. Im Fall der schwachen Base Ammoniak war es nicht möglich pH 12 zu überschreiten.

Die relative Luftfeuchtigkeit bei den Festkörperreibungsversuchen betrug 30%. Ein Klimaschrank sorgte für die definierte Feuchtigkeit des Umgebungsmediums. Zur besseren Kontrolle wurde um die Probenanordnung ein Plexiglastasten angebracht.

4.6 Untersuchungsmethoden

4.6.1 Rauheitsmessungen

Vor Versuchsbeginn wurden mit dem Hommel-Tester T20-DC der Mittenrauhwert R_a , die gemittelte Rauhtiefe R_z /99/ sowie die reduzierte Riefentiefe R_{VK} und die reduzierte Spitzenhöhe R_{PK} /100/ an vier Stellen der rotierenden Probekörper (Scheibe) gemessen. Durch die Porosität bei keramischen Werkstoffen, die als Schmierstoffreservoir durchaus von Bedeutung ist, ist die Aussagefähigkeit von R_a und R_z begrenzt. Da die Poren mitgemessen werden, verschieben sich diese Werte nach oben. Sehr sinnvoll ist dagegen die Angabe des R_{PK} -Wertes, der den Anteil der aus dem Kernprofil herausragenden Profilsitzen kennzeichnet. Mit dieser Kenngröße werden Eigenschaften des Profils in bezug auf das "Einlaufverhalten" von geschmierten Gleit- und Wälzflächen beschrieben /100/.

Die Probekörper waren einheitlich poliert, um den Einfluß der Rauheit auszuschließen. In Tab. 3 sind die Rauheitskennwerte zusammengefaßt.

4.6.2 Nachuntersuchungen der Probekörper

4.6.2.1 Berechnung der Verschleißvolumina von Grund- und Gegenkörper /23/

Grundkörper

Nach Versuchsende wurden am Grundkörper (stationärer Probekörper) die Kalottendurchmesser a und b [mm] lichtmikroskopisch vermessen (s. Abb. 27). Bedingt durch die Probengeometrie ergeben sich im idealen Verschleißfall parabolische Kalotten mit einem a/b -Verhältnis von 1,87.

Sowohl der gemessene a - als auch b -Wert lassen sich mit Gleichung (5) in eine Kalottenhöhe h [mm] umrechnen.

$$h_a = \frac{d_a}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_a}{2}\right)^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} = h_b = \frac{d_b}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_b}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (5)$$

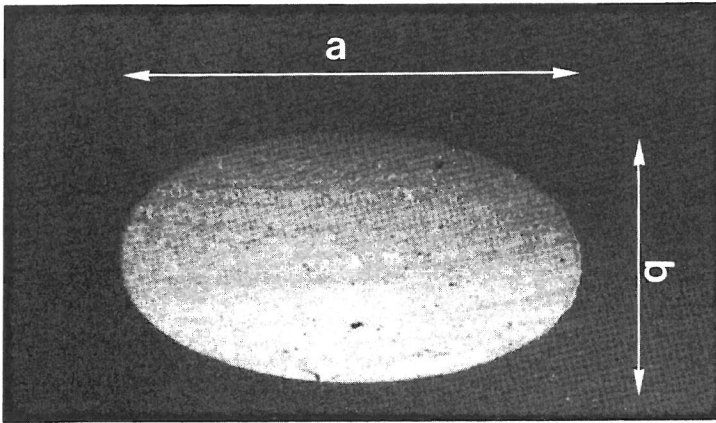


Abb. 27:
Verschleißkalotte
eines Grundkörpers
nach tribologischer
Beanspruchung

mit $d_a = 42$ mm und $d_b = 12$ mm. Dabei ist a der Kalottendurchmesser in Gleitrichtung bzw. parallel zum Probekörperdurchmesser d_a und b der Kalottendurchmesser parallel zum Probekörperdurchmesser d_b .

Aus der Kalottenhöhe h ergibt sich das Verschleißvolumen W_v [mm³] des stationären Probekörpers durch folgende Beziehung:

$$W_v = \frac{\pi}{6} \cdot h^2 \cdot (3 \cdot \sqrt{2 \cdot r_a' + 2 \cdot r_b - h} \cdot \sqrt{2 \cdot r_b - h} + h) \quad (6)$$

mit $r_a' = r_a - r = 15$ mm ($r_a = 21$ mm, $r_b = 6$ mm), wobei r_a und r_b die Probekörperradien darstellen.

Gegenkörper

Mit dem Hommel-Tester T20-DC wurden die Verschleißspuren der Gegenkörper (rotierende Probekörper) vermessen. An vier um 90° verdrehten Stellen wurde der planimetrische Verschleißbetrag W_p (μm²) ermittelt. Das Scheiben-Verschleißvolumen W_v [mm³] ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$W_v = \pi \cdot d \cdot W_p \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

Der mittlere Durchmesser der Verschleißspur d [mm] wird lichtmikroskopisch ausgemessen. Aus den Tastschnittschieben (s. Abb. 28) kann zusätzlich die Spurtiefe und Auftragshöhe ermittelt werden.

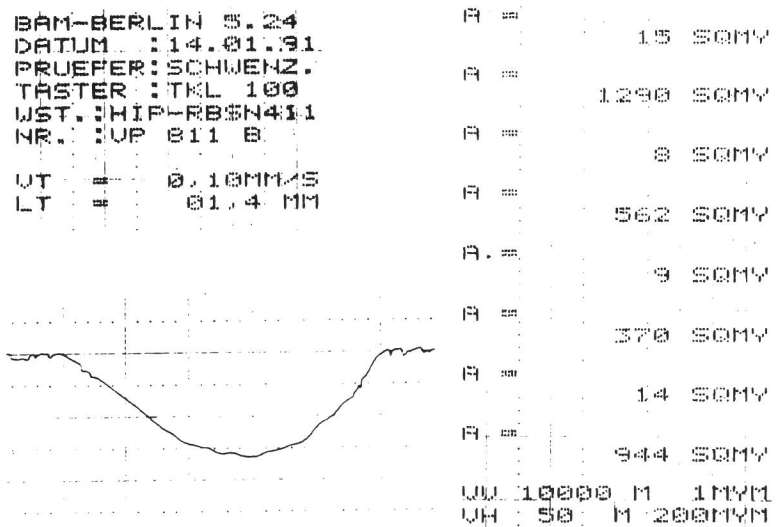


Abb. 28
Tastschnittmessung
in der Verschleißspur

5. Ergebnisse

Die zeitlichen Verläufe der Reibungszahl f , des Stiftverschleißvolumens W_v und der Zwischenstofftemperatur T werden graphisch dargestellt. Zusätzlich sind Reibungszahl f und Verschleißkoeffizient k_v für alle durchgeführten Versuche in Form von Balkendiagrammen aufgetragen. Die Darstellungen von f und k_v , nach Werkstoffen unterteilt, werden im folgenden besprochen. Die Datensätze aller durchgeführten Versuche sind im Anhang aufgeführt (s. Tab. 8-13).

5.1 Reibung

5.1.1 SSi_3N_4 und HIP-RBSi₃N₄

Die Si_3N_4 -Werkstoffe nehmen in Bezug auf das Reibungsverhalten eine Sonderstellung ein. Deutlich wird dies an den zeitlichen Verläufen der Reibungszahlen (s. Abb. 29+30). Einem hohen Anfangswert - in Wasser beträgt die Reibungszahl nach 100 m Laufweg 0,45 - steht nach der vollen Distanz eine Reibungszahl unter 0,1 gegenüber (s. Abb. 31+32). Dieser Abfall tritt in allen Medien auf. Wann es zum Abfall der Reibungszahl sowie deren konstantem Verlauf auf niedrigem Niveau kommt, ist anhand der durchgeführten Versuche nicht vorherzusagen.

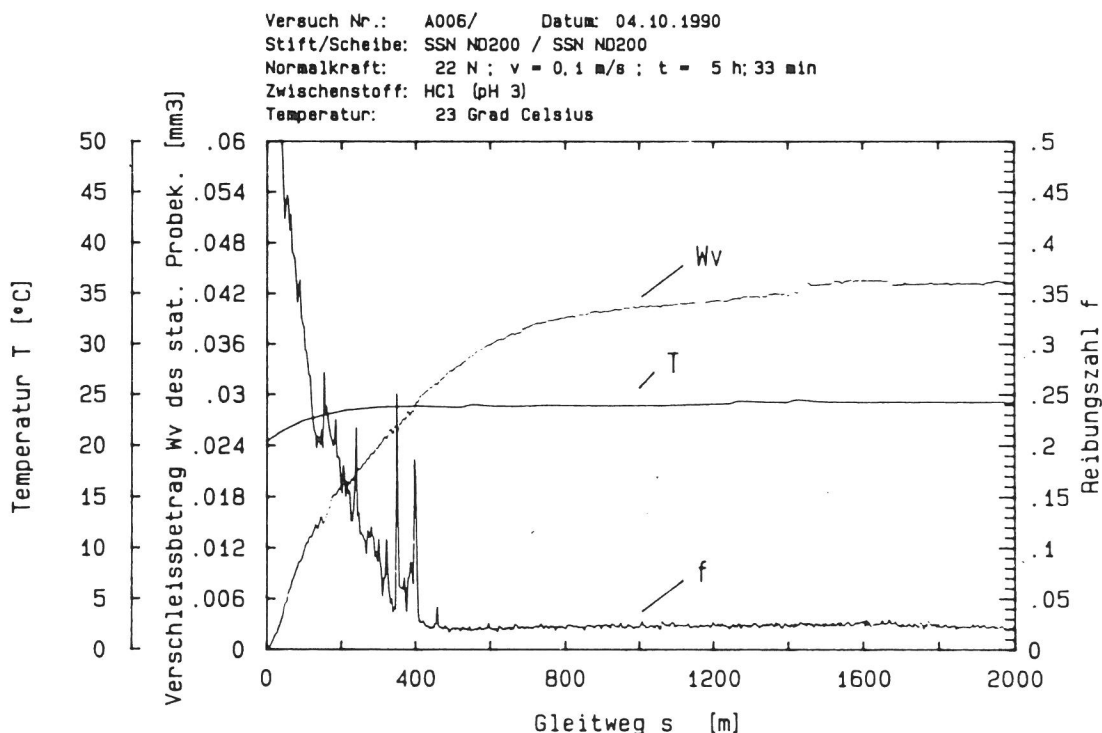


Abb. 29

Reibungszahl, Stiftverschleißvolumen und Zwischenstofftemperatur in Abhängigkeit vom Gleitweg, SSi_3N_4/SSi_3N_4 -Gleitpaarung in HCl

Versuch Nr.: A011/ Datum: 6.11.1990
 Stift/Scheibe: SSN ND200 / SSN ND200
 Normalkraft: 22 N; $v = 0,1 \text{ m/s}$; $t = 5 \text{ h}; 33 \text{ min}$
 Zwischenstoff: NH_4OH (pH 12)
 Temperatur: 23 Grad Celsius

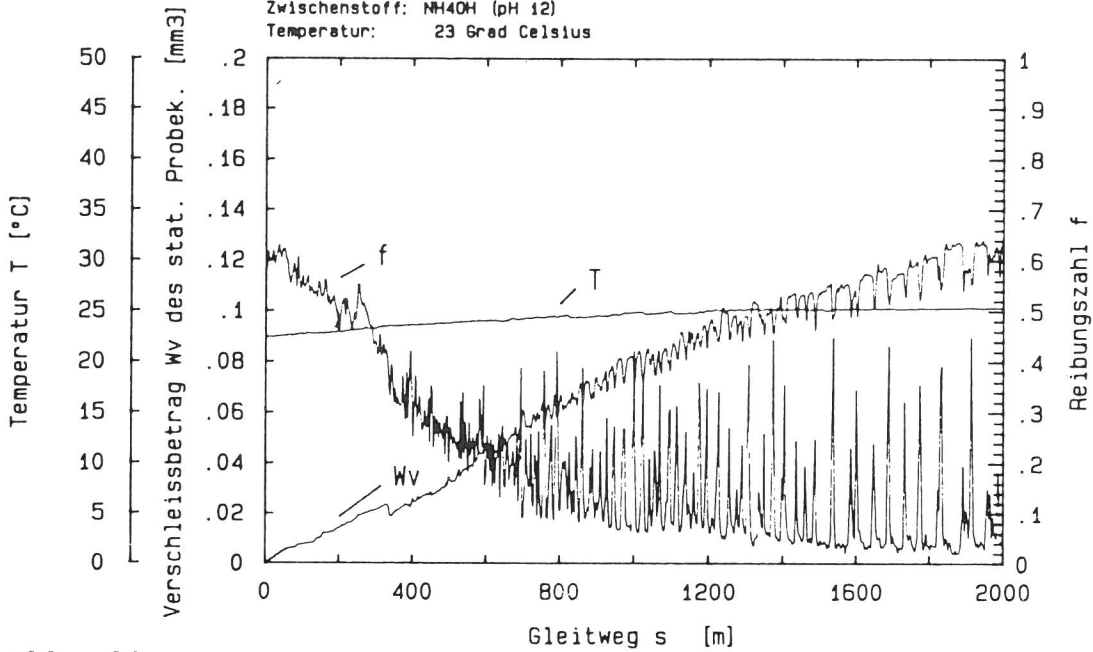


Abb. 30
 Reibungszahl, Stiftverschleißvolumen und Zwischenstofftemperatur
 in Abhängigkeit vom Gleitweg, $\text{SSi}_3\text{N}_4/\text{SSi}_3\text{N}_4$ -Gleitpaarung in NH_4OH

Es kann auch nach längerem Laufweg wieder zu einem plötzlichen, kurzzeitigen Anstieg der Reibungszahl kommen. Ist die Reibungszahl nach 2000 m Laufweg noch nicht stationär, sind die Peakhöhen durch Pfeile auf den entsprechenden Balken gekennzeichnet (s. Abb. 30).

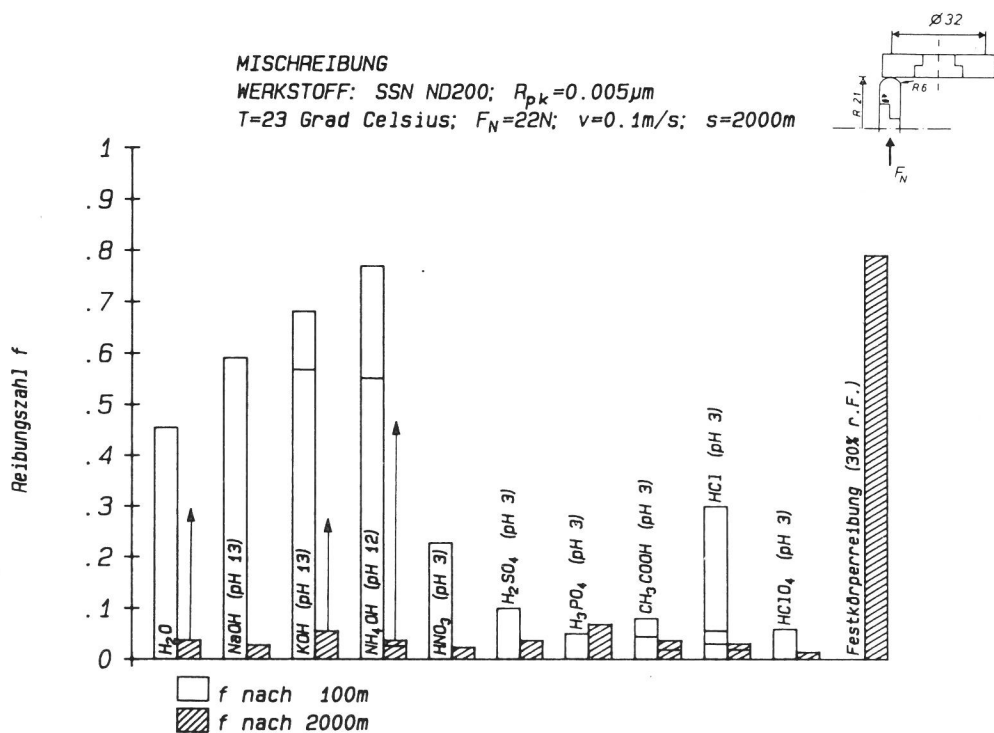


Abb. 31
 Mischreibungszahlen von $\text{SSi}_3\text{N}_4/\text{SSi}_3\text{N}_4$ -Gleitpaarungen

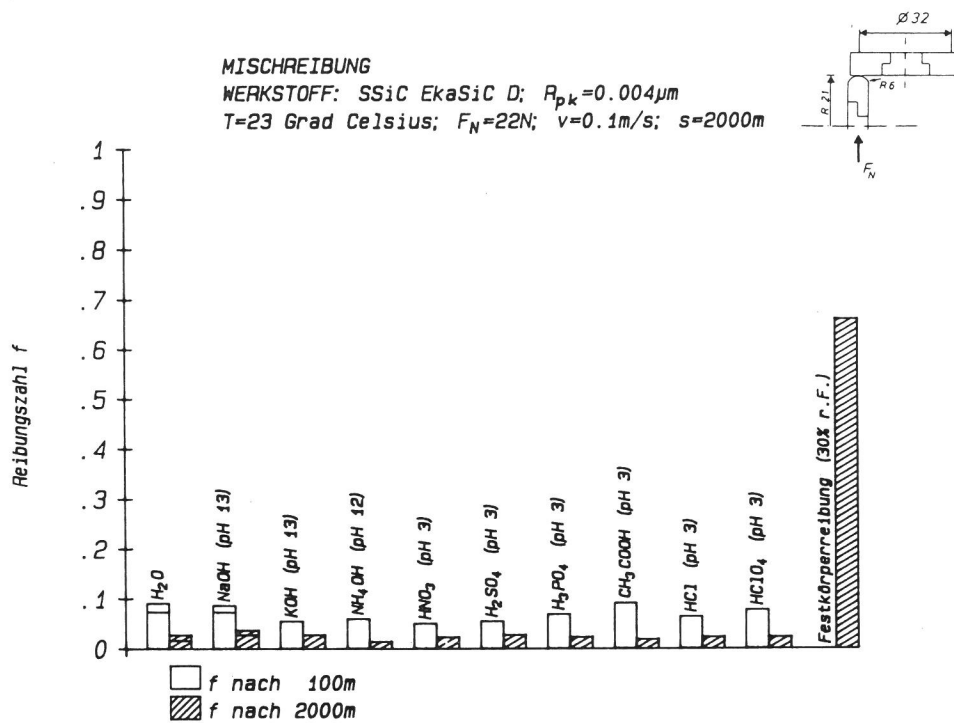


Abb. 32
 Mischreibungszahlen von HIP-RBSi₃N₄/HIP-RBSi₃N₄-Gleitpaarungen

5.1.2 SSiC

So gut wie keine Abhängigkeit vom Zwischenstoff zeigt das Reibungsverhalten von SSiC. Die Reibungszahlen liegen nach 100 m Laufweg zwischen 0,09 und 0,05, nach 2000 m Laufweg sinken die Reibungszahlen auf Werte zwischen 0,04 und 0,01. Die Festkörperlagerungszahl liegt bei 0,6 (s. Abb. 33).

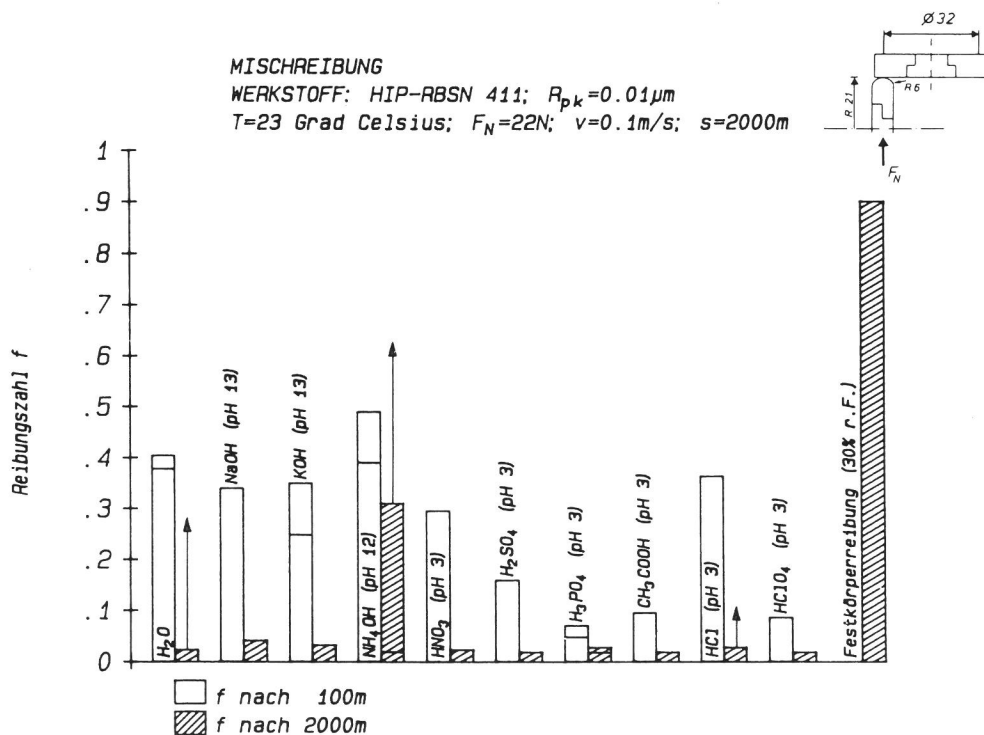


Abb. 33
 Mischreibungszahlen von SSiC/SSiC-Gleitpaarungen

5.1.3 SiSiC

Betrachtet man die Festkörperreibungszahl von 0,6 und das ähnliche Verhalten in allen Medien, ist das SiSiC mit SSiC vergleichbar. Sowohl die Anfangs- als auch die Endreibungszahlen liegen auf einem höheren Niveau ($f=0,15-0,20$) als bei SSiC-Gleitpaarungen. Außerdem nimmt die Reibungszahl kaum mit dem Gleitweg ab (s. Abb. 34).

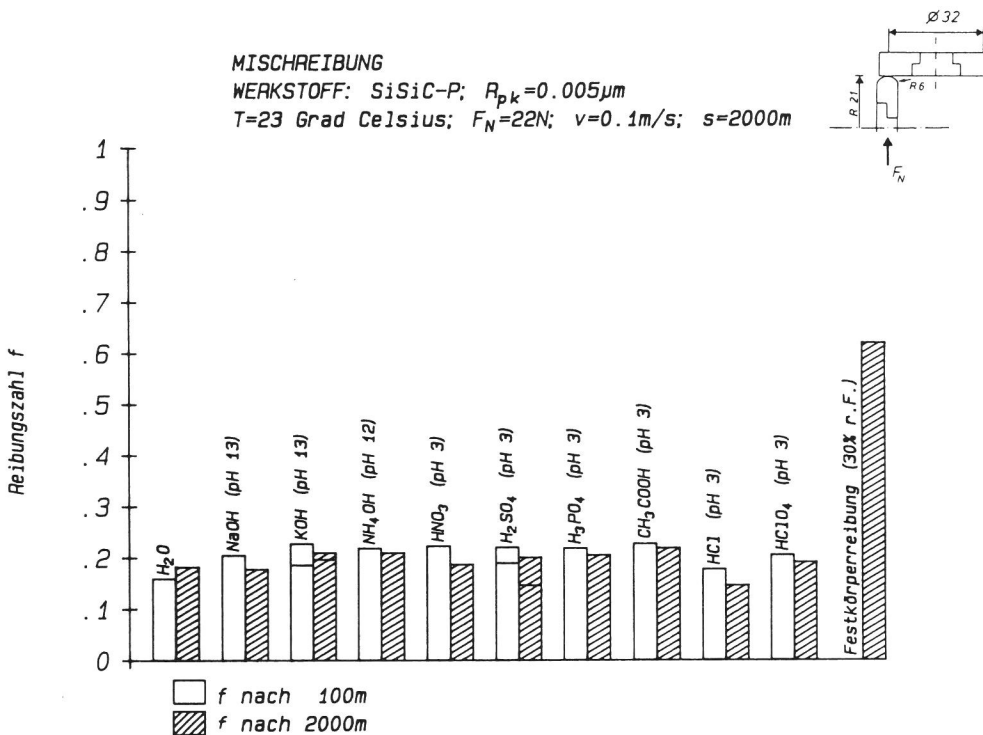


Abb. 34
 Mischreibungszahlen von SiSiC/SiSiC-Gleitpaarungen

5.1.4 MgO-ZrO₂

Ein sehr ungünstiges Reibungsverhalten weisen die MgO-ZrO₂-Gleitpaarungen auf. Die gemessenen Reibungszahlen schwanken in einem sehr großen Bereich, wobei der größte Wert nach 2000 m Laufweg im Zwischenstoff H₂SO₄ mit 0,7 gemessen wurde. Die Reibungszahl im Medium CH₃COOH beträgt dagegen nur 0,18 bzw. 0,28. Die Meßwerte nach 100 m Laufweg liegen in jedem Fall höher als nach 2000 m. Zieht man die Festkörperreibungszahl von 0,9 in Betracht, ist dennoch eine Reibungsminderung in den wässrigen Medien festzustellen (s. Abb. 35).

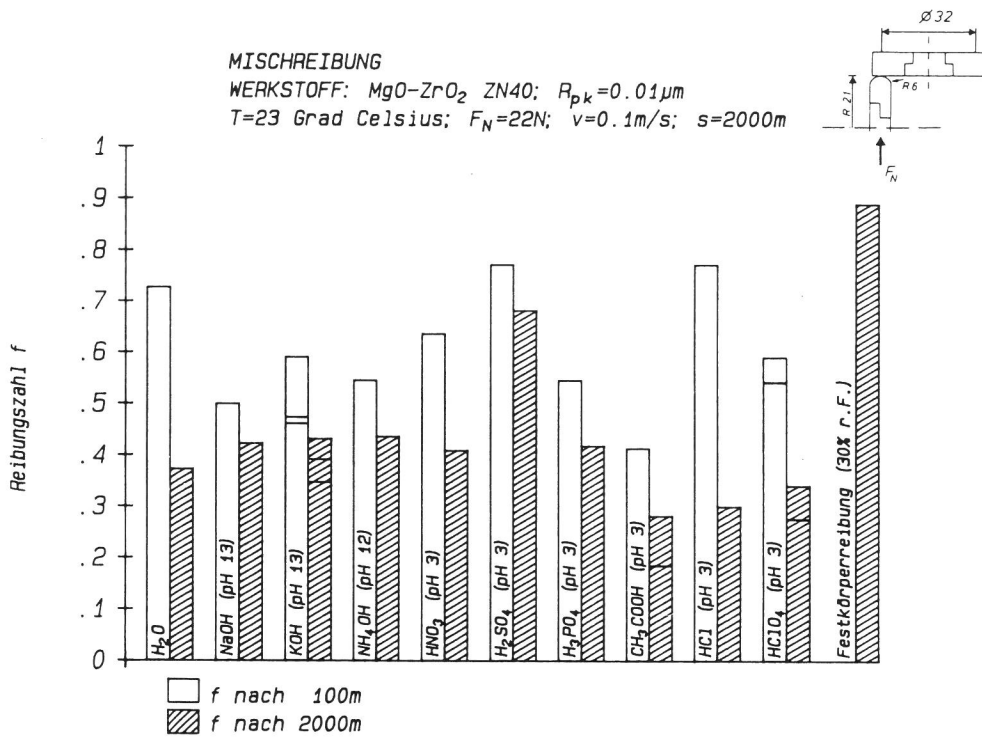


Abb. 35
 Mischreibungszahlen von MgO-ZrO₂/MgO-ZrO₂- Gleitpaarungen

5.1.5 Al₂O₃

Auch bei Al₂O₃ ist das Reibungsverhalten zumindest in den sauren und basischen Zwischenstoffen ähnlich, wobei Reibungszahlen zwischen 0,13 und 0,19 gemessen wurden.

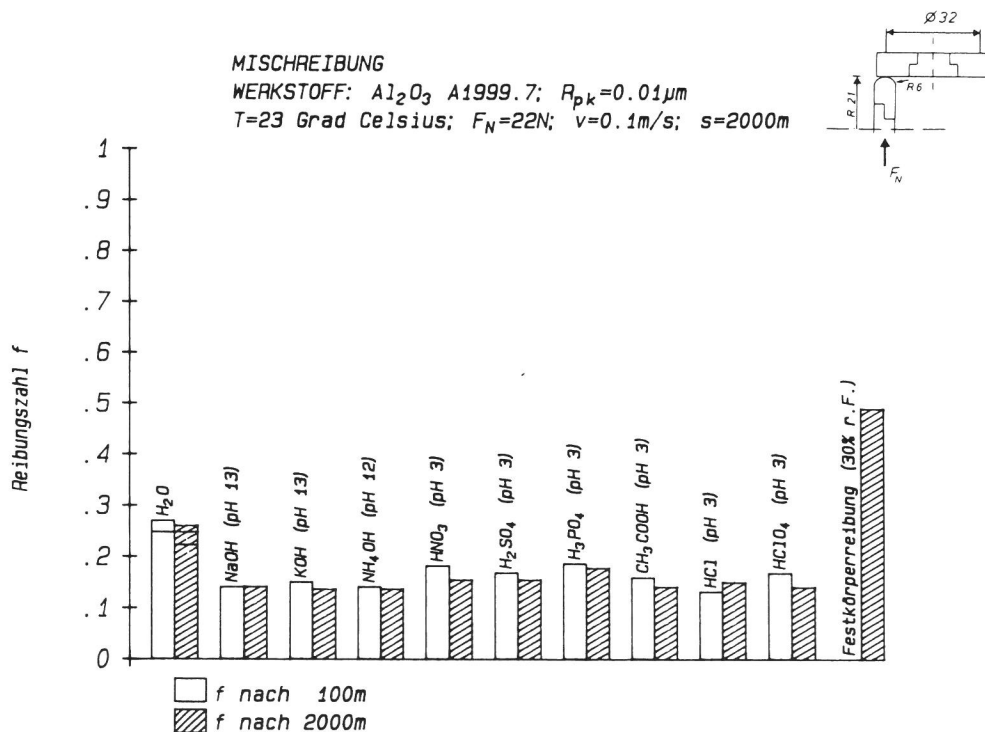


Abb. 36
 Mischreibungszahlen von Al₂O₃/Al₂O₃-Gleitpaarungen

In Wasser variieren die Werte zwischen 0,22 und 0,27. Die Meßwerte nach 100 m und 2000 m Laufweg liegen fast unverändert auf gleichem Niveau. Für den Fall der Festkörperreibung ergibt sich eine Reibungszahl von 0,5 (s. Abb. 36).

5.2 Verschleiß

Die zwischen 0 und 2000 m Laufweg ermittelten Verschleißkoeffizienten des stationären und rotierenden Probekörpers sind in Abhängigkeit vom Zwischenstoff in den Abb. 37-39,41,43,44 aufgetragen. Die getrennte Darstellung nach Stift und Scheibe macht Einflüsse des Eingriffsverhältnisses deutlich, sofern Unterschiede zwischen beiden Probekörpern auftreten. Neben den Meßwerten der Wiederholungsversuche sind die differentiellen Verschleißkoeffizienten bei Versuchsende eingetragen. Diese konnten näherungsweise anhand der Steigung im letzten Abschnitt der Verschleißvolumen(W_v)-Laufweg(s)-Kurven (s. Abb. 29,30,40,42,45) berechnet werden. Bedeutsam ist der differentielle Verschleißkoeffizient nur für die Si_3N_4 -Werkstoffe und $SSiC$, wo die mit dem Laufweg abnehmende geometrische Flächenpressung das Verschleißverhalten beeinflusst. Die Flächenpressung verringert sich aufgrund der verschleißbedingten Vergrößerung der zunächst punktförmigen Reibfläche des stationären Probekörpers. Der degressive Verlauf der W_v -s-Kurve (s. Abb. 29,30,40) hat bei diesen Werkstoffen eine Verringerung des differentiellen gegenüber dem über den gesamten Laufweg ermittelten Verschleißkoeffizienten zur Folge, d.h. Paarungen dieser Werkstoffe zeigen ein Einlaufverhalten. Ist der Verlauf linear, bedeutet dies, daß trotz abnehmender Flächenpressung die Verschleißrate konstant bleibt. Ein Einfluß der Pressung kann somit ausgeschlossen werden. Die W_v -s-Kurven wurden aus dem Verlauf des kontinuierlich gemessenen, linearen Verschleißbetrages und dem, mit dem Meßmikroskop ermittelten, linearen Verschleißbetrag am stationären Probekörper zurückgerechnet. Da der lineare Verschleißbetrag, aufgrund seines Eingriffsverhältnisses von 100%, zu 95% dem stationären Probekörper zuzuordnen ist, finden sich die Angaben für den differentiellen Verschleißkoeffizienten auch nur in den entsprechenden Balken (s. Abb. 37-39). Das Eingriffsverhältnis des rotierenden Probekörpers liegt unter 2%. Demzufolge kann der Anteil am kontinuierlichen gemessenen, linearen Verschleißbetrag vernachlässigt werden /24/.

5.2.1 SSi_3N_4 und HIP-RBSi₃N₄

Die Werte für die über den gesamten Laufweg ermittelten Verschleißkoeffizienten bewegen sich für SSi_3N_4 und HIP-RBSi₃N₄ im Bereich 10^{-7} bis 10^{-6} mm³/Nm (s. Abb. 37+38). In allen Medien liegen sie für den rotierenden Probekörper etwas höher als für den stationären Probekörper. Allgemeingültige Aussagen über die Höhe des Verschleißkoeffizienten in Abhängigkeit vom

Zwischenstoff sind schwer zu machen. Für beide Si_3N_4 -Modifikationen resultieren die größten Werte aus den Versuchen in Wasser, Ammoniakwasser und Salzsäure. Davon abweichend liegen für SSi_3N_4 in Salzsäure die Verschleißkoeffizienten zweier Wiederholungsversuche um fast eine Größenordnung niedriger. Die in Natron- und Kalilauge ermittelten Werte für HIP-RBSi₃N₄ sind wesentlich kleiner als die entsprechenden Meßwerte der SSi_3N_4 -Paarungen. Zieht man Abb. 29+30 in Betracht, fällt auf, daß der zeitliche Verlauf des Verschleißvolumens und der Reibungszahl in engem Zusammenhang stehen. Eine Abnahme der Reibungszahl sowie starke Schwankungen im Reibungszahlverlauf sind mit einem Anstieg des Verschleißvolumens gekoppelt.

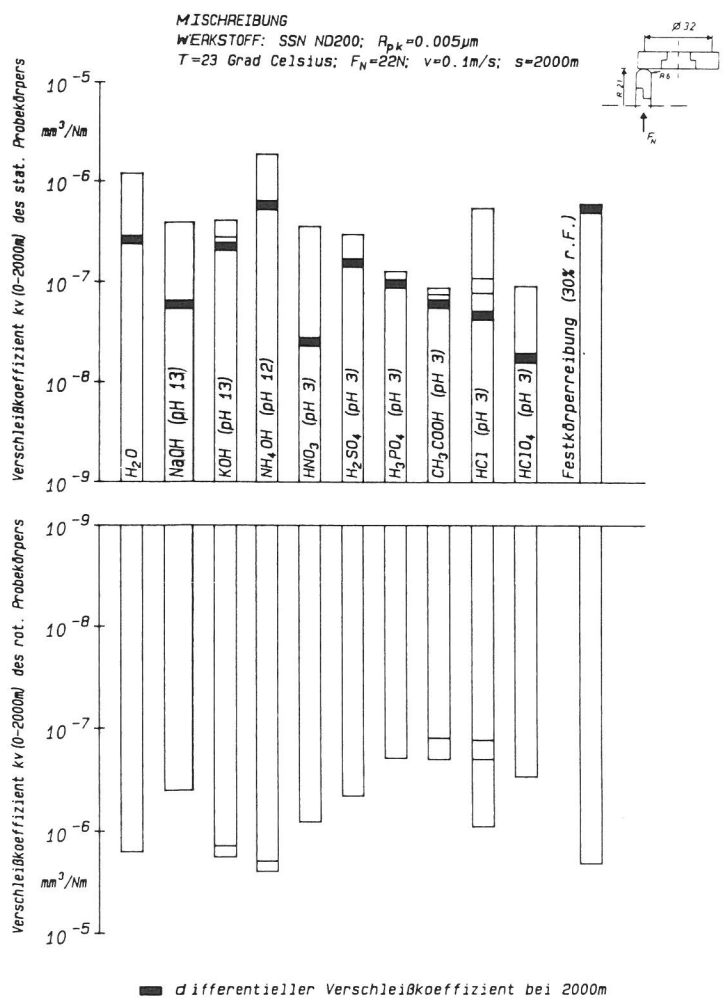


Abb. 37
 Verschleißkoeffizienten von Grund- und Gegenkörper für $\text{SSi}_3\text{N}_4/\text{SSi}_3\text{N}_4$ -Gleitpaarungen unter Mischreibung

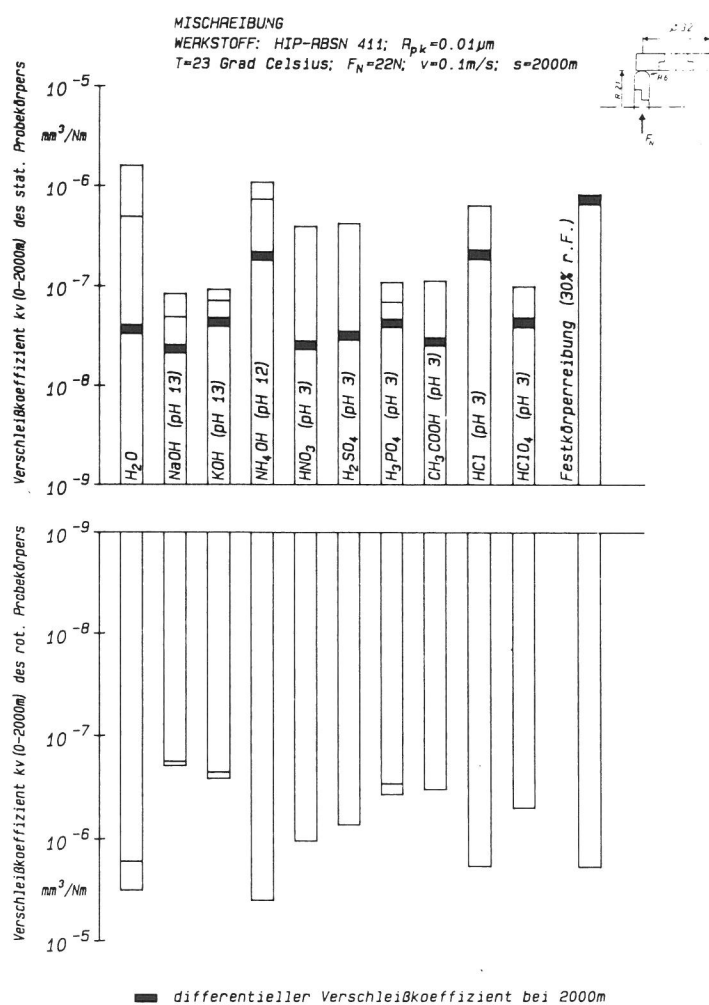


Abb. 38
 Verschleißkoeffizienten von Grund- und Gegenkörper für HIP-RBSi₃N₄/HIP-RBSi₃N₄-Gleitpaarungen unter Mischreibung

5.2.2 SSiC

Das Verschleißverhalten von SSiC zeigt in den unterschiedlichen Medien keine großen Unterschiede (s. Abb. 39). Der Verschleißkoeffizient von 10^{-6} mm³/Nm für Festkörperreibung halbiert sich bei Mischreibung. Diese Angaben beziehen sich auf den stationären Probekörper. Im Gegensatz zu den Si₃N₄-Werkstoffen verschleißt im Fall von SSiC der rotierende Probekörper etwas weniger. Charakteristisch für SSiC ist ein degressiver W_v-s-Verlauf, d.h. ein pressungsabhängiges Einlaufverhalten (s. Abb. 40). Somit liegt der differentielle Verschleißkoeffizient bei Versuchsende grundsätzlich niedriger als der aus dem gesamten Laufweg ermittelte Verschleißkoeffizient.

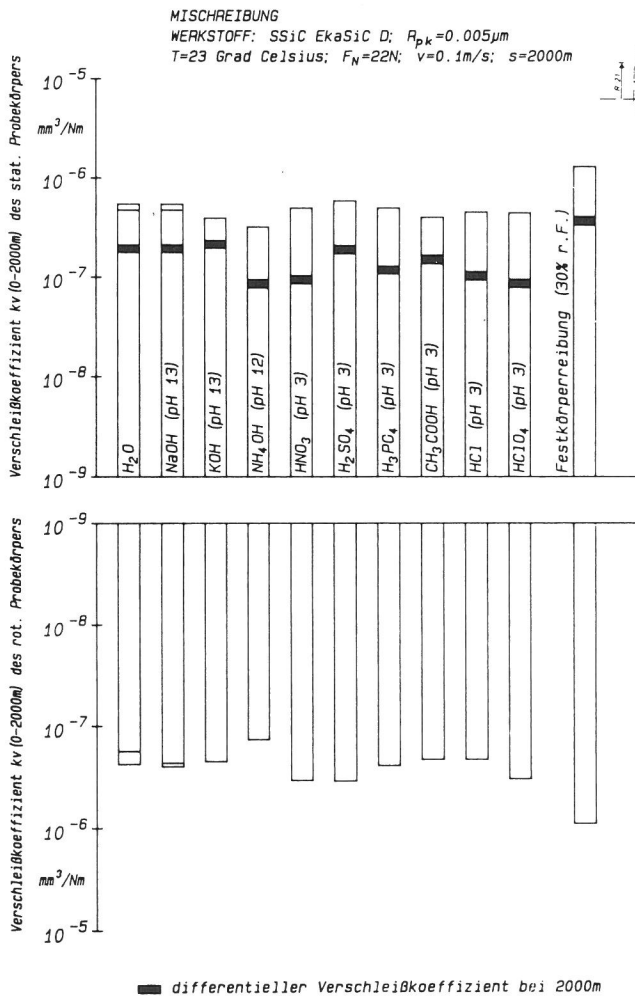


Abb. 39
 Verschleißkoeffizienten
 von Grund- und Gegenkörper
 für SSiC/SSiC-
 Gleitpaarungen
 unter Mischreibung

Versuch Nr.: B002/ Datum: 19.09.1990
 Stift/Scheibe: SSiC EkaSiC D / SSiC EkaSiC D
 Normalkraft: 22 N; $v = 0,1 \text{ m/s}$; $t = 5 \text{ h}; 33 \text{ min}$
 Zwischenstoff: NaOH (pH 13)
 Temperatur: 23 Grad Celsius

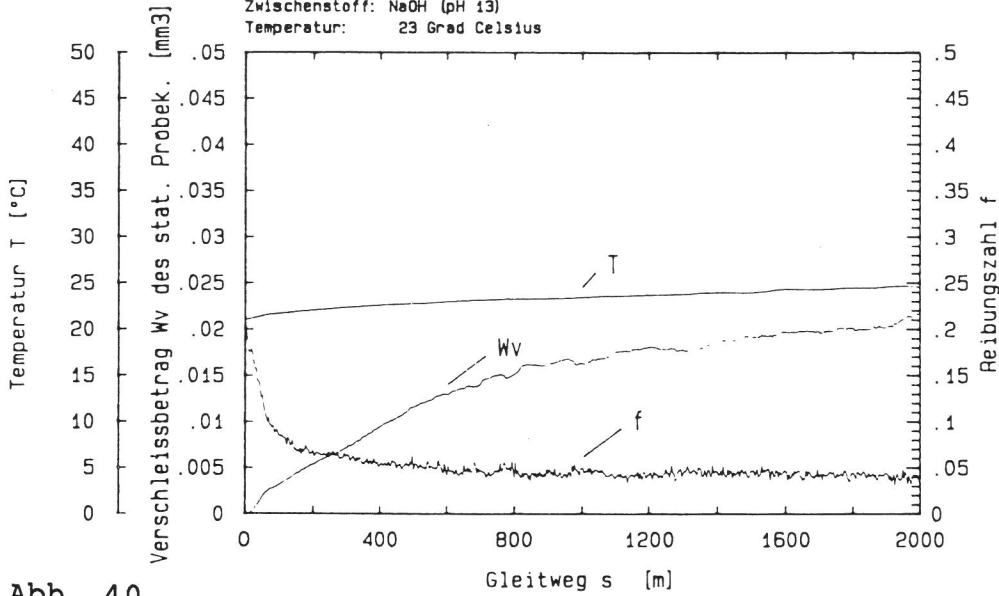


Abb. 40

Reibungszahl, Stiftverschleißvolumen und Zwischenstofftemperatur in Abhängigkeit vom Gleitweg, SSiC/SSiC-Gleitpaarung in NaOH

5.2.3 SiSiC

Im Schnitt eine Größenordnung höher liegen die Verschleißkoeffizienten für SiSiC, wobei sich die Werte für stationären und rotierenden Probekörper kaum unterscheiden (s. Abb. 41). Eine Besonderheit stellt das etwas bessere Verschleißverhalten bei Festkörperreibung dar. Unter beiden Reibungszuständen steigt das Verschleißvolumen linear mit dem Laufweg an (s. Abb. 42).

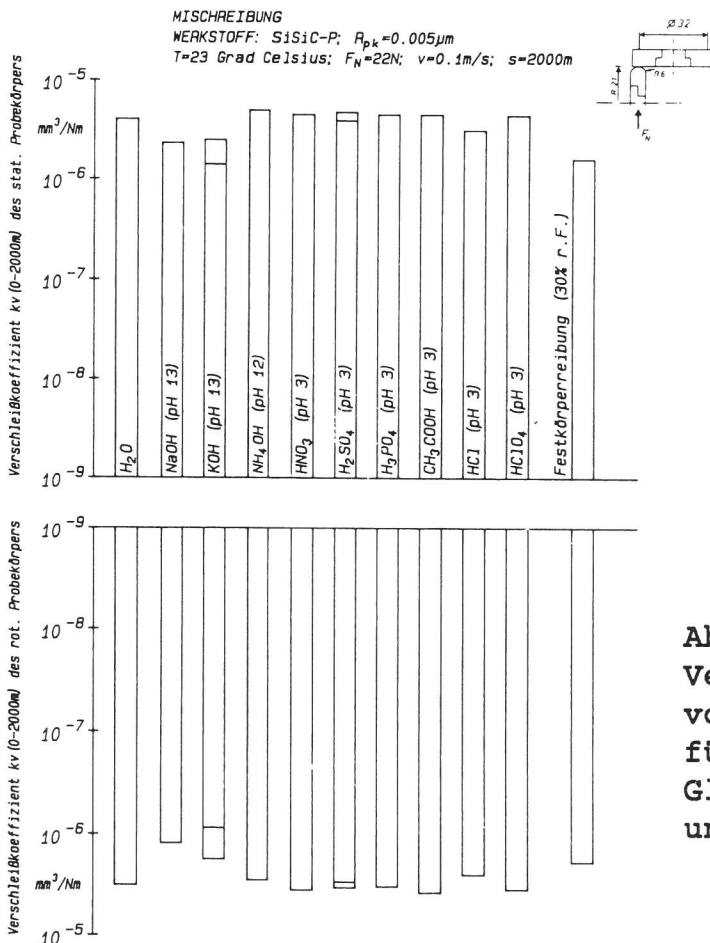


Abb. 41
 Verschleißkoeffizienten von Grund- und Gegenkörper für SiSiC/SiSiC-Gleitpaarungen unter Mischreibung

Versuch Nr.: B104/ Datum: 08.10.1990
 Stift/Scheibe: SiSiC-P / SiSiC-P
 Normalkraft: 22 N ; v = 0.1 m/s ; t = 5 h; 33 min
 Zwischenstoff: HCl (pH 3)
 Temperatur: 23 Grad Celsius

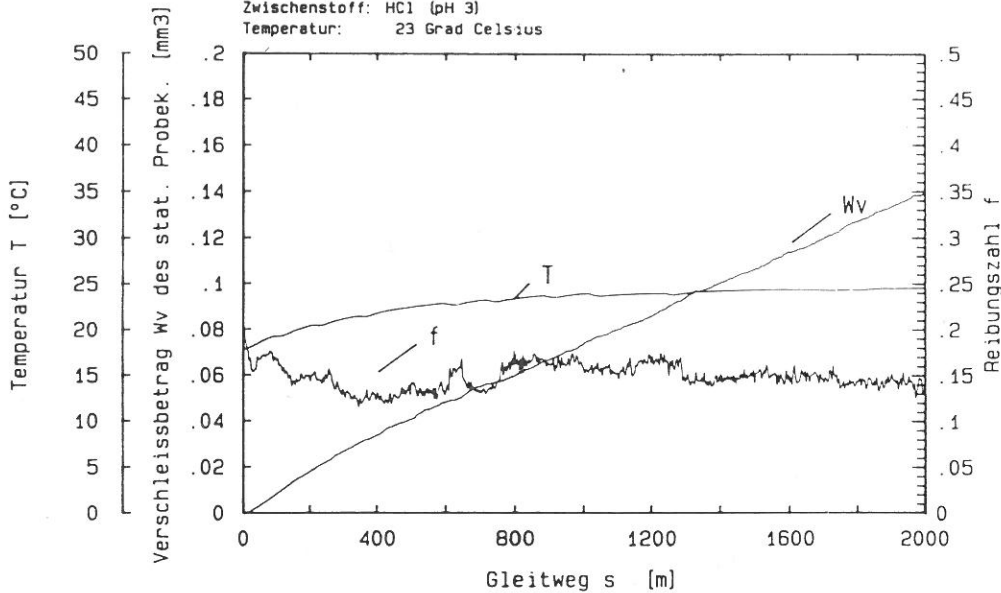


Abb. 42

Reibungszahl, Stiftverschleißvolumen und Zwischenstofftemperatur in Abhängigkeit vom Gleitweg, SiSiC/SiSiC-Gleitpaarung in HCl

5.2.4 MgO-ZrO₂

Ein deutlicher Rückgang der Verschleißbeträge bei Mischreibung gegenüber Festkörperreibung ist bei MgO-ZrO₂ zu erkennen (Abb. 43). Der bei Festkörperreibung ermittelte Wert des Verschleißkoeffizienten liegt für stationären und rotierenden Probekörper jeweils über 10^{-5} mm³/Nm. In Kalilauge tritt eine Verminderung um drei Größenordnungen auf. Im gleichen Medium ergab ein weiterer Versuch einen über eine Zehnerpotenz höheren Verschleißkoeffizienten. Die Werte für die anderen Medien liegen zwischen diesen beiden Extremen. In der Regel stimmen Verschleißkoeffizient für stationären und rotierenden Probekörper überein, in Wasser verschleißt der rotierende Probekörper etwas weniger als in den anderen Medien. Weitestgehende Übereinstimmung besteht auch mit dem differentiellen Verschleißkoeffizienten.

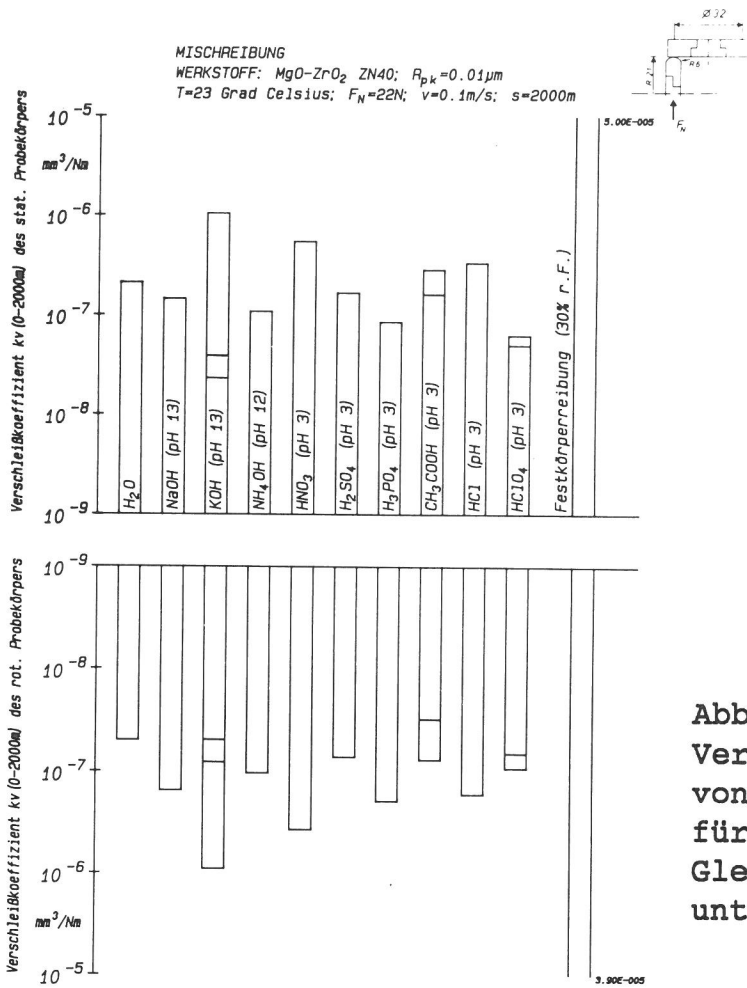


Abb. 43
 Verschleißkoeffizienten
 von Grund- und Gegenkörper
 für MgO-ZrO₂/MgO-ZrO₂-
 Gleitpaarungen
 unter Mischreibung

5.2.5 Al₂O₃

Al₂O₃ zeigt ein besonderes Verschleißverhalten (s. Abb. 44). Bei Festkörperreibung und im Medium Wasser ergeben sich die mit Abstand niedrigsten Verschleißkoeffizienten aller untersuchten Gleitpaarungen. Werten unter 10⁻⁸ mm³/Nm für den stationären und um eine Größenordnung höhere für den rotierenden Probekörper stehen Verschleißkoeffizienten um 10⁻⁷ mm³/Nm für die anderen Zwischenstoffe gegenüber. In den Säuren und Laugen ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Werten für stationären und rotierenden Probekörper. Der lineare Verlauf der W_v-s-Kurve (s. Abb. 45) deutet auch bei Al₂O₃ auf den fehlenden Pressungseinfluß hin, wobei eine Aussage über den W_v-s-Verlauf im wassergeschmierten Fall, aufgrund des sehr geringen Verschleißvolumens, nicht möglich ist.

MISCHREIBUNG
 WERKSTOFF: Al₂O₃ A1999.7; R_{pk}=0.01µm
 T=23 Grad Celsius; F_N=22N; v=0.1m/s; s=2000m

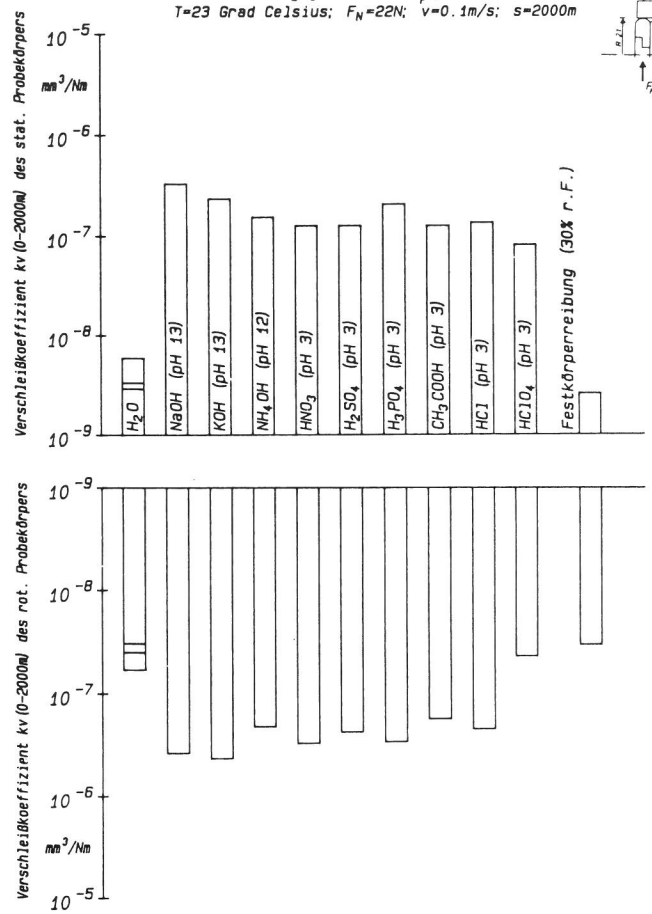
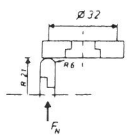


Abb. 44
 Verschleißkoeffizienten
 von Grund- und Gegenkörper
 für Al₂O₃/Al₂O₃-
 Gleitpaarungen
 unter Mischreibung

Versuch Nr.: D002/ Datum 24.09.1990
 Stift/Scheibe: Al203 A1999.7 / Al203 A1999.7
 Normalkraft: 22 N ; v = 0,1 m/s ; t = 5 h; 33 min
 Zwischenstoff: NaOH (pH 13)
 Temperatur: 23 Grad Celsius

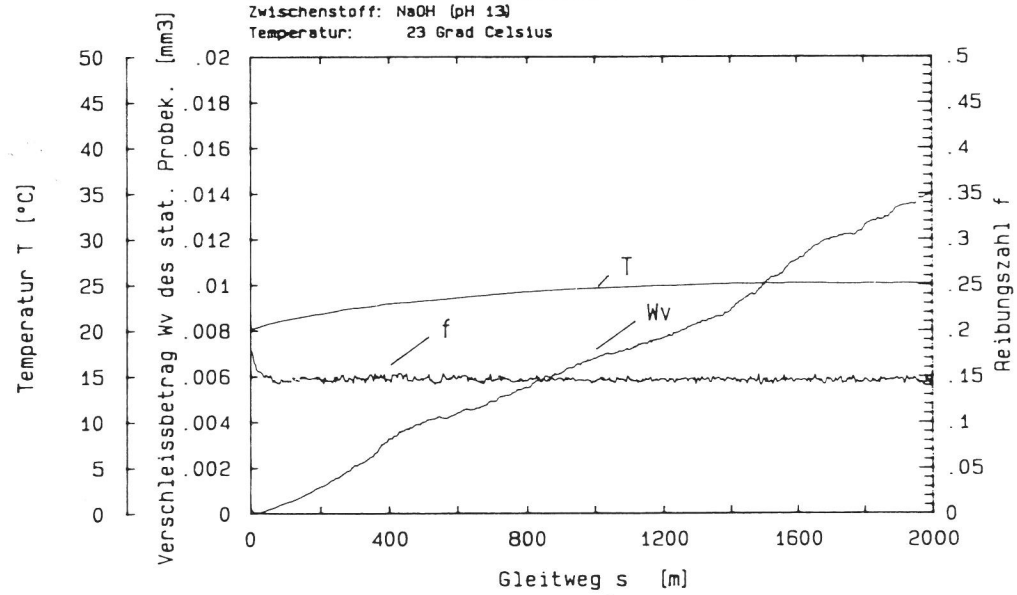


Abb. 45
 Reibungszahl, Stiftverschleißvolumen und Zwischenstofftemperatur in Abhängigkeit vom Gleitweg, Al₂O₃/Al₂O₃-Gleitpaarung in NaOH

5.3 Verschleißerscheinungsformen

Die Untersuchung der makroskopischen Erscheinung der Verschleißmechanismen erfolgte mittels rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen. Die REM-Untersuchungen wurden im BAM-Lab. 5.33 durchgeführt. Die REM-Aufnahmen sind im Anschluß an Kap. 5.3.5 zusammengestellt.

5.3.1 Morphologie der Verschleißflächen von Si_3N_4 -Gleitpaarungen

Die folgende Auswahl von REM-Aufnahmen zeigt nur Verschleißflächen von SSi_3N_4 -Probekörpern, da sich die Verschleißerscheinungsformen von SSi_3N_4 und HIP-RBSi₃N₄ gleichen. Es sind geglättete Verschleißflächen auf rotierendem Probekörper (s. Abb. 46a) und stationärem Probekörper (s. Abb. 46b) zu erkennen. Stellenweise kennzeichnen Delamination (s. Abb. 46c), plastisch verformte Oberflächenbereiche (s. Abb. 46d) und Mikrobrüche (s. Abb. 46e) die Verschleißflächen. Vergleichende Rauheitsmessungen in und neben der Verschleißspur von SSi_3N_4 -Probekörpern bestätigen die tribologisch bedingte Glättung der Verschleißflächen. Während die R_{PK} -Werte nahezu unverändert bleiben (ca. 0,01 μm), sinken die R_{VK} -Werte in der Verschleißspur von 0,5 μm auf 0,1 μm .

5.3.2 Morphologie der Verschleißflächen von SSiC -Gleitpaarungen

Die Verschleißflächen beider Probekörper sind stark geglättet. Es sind lediglich leichte Riefen zu erkennen (s. Abb. 47a-d). Die Glättung der Verschleißflächen kann auch hier durch Rauheitsmessungen in und neben SSiC -Verschleißspuren belegt werden. Bei gleichbleibenden R_{PK} -Werten (ca. 0,01 μm) sinken die R_{VK} -Werte von 0,1 μm auf 0,02 μm .

5.3.3 Morphologie der Verschleißflächen von SiSiC -Gleitpaarungen

Am Beispiel von SiSiC -Verschleißflächen wird ein Einfluß unterschiedlicher Probenpräparation sichtbar. Die mit Gold besputterten Oberflächen weisen in den Verschleißflächen Riefen auf (s. Abb. 48a,b), die auf unbesputterten Oberflächen nicht sichtbar sind (s. Abb. 48c). Interkristalline Ausbrüche sind dagegen nur im unbesputterten Zustand zu erkennen (s. Abb. 48d). Rauheitsmessungen an SiSiC -Probekörpern ergeben eine starke Aufrauung der Verschleißspuren im Vergleich zu den unbeanspruchten Oberflächen. Für die Riefen werden Abmessungen von bis zu 100 μm Breite und ca. 1 μm Tiefe bestimmt.

5.3.4 Morphologie der Verschleißflächen von MgO-ZrO_2 -Gleitpaarungen

An einigen Stellen der MgO-ZrO_2 -Verschleißflächen sind Riefen zu erkennen (s. Abb. 49a-c). An deren Rändern kann stellen-

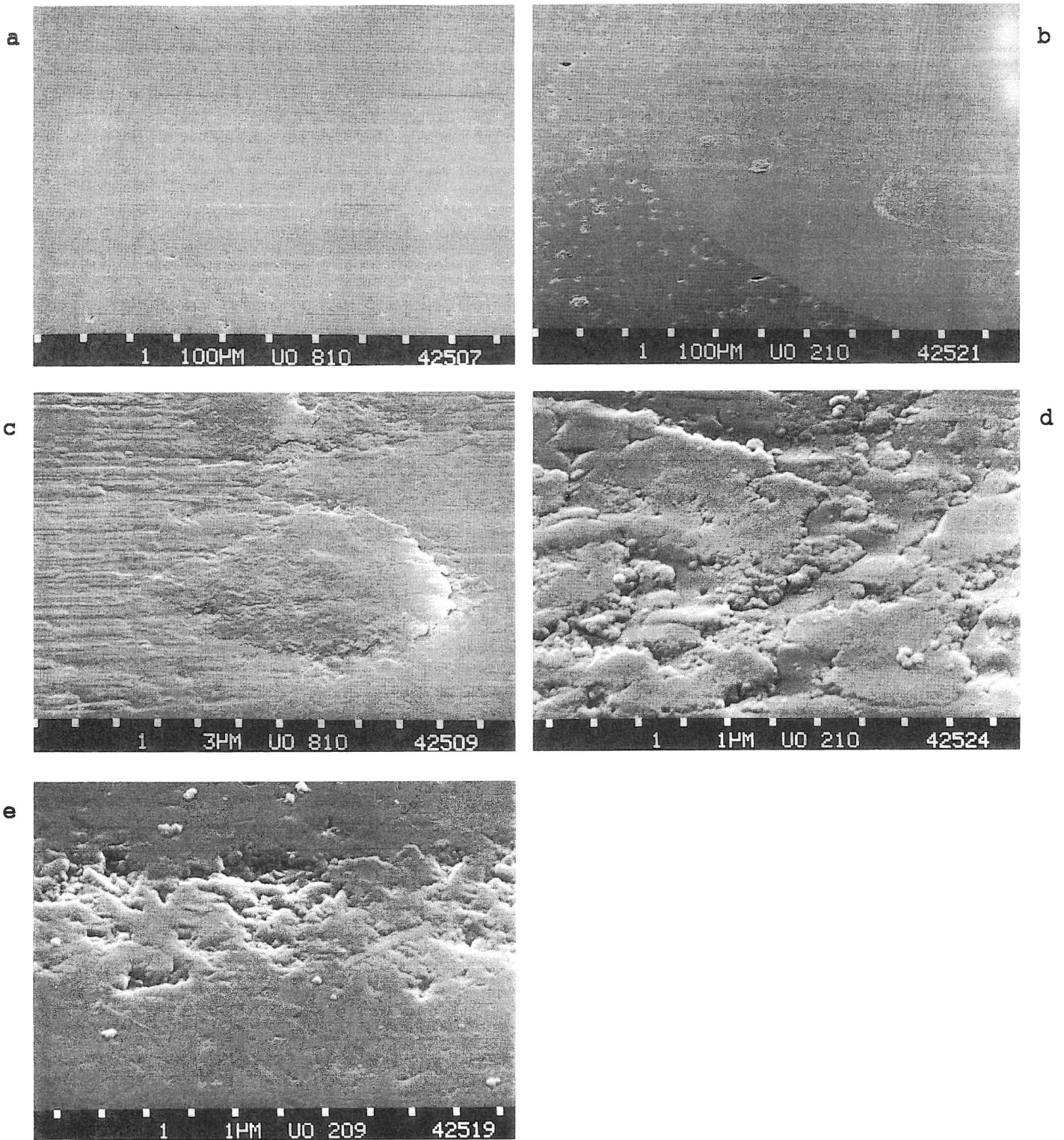


Abb. 46

Morphologie von Si_3N_4 -Verschleißspur (a,c) und -Verschleißkalotte (b,d,e); a: unbeanspruchte Oberfläche im unteren Bildteil; b: unbeanspruchte Oberfläche im linken Bildteil (Zwischenstoff: NH_4OH (a-d), CH_3COOH (e); 23°C , 22 N, 0,1 m/s)

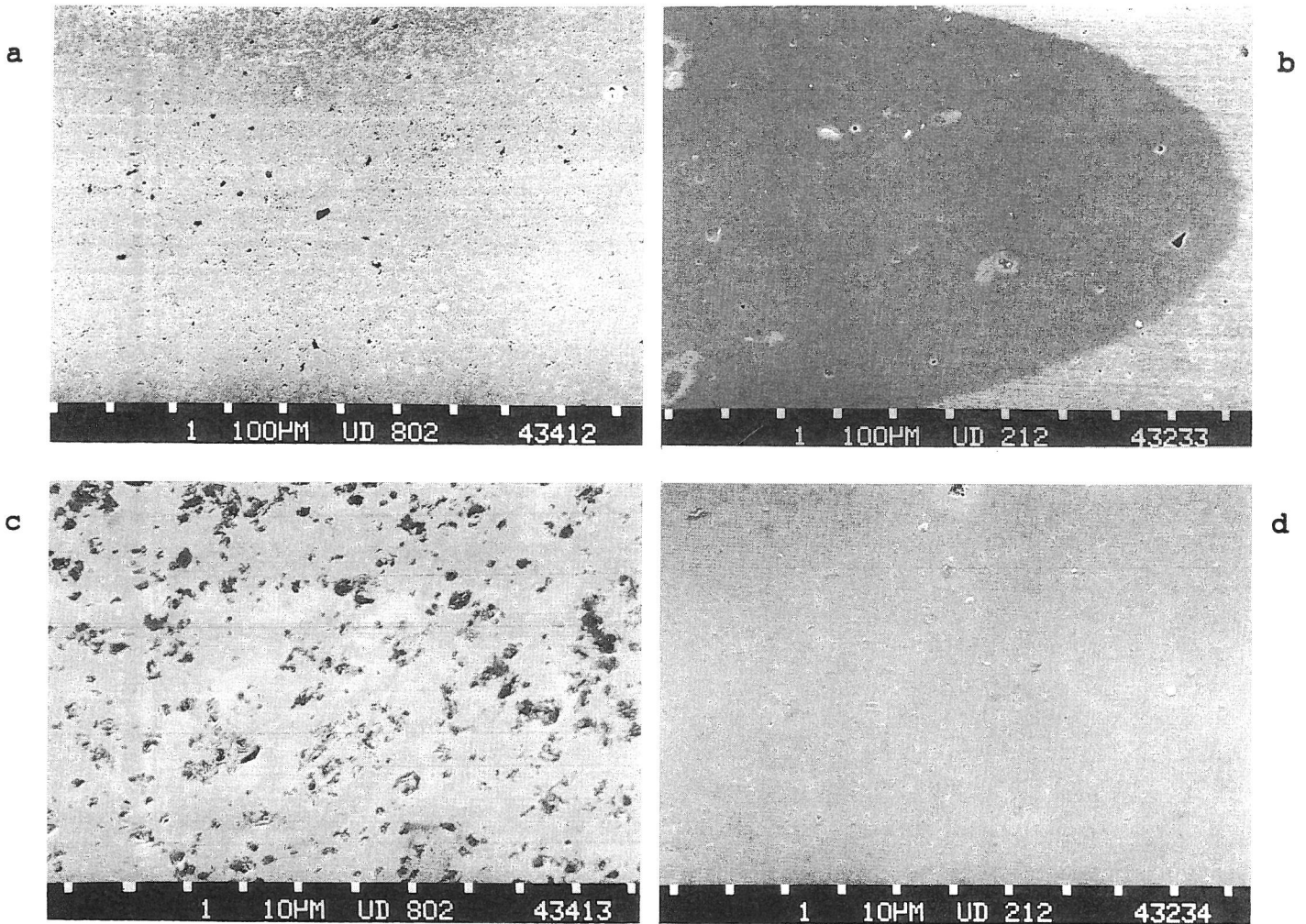


Abb. 47

Morphologie von SSiC-Verschleißspur (a,c) und -Verschleißkalotte (b,d); a: unbeanspruchte Oberfläche im oberen und unteren Bildteil; b: unbeanspruchte Oberfläche im oberen und rechten Bildteil (Zwischenstoff: HNO_3 (a,c), HClO_4 (b,d); 23°C , 22 N, 0,1 m/s)

weise Delamination beobachtet werden (s. Abb. 49d). Ansonsten erscheinen die Verschleißflächen glatt, was durch Rauheitsmessungen bestätigt wird. Die R_{PK} - und R_{VK} -Werte in und neben den Verschleißspuren bleiben nahezu unverändert bei $0,01 \mu\text{m}$ bzw. $0,05 \mu\text{m}$.

5.3.5 Morphologie der Verschleißflächen von Al_2O_3 -Gleitpaarungen

Als einziger Werkstoff weist Al_2O_3 starke Unterschiede in der Verschleißflächenmorphologie in Abhängigkeit vom Zwischenstoff auf. Die in H_2O entstandenen Verschleißflächen sind verschmiert (s. Abb. 50a,c), d.h. die Porenräume sind zum Großteil mit Abrieb gefüllt. Andererseits sind die Verschleißflächen, die in diesem Fall in HClO_4 gebildet wurden, durch interkristalline Ausbrüche gekennzeichnet, die neben der normalen Porosität sichtbar werden (s. Abb. 50b,d).

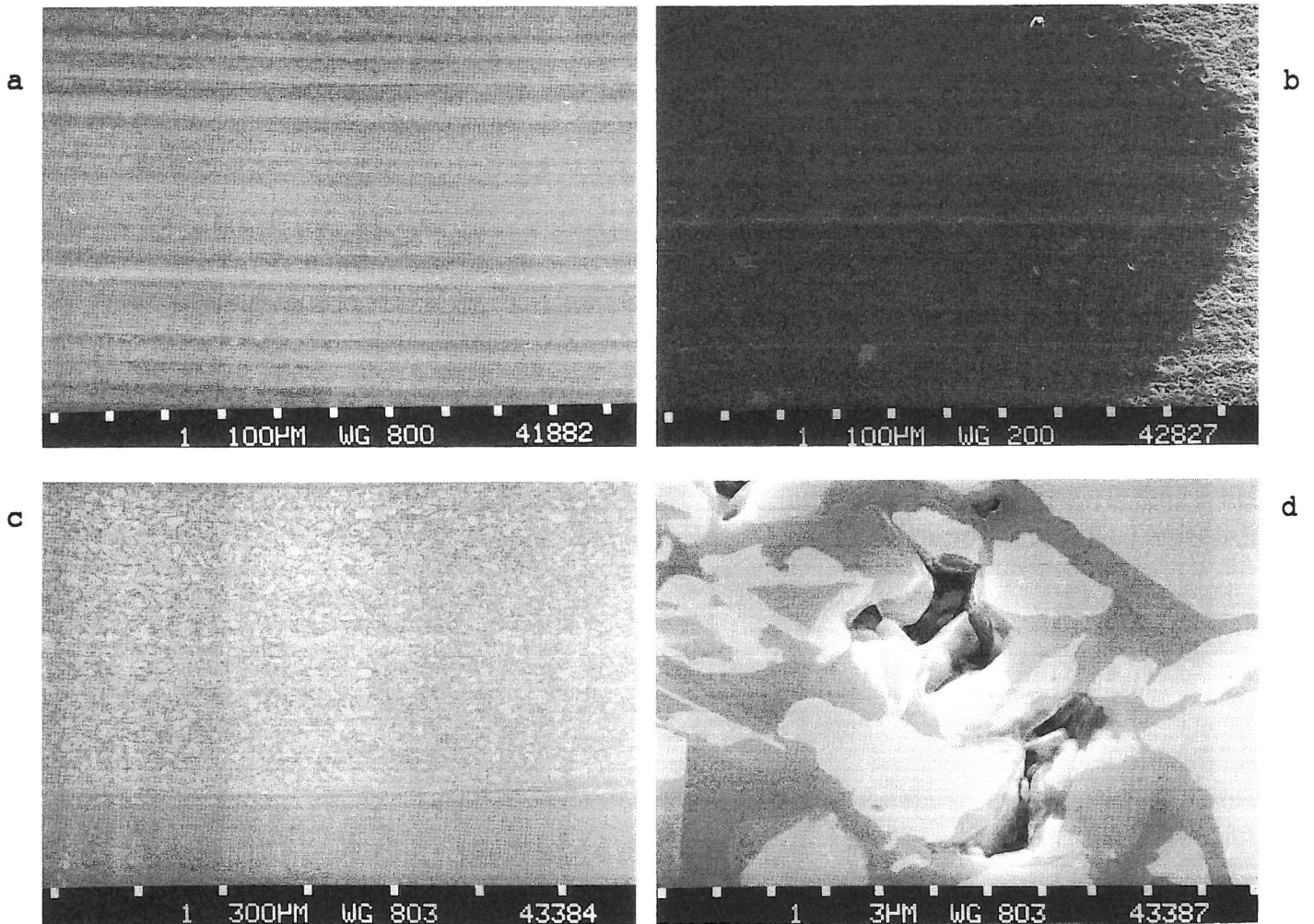


Abb. 48

Morphologie von SiSiC-Verschleißspur (a,c,d) und -Verschleißkalotte (b); a: unbeanspruchte Oberfläche im oberen Bildteil; b: unbeanspruchte Oberfläche im rechten Bildteil; c: unbeanspruchte Oberfläche im oberen und unteren Bildteil (Zwischenstoff: H₂O (a,b), NaOH (c,d); 23°C, 22 N, 0,1 m/s)

5.4 Oberflächenanalytische Untersuchungen

Oberflächenanalytische Untersuchungen wurden an SiSiC- und Si₃N₄-Probekörpern durchgeführt. Mögliche Unterschiede zwischen Elementkonzentrationen bzw. chemischen Bindungsverhältnissen in und neben den Verschleißflächen sollten aufgezeigt werden.

5.4.1 Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES)

Die AES-Untersuchungen wurden im BAM-Lab. 5.33 durchgeführt.

Aufgrund von elektrischen Aufladungserscheinungen an Si₃N₄-Oberflächen /101/ wurden Tiefenprofilanalysen nur für SiSiC-Probekörper erstellt. Die Halbleitereigenschaften von SiC /102/ machen es zu einem "Auger-gerechten" Werkstoff /101/. Die Analysen, für die ausschließlich rotierende Probekörper ausgewählt wurden, zeigen in und neben den Verschleißspuren keine signifikanten Unterschiede der Konzentrationsprofile der

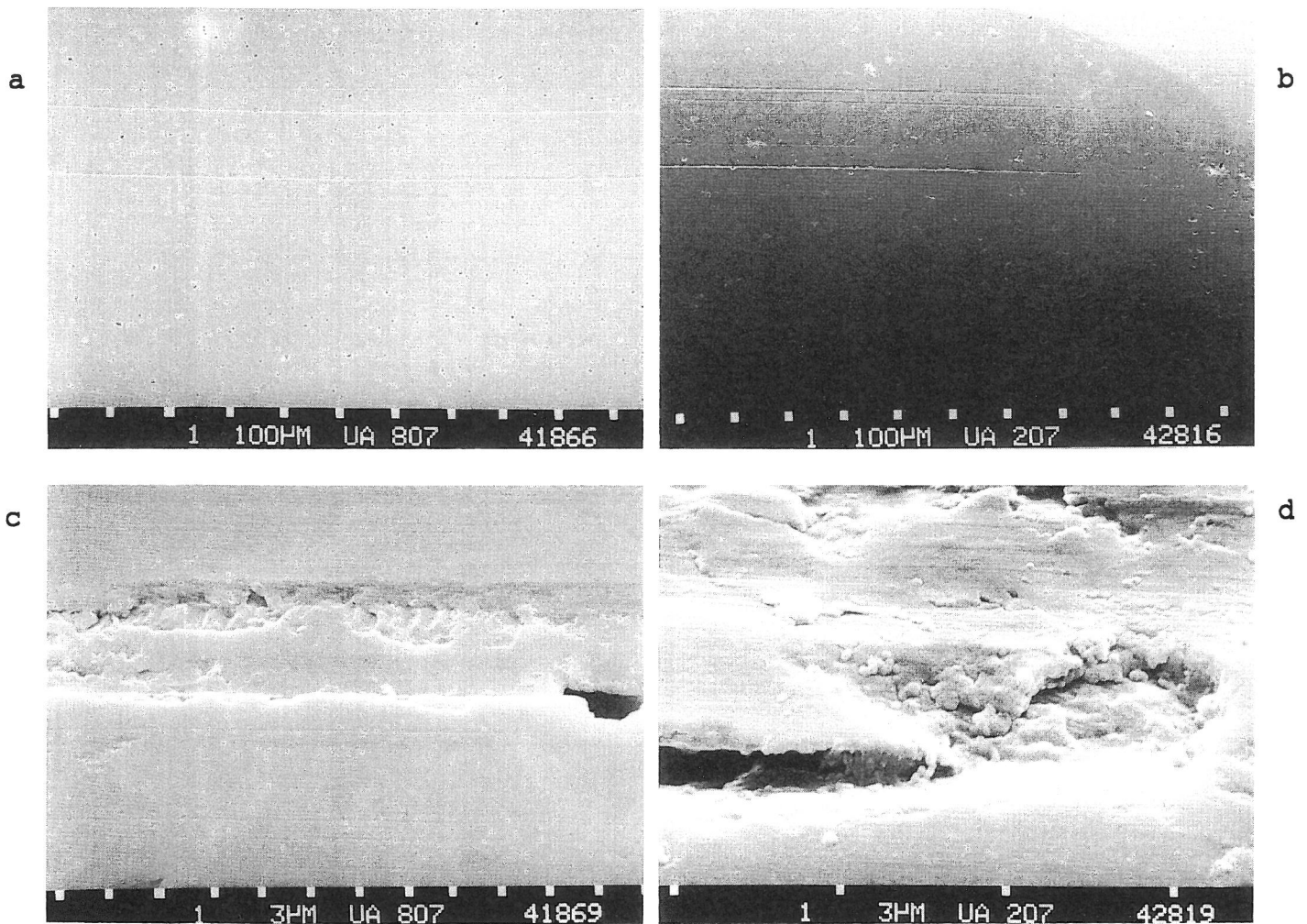


Abb. 49

Morphologie von MgO-ZrO₂-Verschleißspur (a,c) und -Verschleißkalotte (b,d); a: unbeanspruchte Oberfläche im oberen und unteren Bildteil; b: unbeanspruchte Oberfläche im oberen, unteren und rechten Bildteil (Zwischenstoff: CH₃COOH; 23°C, 22 N, 0,1 m/s)

Elemente Si, C und O in Abhängigkeit vom Abstand zur Oberfläche. Auf eine Darstellung der AES-Tiefenprofile sei daher verzichtet.

5.4.2 Elektronenstrahl-Mikroanalyse (ESMA)

Für die ESMA-Untersuchungen wurde die Elektronenstrahlmikrosonde des BAM-Lab. 1.12 benutzt.

An rotierenden Probekörpern aus SSi₃N₄ und SSiC wurden die Verschleißspuren und deren angrenzenden Bereiche analysiert. Abb. 51+52 zeigen Linearanalysen für die Elemente Si, N und O bzw. Si, C und O. Die Verschleißspurbreiten sind auf den x-Achsen eingezeichnet. Beim SSi₃N₄ ist ein örtlicher Anstieg der O-Konzentration sowohl in als auch neben der Verschleißspur zu erkennen (s. Abb. 51). Im Fall von SSiC kann die örtlich begrenzte Erhöhung der O-Konzentration in der

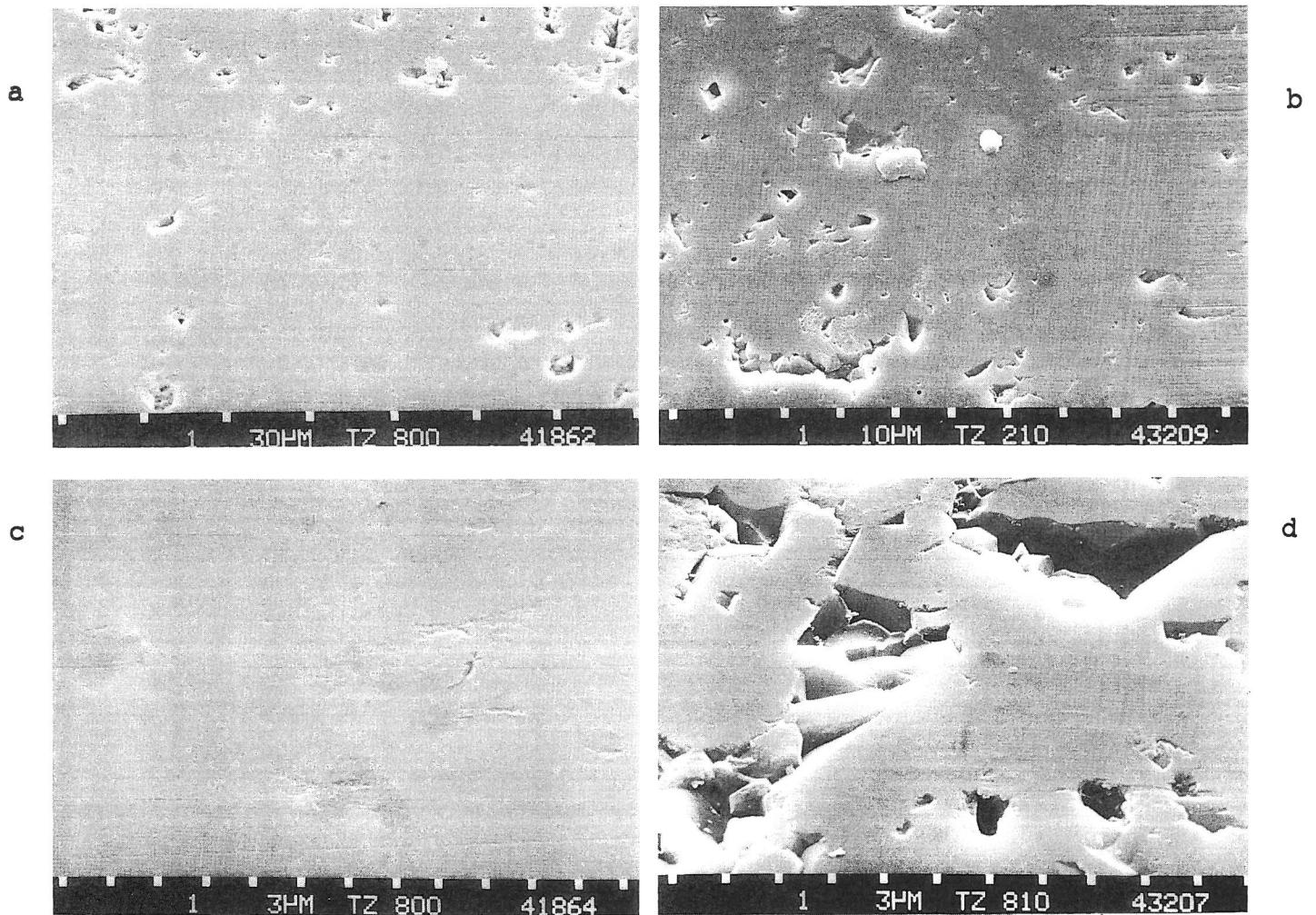


Abb. 50

Morphologie von Al_2O_3 -Verschleißspur (a,c,d) und -Verschleißkalotte (b); a: unbeanspruchte Oberfläche im oberen und unteren Bildteil; b: unbeanspruchte Oberfläche im rechten Bildteil (Zwischenstoff: H_2O (a,c), HClO_4 (b,d); 23°C , 22 N, 0,1 m/s)

Verschleißspur auf einen Bereich in einer Pore zurückgeführt werden. Möglicherweise handelt es sich dabei um oxidischen Abrieb (s. Abb. 53). Eine erhöhte O-Konzentration konnte aber auch neben der Spur gemessen werden (s. Abb. 52).

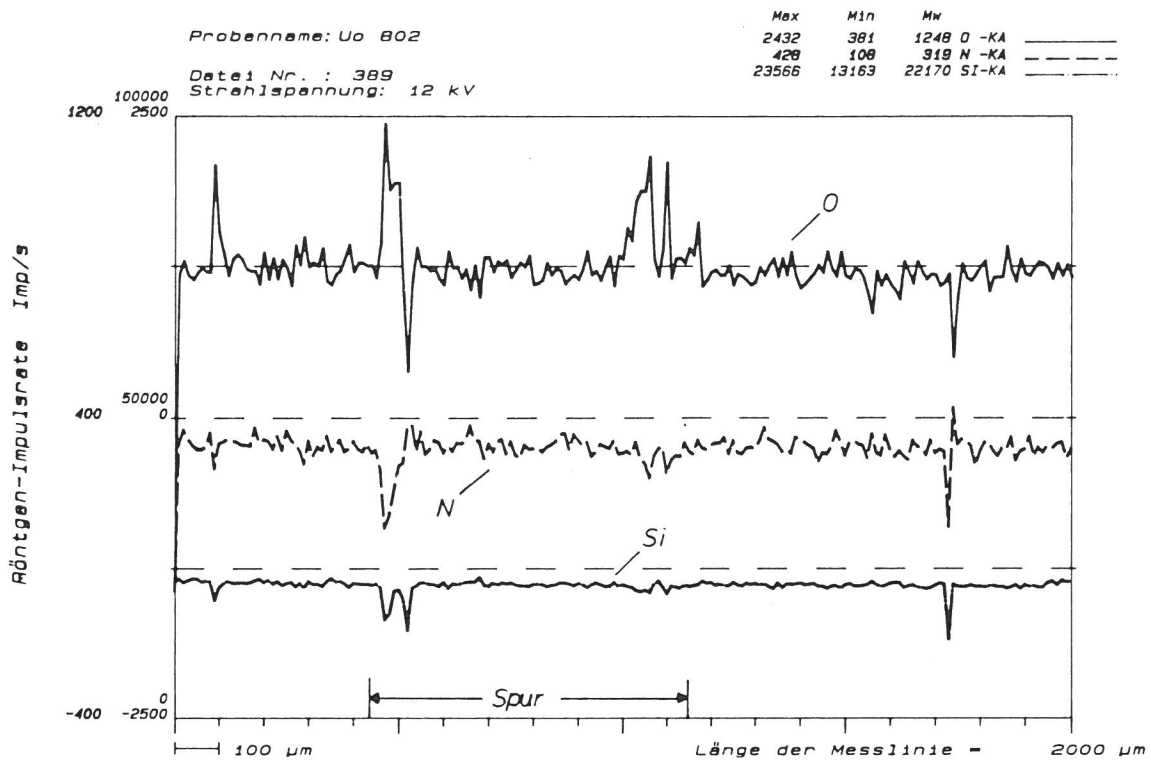


Abb. 51

ESMA-Linienanalyse in und neben der Verschleißspur eines SSi_3N_4 -Probekörpers (Zwischenstoff: NaOH; 23°C , 22 N, 0,1 m/s)

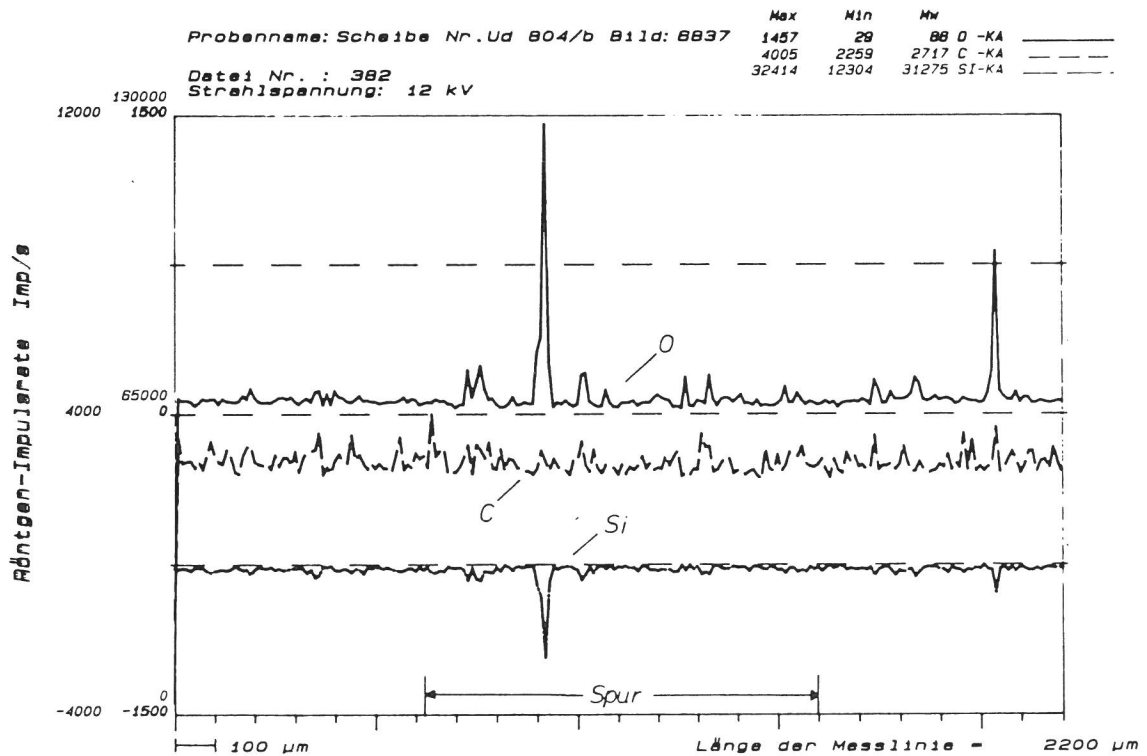


Abb. 52

ESMA-Linienanalyse in und neben der Verschleißspur eines SSiC -Probekörpers (Zwischenstoff: KOH; 23°C , 22 N, 0,1 m/s)

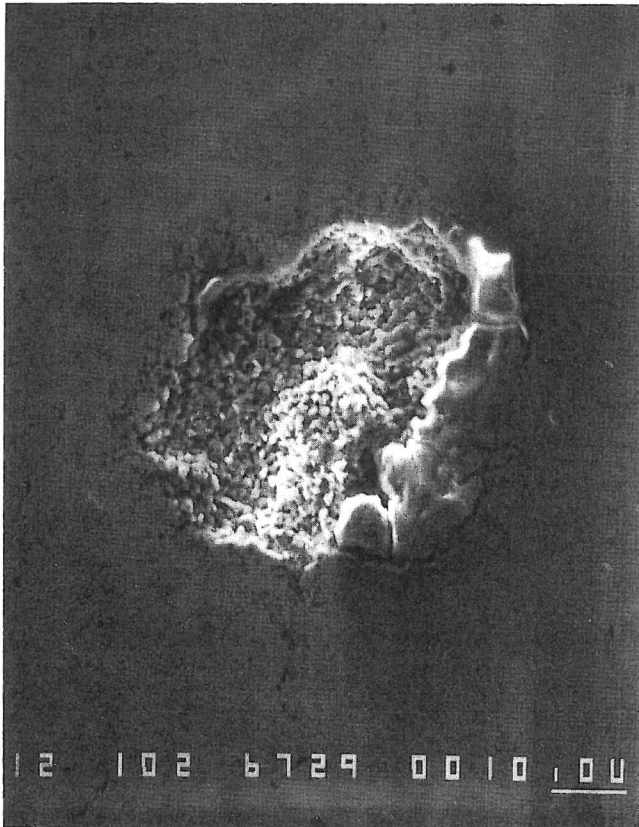


Abb. 53:
Pore in SiC-Verschleißspur.
Bereich erhöhter O-Konzentration durch Pfeile gekennzeichnet

5.4.3 Elektronenspektroskopie zur chemischen Analyse (ESCA)

Im BAM-Lab. 5.33 wurden die ESCA-Untersuchungen durchgeführt. Mit dieser Methode können Bindungsenergien von Elementen in verschiedenen Verbindungen und die Intensitäten der entsprechenden Energiewerte gemessen werden.

Es wurden die chemischen Bindungsverhältnisse in und neben den Verschleißflächen von Si_3N_4 - und SiC-Probekörpern bestimmt. Anhand der Referenzen aus /103/ konnten einigen Energiewerten die aufgeführten Verbindungen zugeordnet werden. Die gemessenen Bindungsenergien für zwei Si_3N_4 -Paarungen zeigen keine vollständige Übereinstimmung. Si-O_x-N_y-Phasen konnten in einem Fall sowohl in als auch neben den Verschleißflächen gefunden werden (s. Tab 5+6). ESCA-Messungen an getrockneten Bleinitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)- und Aluminiumnitratnonahydrat ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)-Lösungen brachten keine verwertbaren Ergebnisse bezüglich möglicher N-O-Verbindungen. Die chemischen Bindungsverhältnisse in und neben den Verschleißflächen der untersuchten SiC-Paarung sind nahezu identisch (s. Tab. 7). Si-O_x-C_y-Phasen konnten in allen Bereichen zugeordnet werden.

Probe		Gemessene Bindungsenergien [eV]			Verbindungen
		Si2p	O1s	N1s	
rotierender Probekörper UO 801 B	in der Spur	101,40 (69,1%) 102,86 (30,9%)	531,98 (100%)	397,07 (76,0%) 398,55 (16,7%)	Si ₃ N ₄ Si-O _x -N _y
				400,22 (7,3%)	nicht zuzuordnen
	neben der Spur	101,67 (100%)		397,28 (91,7%)	Si ₃ N ₄
			531,89 (100%)	399,28 (8,3%)	nicht zuzuordnen
stationärer Probekörper UO 201	in der Kalotte	101,79 (22,7%)		397,48 (26,6%)	Si ₃ N ₄
		104,40 (77,3%)	531,38 (10,1%) 532,78 (24,3%) 534,54 (55,4%) 535,77 (10,2%)	399,93 (67,7%) 402,35 (5,7%)	nicht zuzuordnen
	neben der Kalotte	101,60 (18,1%) 103,90 (61,7%)	533,01 (58,1%)	397,50 (27,3%)	Si ₃ N ₄ SiO ₂
		104,42 (20,2%)	531,52 (24,5%) 534,23 (17,5%)	399,90 (42,9%) 401,31 (29,8%)	nicht zuzuordnen

Probe		Gemessene Bindungsenergien [eV]			Verbindungen
		Si2p	O1s	N1s	
rotierender Probekörper UO 811 B	in der Spur	101,29 (56,4%) 102,31 (43,6%)	531,77 (100%)	397,26 (89,1%) 399,47 (10,9%)	Si ₃ N ₄ Si-O _x -N _y
	neben der Spur	101,45 (55,9%) 102,39 (44,1%)	531,87 (100%)	397,41 (86,4%) 399,66 (13,6%)	Si ₃ N ₄ Si-O _x -N _y
stationärer Probekörper UO 211	in der Kalotte	101,54 (89,0%) 102,73 (11,0%)	531,89 (73,4%)	397,19 (89,1%) 399,56 (10,9%)	Si ₃ N ₄ Si-O _x -N _y
			530,83 (16,7%) 533,22 (9,9%)		nicht zuzuordnen
	neben der Kalotte	101,74 (79,4%) 102,75 (20,6%)	531,82 (77,0%)	397,33 (70,2%) 399,33 (29,8%)	Si ₃ N ₄ Si-O _x -N _y
			530,85 (12,0%) 532,97 (11,0%)		nicht zuzuordnen

Tab. 5+6
Small Spot ESCA-Messungen in und neben den Verschleiß-
flächen zweier S-Si₃N₄-Gleitpaarungen (Zwischenstoff:
H₂O bzw. NH₄OH; 23°C, 22 N, 0,1 m/s)

Probe		Gemessene Bindungsenergien [eV]			Verbindungen
		Si2p	O1s	C1s	
rotierender Probekörper UD 804 B	in der Spur	100,29 (71,5%) 102,13 (28,5%)	531,90 (70,3%)	284,60 (57,9%) 282,45 (17,2%)	SiC Si-Ox-Cy
			531,04 (18,0%) 533,26 (11,7%)	286,09 (14,8%) 287,97 (10,1%)	nicht zuzuordnen
	neben der Spur	100,13 (59,2%) 102,27 (40,8%)	531,88 (80,2%)	284,60 (63,5%) 282,76 (16,8%)	SiC Si-Ox-Cy
			530,81 (9,6%) 533,06 (10,1%)	286,09 (12,5%) 288,00 (7,2%)	nicht zuzuordnen
stationärer Probekörper UD 204	in der Kalotte	100,15 (87,7%) 101,91 (12,3%)	531,78 (74,0%)	284,60 (43,2%) 282,21 (44,6%)	SiC Si-Ox-Cy
			530,68 (12,2%) 533,01 (13,9%)	286,24 (7,5%) 288,01 (4,7%)	nicht zuzuordnen
	neben der Kalotte	99,87 (78,7%) 101,84 (21,3%)	531,60 (60,3%)	284,60 (51,3%) 282,17 (21,2%)	SiC Si-Ox-Cy
			530,64 (11,4%) 532,80 (28,3%)	286,10 (17,0%) 287,89 (10,5%)	nicht zuzuordnen

Tab. 7

Small Spot ESCA-Messungen in und neben den Verschleißflächen einer SSiC-Gleitpaarung (Zwischenstoff: KOH; 23°C, 22 N, 0,1 m/s)

5.5 Abschätzung von Blitztemperaturen

Zur Abschätzung der reibungsbedingten Temperaturerhöhungen bei verschiedenen Gleitpaarungen dienten die Arbeiten von D. Kuhlmann-Wilsdorf /104-106/ als Grundlage, in denen auf frühere Arbeiten von H. Blok /107/ und J.C. Jaeger /108,109/ aufgebaut wird.

Man geht davon aus, daß die Oberflächen der Reibpartner sich nur in ihren Mikrokontaktflächen berühren. Deren Summe ist die wahre Kontaktfläche, die in der Regel deutlich kleiner ist als die geometrische Kontaktfläche. Die bei der Reibung erzeugte Wärme wird durch Wärmeleitung von der Oberfläche weggeführt, so daß an den Oberflächen der Mikrokontakte zeitlich begrenzte Temperaturerhöhungen, sogenannte Blitztemperaturen auftreten /17,104-106/. Die Radien der Mikrokontakte lassen sich für Körper, die entweder nur elastische oder nur plastische Eigenschaften haben, berechnen. Die Tatsache, daß bei Belastung von realen Körpern elastische und plastische Verformungen gemeinsam auftreten, wird bei der Rechnung vernachlässigt. Abhängig davon welcher Wert größer ist, wird elastisches bzw. plastisches Verhalten angenommen. In den vorliegenden Fällen wurde mit r_e (elastisches Verhalten) gerechnet.

Die Temperaturerhöhungen für elastische Mikrokontakte artgleicher Materialien lassen sich folgendermaßen berechnen:

$$\Delta T = \frac{1}{(1/z)+1} \cdot \frac{f \cdot v}{\lambda} \cdot \left(\frac{3 \cdot F_N^2 \cdot E}{256 \cdot N^2 \cdot r_2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

- ΔT : Temperaturanstieg [K]
 z : Funktion, die benötigt wird, um die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Blitztemperatur zu berechnen
 f : Reibungszahl
 v : Gleitgeschwindigkeit [m/s]
 λ : Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
 F_N : Normalkraft [N]
 E : Elastizitätsmodul [Pa]
 N : Anzahl der Mikrokontakte
 r_2 : Krümmungsradius der Mikrokontakte [m], $r_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ m

In die Funktion z gehen, neben dem Mikrokontaktradius r_2 und der Gleitgeschwindigkeit v , die Materialkennwerte Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit ein. Alle notwendigen Werkstoffdaten sind in Tab. 3 enthalten.

Blitztemperaturen wurden für Gleitpaarungen der Werkstoffe $SSiC$, SSi_3N_4 und $MgO-ZrO_2$ berechnet und als Funktion der Reibungszahl aufgetragen (s. Abb. 54). Die Anzahl der Mikrokontakte wurde auf $N=10$ festgesetzt, die schwer zugängliche Größe des Krümmungsradius der Mikrokontakte wurde mit $r_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ m abgeschätzt, wobei dieser Wert für verschiedene Keramik-Paarungen variiert. Da hier die reibbedingten Temperaturerhöhungen nur grob abgeschätzt wurden, wurde auf eine Variation verzichtet.

Blitztemperaturen bei Festkörperreibung
 $F_N=22N$; $v=0.1m/s$; Anzahl der Mikrokontakte $N=10$

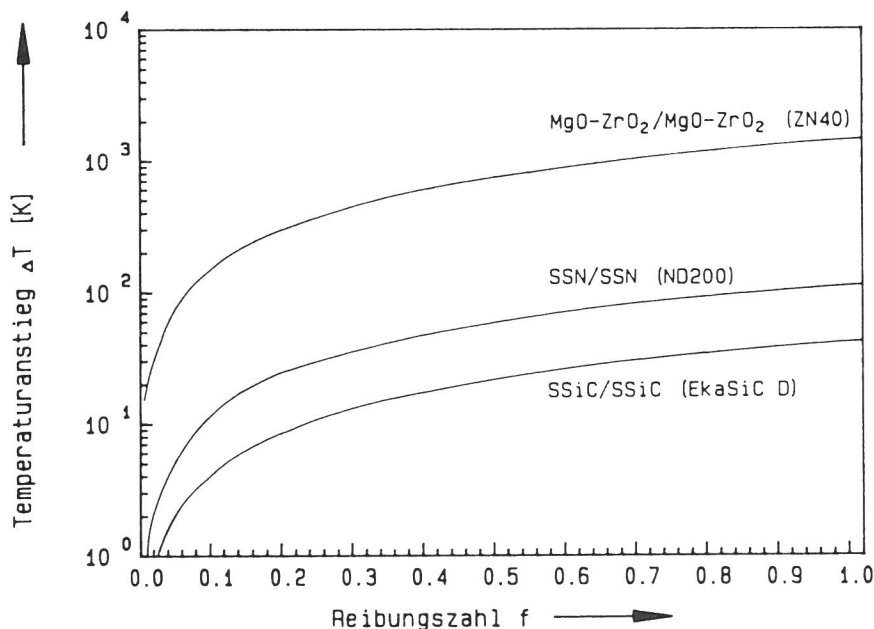


Abb. 54
 Temperaturanstieg als Funktion der Reibungszahl bei Festkörperreibung unterschiedlicher Werkstoffpaarungen

Es ist zu beachten, daß in Gegenwart von wäßrigen Zwischenmedien niedrigere Blitztemperaturen zu erwarten sind, da zusätzlich zur Wärmeleitung im Festkörper eine Wärmeleitung in den Zwischenstoff stattfindet /104-106/. Die gemessenen Temperatur-Gleitweg-Verläufe (s. Kap. 5.1 und 5.2) zeigen die Temperaturerhöhungen der wäßrigen Medien an.

Für SSiC - und SSi_3N_4 -Gleitpaarungen ist bei Mischreibung keine nennenswerte Temperaturbelastung zu erwarten. Auch die überwiegend niedrigen Reibungszahlen tragen dazu bei (s. Kap. 5.1).

Wesentlich höhere Blitztemperaturen ergeben sich für MgO-ZrO_2 . Die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 2,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (SSiC : $\lambda = 110 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) ist dafür verantwortlich. Thermische Effekte können als verschleißbestimmende Einflußgrößen, auch aufgrund der hohen Reibungszahlen (s. Kap. 5.1), nicht ganz ausgeschlossen werden. Durch die örtlichen Temperaturwechsel werden im Werkstoff mechanische Spannungen ausgelöst. Ursache dieser Spannungen ist die temperaturabhängige Dehnung des Materials. Unterstützt durch mögliche Phasenumwandlungen von der monoklinen und tetragonalen in die kubische Phase kann es zur Ribbildung und zum Herauslösen einzelner Partikel kommen /24,110/.

6. Diskussion

Im Vergleich zum Festkörperreihungsverhalten resultiert für alle in wäßrigen Medien gelaufenen keramischen Gleitpaarungen eine Reibungsminderung. Insbesondere bei den Paarungen der nichtoxidkeramischen Werkstoffe werden Endreibungszahlen deutlich unter 0,1 erreicht (Ausnahme: SiSiC).

Eine Einteilung der untersuchten Werkstoffe kann ebenfalls hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens vorgenommen werden. Für die nichtoxidkeramischen Werkstoffe SSi₃N₄, HIP-RBSi₃N₄ und SSiC ist ein degressiver Verlauf der Verschleißvolumen-Laufweg-Kurve kennzeichnend, d.h. die mit dem Gleitweg abnehmende geometrische Flächenpressung verbessert in diesen Medien das Verschleißverhalten. Dies läßt darauf schließen, daß tribochemische Reaktionsschichtbildung den Verschleißmechanismus maßgeblich bestimmt. Lineare Abhängigkeiten des Verschleißvolumens vom Laufweg treten bei den Oxidkeramiken MgO-ZrO₂ und Al₂O₃ sowie beim SiSiC auf. Der druckabhängige Mechanismus der tribochemischen Reaktionsschichtbildung scheint für diese Werkstoffe eine eher untergeordnete Rolle zu spielen /34,66/.

Eine weitere Möglichkeit der Klassifizierung besteht hinsichtlich der Phasenzusammensetzungen der Werkstoffe. Die einphasigen Werkstoffe SSiC und Al₂O₃ weisen ein von den Zwischenmedien unabhängiges tribologisches Verhalten auf (Ausnahme: Al₂O₃ in H₂O). Erhebliche Schwankungen im Reibungs- und Verschleißverhalten kennzeichnen die mehrphasigen, heterogenen Werkstoffe SSi₃N₄, HIP-RBSi₃N₄ und MgO-ZrO₂, wobei bei den Si₃N₄-Werkstoffen das Verschleiß- beim MgO-ZrO₂ das Reibungsverhalten stärkeren Schwankungen unterworfen ist. Das mehrphasige SiSiC kann nicht in dieses Schema eingeordnet werden, denn auch dessen Paarungen weisen ein nahezu identisches tribologisches Verhalten in den verschiedenen Zwischenmedien auf.

Im folgenden wird noch auf die werkstoffspezifischen Aspekte eingegangen.

6.1 SSi₃N₄ und HIP-RBSi₃N₄

Endreibungszahlen unter 0,1 und Verschleißkoeffizienten von 10⁻⁷ bis 10⁻⁶ mm³/Nm wurden für Gleitpaarungen beider Si₃N₄-Werkstoffe in den meisten Zwischenstoffen gemessen.

Wie von anderen Autoren /21,32,61,62,76-78/ festgestellt wurde, bewirken tribochemische Reaktionsschichten eine starke Reibungsminderung bei Si₃N₄-Gleitpaarungen in wäßrigen Medien (s. Kap. 3.2.1.3). Die zeitlichen Verläufe der Reibungszahlen (s. Abb. 29+30) lassen demnach auf die Bildung einer tribologischen Reaktionsschicht schließen. Die neu gebildete Schicht läßt eine Glättung der Oberfläche zu. Die durchgeführten Versuche lassen keine klare Aussage über eine Medienabhängigkeit der Reaktionsschichtbildung, deren Stabilität und den

damit verbundenen Abfall der Reibungszahl zu. Eine Beziehung zwischen der Reaktionsschichtstabilität und einer kritischen geometrischen Flächenpressung ist nicht zu erkennen. Stabile Reaktionsschichten treten in einem Pressungsbereich von 10-40 N/mm² auf. Die in Abb. 30 zu erkennenden Peaks im Reibungszahlverlauf zeigen ein örtliches Durchbrechen der Reaktionsschicht auf dem rotierenden Probekörper und die damit verbundene Verschleißpartikelbildung an. Es kommt an diesen Stellen zu einer Erhöhung der Reibungszahl bis die Neubildung der Schicht abgeschlossen ist. Der sich mit dem Laufweg vergrößernde Abstand der Peaks deutet auf die wachsende Stabilität der reibungsmindernden Schicht, infolge der abnehmenden geometrischen Flächenpressung, hin.

Auf den Zusammenhang der zeitlichen Verläufe von Reibungszahl und Verschleißvolumen wurde in Kap. 5.2.1 schon hingewiesen (s. Abb. 29+30). Die Unterschiede in den zeitlichen Verläufen der Reibungszahl und des Verschleißvolumens in den verschiedenen Medien hängen von der tribologischen Stabilität von Reaktionsschichten und dem Einfluß von rißfördernden Prozessen ab. Die Bildung einer stabilen Reaktionsschicht ohne rißfördernde Vorgänge ergibt eine geringe und wenig schwankende Reibungszahl in Verbindung mit einem geringen Verschleißvolumen und einem pressungsabhängigen Einlaufverhalten (s. Abb. 29). Die durch Peaks im Reibungszahlverlauf gekennzeichnete Bildung von Verschleißpartikeln hat dagegen ein größeres Verschleißvolumen zur Folge, wobei ein abfallender W_v -s-Verlauf erst mit zunehmender Stabilität der Reaktionsschicht auftritt (s. Abb. 30). Die nur punktuell durchgeführten oberflächenanalytischen Untersuchungen konnten eine tribologische Reaktionsschicht nicht genauer charakterisieren (s. Kap.5.4).

6.2 SSiC

Reibungszahlen, die bei Versuchsbeginn bereits unter 0,1 liegen und nach 2000 m Laufweg auf Werte zwischen 0,04 und 0,01 fallen, sowie Verschleißkoeffizienten unter 10-6 mm³/Nm charakterisieren das tribologische Verhalten von SSiC-Gleitpaarungen in allen Zwischenstoffen.

Einige Autoren /32,61,62,86/ geben ebenfalls Reibungszahlen für unter Mischreibungsbedingungen gelaufene SiC-Gleitpaarungen unter 0,1 an und führen dies, analog zu dem Verhalten von Si₃N₄, auf tribochemische Reaktionen und damit verbundene Glättung der Reibflächen zurück. Die zeitlichen Verläufe von Reibungszahl und Verschleißvolumen (s. Abb. 40) scheinen diese Annahme zu unterstützen. Neben dem starken Abfall der Reibungszahl weist insbesondere das pressungsabhängige Einlaufverhalten auf tribochemische Reaktionen hin, wobei die Existenz einer tribologischen Reaktionsschicht im Fall von SSiC durch die oberflächenanalytischen Untersuchungen nicht nachgewiesen werden konnte (s. Kap. 5.4).

6.3 SiSiC

Ein ebenfalls nahezu medienunabhängiges Reibungs- und Verschleißverhalten weisen SiSiC-Gleitpaarungen auf, wobei Reibungszahlen zwischen 0,15 und 0,20 gemessen wurden. Die Verschleißkoeffizienten liegen mit Werten von 10^{-6} mm³/Nm bis 10^{-5} mm³/Nm ca. eine Größenordnung höher als bei SSiC-Paarungen. Eine Besonderheit stellt das etwas bessere Verschleißverhalten unter Festkörperreibung dar.

Bei Festkörperreibung sowie hohen Temperaturen kann das höhere Niveau des Verschleißkoeffizienten für SiSiC, im Vergleich zu einphasigem SSiC, auf die Ermüdung der Grenzfläche Si/ β -SiC zurückgeführt werden /111/. In Anbetracht der unter Mischreibung in wässrigen Medien entstandenen Morphologie der Verschleißflächen kann der hohe Verschleißbetrag nur bedingt auf die durch Grenzflächenermüdung verursachten interkristallinen Ausbrüche zurückgeführt werden (s. Abb 48).

6.4 MgO-ZrO₂

MgO-ZrO₂ weist unter Mischreibungsbedingungen ein sehr ungünstiges Reibungsverhalten mit stark schwankenden Endreibungszahlen zwischen 0,18 und 0,7 auf. Die Verschleißkoeffizienten bewegen sich im Bereich von $<10^{-7}$ mm³/Nm bis 10^{-6} mm³/Nm.

Die erhebliche Verschleißminderung unter Mischreibungsbedingungen kann sicherlich auf die starke Minderung der thermomechanischen Belastung durch reibungsbedingte Temperaturerhöhungen, die durch zusätzliche Wärmeableitung in den Zwischenstoff gemindert werden, zurückgeführt werden (s. Kap. 5.5). Der Grund für die Schwankungsbreite bei den ermittelten Verschleißkoeffizienten (s. Abb. 43) sind vermutlich unterschiedliche Korrosion der Phasenbestandteile des mehrphasigen und metastabilen MgO-ZrO₂ /92/.

Die an anderen Stellen /32,40,61,73,74/ genannte verschleißerhöhende Wirkung von Spannungsrißkorrosion kann aufgrund der Verschleißflächenmorphologie nicht bestätigt werden, da keine interkristallinen Ausbrüche zu erkennen sind (s. Abb. 49).

6.5 Al₂O₃

Reibungszahlen unter 0,15 wurden in den sauren und basischen Zwischenstoffen gemessen. Im Zwischenstoff Wasser liegen die Werte etwa doppelt so hoch. Die Verschleißkoeffizienten des stationären Probekörpers im Zwischenmedium Wasser und bei Festkörperreibung liegen deutlich unter 10^{-8} mm³/Nm, in den anderen Zwischenstoffen ergeben sich Werte über 10^{-7} mm³/Nm.

Der von einigen Autoren /64,67/ erwähnte Vorgang der Spannungsrißkorrosion scheint sich in den polaren sauren und basischen Medien verschleißerhöhend auszuwirken. Die in Abb. 50 zu erkennenden interkristallinen Ausbrüche, die auf Spannungsrißkorrosion zurückzuführen sind, bestätigen diese

Vermutung. Die für Al_2O_3 oft beschriebene reibungs- und verschleißmindernde Wirkung tribochemischer Reaktionsschichten /21,32,34,61,62,66,87/ ist möglicherweise im wassergeschmierten Fall von Bedeutung, wobei die erhöhte Reibungszahl dem widerspricht (s. Abb. 36+44).

7. Zusammenfassung

Der Einfluß wäßriger Zwischenmedien auf das tribologische Verhalten artgleicher ingenieurkeramischer Gleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen wurde untersucht.

Danach können mit Ingenieurkeramiken Tribosysteme betrieben werden, die von wäßrigen Medien reibungs- und verschleißarm geschmiert werden, wobei die Verschleißbeträge unter Mischreibung nicht immer kleiner sind als im Trockenlauf.

Zieht man alle Ergebnisse in Betracht, so können die einphasigen Werkstoffe SSiC und Al_2O_3 universell in den verschiedensten wäßrigen Medien mit ähnlichen Verschleißerwartungen eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil von SSiC-Paarungen sind dessen niedrige Mischreibungszahlen, die unter 0,1 liegen. Diese niedrigen Werte können auf tribochemische Reaktionen und damit verbundene Glättung der Reibflächen zurückgeführt werden. Die niedrigsten Verschleißkoeffizienten aller untersuchten Gleitpaarungen ergeben sich für Al_2O_3 bei Festkörperreibung sowie im Zwischenmedium Wasser. Die k_v -Werte des stationären Probekörpers liegen unter $10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. In den anderen Medien werden Verschleißkoeffizienten über $10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ermittelt, so auch für SSiC, dessen pressungsabhängiges Einlaufverhalten ebenfalls auf tribochemische Reaktionen hindeutet. Die höheren Verschleißkoeffizienten von Al_2O_3 in den Säuren und Laugen sind wahrscheinlich auf Spannungsrißkorrosion zurückzuführen, die in diesen polaren Zwischenstoffen verstärkt zur Wirkung kommt.

Aufgrund tribochemischer Reaktionsschichtbildung und der heterogenen Phasenzusammensetzungen der Si_3N_4 -Werkstoffe schwanken die Verschleißkoeffizienten in den unterschiedlichen Medien zwischen Werten um $10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ und über $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Unter Mischreibung kommt neben der tribologisch angeregten Reaktionsschichtbildung rißfördernden Prozessen eine Bedeutung zu. Beide Mechanismen sind ursächlich schwer voneinander zu trennen, die Übergänge sind fließend. Stabile Reaktionsschichten haben ein pressungsabhängiges Einlaufverhalten sowie Endreibungszahlen unter 0,1 zur Folge.

Die nahezu medienunabhängigen Verschleißkoeffizienten von SiSiC liegen zwischen $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ und $10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ und damit ca. eine Größenordnung höher als bei SSiC. Diese hohen Werte können nur bedingt auf die Ermüdung der Grenzfläche Si/ β -SiC zurückgeführt werden. Reibungszahlen um 0,2 wurden für diese Paarung in allen Medien ermittelt.

Gegenüber Festkörperreibung wird der Verschleißbetrag von MgO-ZrO₂ unter Mischreibungsbedingungen durch die starke Einschränkung der thermo mechanischen Beanspruchung gesenkt. Die Verschleißkoeffizienten des mehrphasigen und metastabilen MgO-ZrO₂ liegen zwischen $10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ und $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ bei stark schwankenden Endreibungszahlen zwischen 0,2 und 0,7.

8. Literatur

- /1/ W. Prechtl und H. Tischner
Einsatz von ingenieurkeramischen Werkstoffen in Pumpen und Armaturen
DKG-Vorträge: Keramik in der Anwendung, Verschleiß und Korrosion, Mai 1990, 141-157
- /2/ P. Feinle und J. Greim
Nichtoxidkeramik für chemisch und tribologisch hochbeanspruchte Düsen und Ventilkomponenten
s. /1/, 75-84
- /3/ D. Zeus
Ingenieurkeramik in Gleitringdichtungen und Magnetkupplungen
s. /1/, 20-31
- /4/ R. Weigand
Ermüdung und Verschleiß von Wälzlagern aus Keramik
s. /1/, 50-62
- /5/ M. Woydt, A. Skopp und K.-H. Habig
Einfluß von Temperatur und Gleitgeschwindigkeit auf Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Si_3N_4 bis 1000°C
cfi/Ber. DKG, 66 (1989) [10] 426-432
- /6/ J. G. Hannoosh und D. Steinmann
Die Zukunft hat begonnen: Wälzlager aus Siliziumnitrid-Keramik gewinnen an Boden
s. /1/, 263-272
- /7/ Anwendungsbeispiele von Siliziumnitrid-Keramikwälzlagern: Heißer Trockenläufer
tz für Metallbearbeitung, 82 (1988) [4] 44-45
- /8/ B. Bhushan and L.B. Sibley
Silicon nitride rolling bearings for extreme operating conditions
ASLE Transactions, 25 [4] 417-428
- /9/ D. Lange
Über die Verwendung von Nichtoxidkeramik in der Lager- und Dichtungstechnik
s. /1/, 254-262
- /10/ H. Knoch und J. Kracker
Gesintertes Siliziumkarbid
cfi/Ber. DKG, 5 (1987) 159-163

- /11/ U. Stevens
Keramische Funktionsteile in Messgeräten und Ventilen;
Einsatzfälle in extrem aggressiven Medien
s. /1/, 158-162
- /12/ A. Reckziegel
Korrosionsbeständige Schutzrohre aus Oxidkeramik
s. /1/, 187-196
- /13/ C. Razim, C. Kaniut und K.-H. Thiemann
Keramik als Werkstoff für verschleißbeanspruchte Bau-
teile
s. /1/, 1-19
- /14/ H. Czichos
The principles of system analysis and their application
to tribology
ASLE Transactions, 17 (1974) 300-306
- /15/ DIN 50320
Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvor-
gängen, Gliederung des Verschleißgebietes
Beuth-Verlag Berlin, Dez. 1979, 8 Seiten
- /16/ K.-H. Habig
Verschleiß und Härte von Werkstoffen
Hanser-Verlag München, Wien, 1980
- /17/ K.-H. Habig
Einführung in die Tribologie
Skript zur Vorlesung an der TU Berlin
- /18/ O.O. Ajayi and K.C. Ludema
Formation of transfer film during ceramics/ceramics
repeat pass sliding
Wear of Materials, 1 (1989) 349-359
- /19/ M. Woydt and K.-H. Habig
Influence of temperature and sliding speed on friction
and wear of SiSiC and MgO-ZrO₂
Ceramic Engineering Science Proc., 9 (1988) 1419-1430
- /20/ J. Breznak, E. Breval and N.H. MacMillan
Sliding friction and wear of structural ceramics
(Part 1)
Journal of Materials Science, 20 (1985) 4657-4680
- /21/ T.E. Fischer
Tribochemistry
Annual Review of Materials Science, 18 (1988) 303-323
- /22/ K.-H. Zum Gahr
Furchungsverschleiß; Reibung und Verschleiß;
Mechanismus-Prüfungstechnik-Werkstoffverhalten
Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.V., Oberursel,
Herausgeber K.-H. Zum Gahr, 1980
- /23/ A. Skopp
Einfluß von Temperatur und Gleitgeschwindigkeit auf
Festkörpergleitreibung und -verschleiß von Siliziumni-

tridpaarungen

Diplomarbeit an der TU Berlin, 1989

- /24/ M. Woydt
Reibung und Verschleiß von Zirkondioxidgleitpaarungen
in Abhängigkeit von Temperatur und Gleitgeschwindigkeit
Dissertation an der TU Berlin, 1989
- /25/ R.W. Rice
Micromechanics of microstructural aspects of ceramic
wear
Proc. of the 9th Annual Conference on Composites and
Advanced Materials, Jan. 1985, Cocoa Beach, 940-956
- /26/ M. Woydt und K.-H. Habig
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen
Verhalten keramischer Werkstoffe
BAM-Forschungsbericht 133, Jan. 1987
- /27/ M.A. Moore and F.S. King
Abrasive wear of brittle solids
Wear, 60 (1980) 123-140
- /28/ N.P. Suh
The delamination theory of wear
Wear, 25 (1973) 111-124
- /29/ D.W. Richerson, W.D. Carruthers and L.J. Lindberg
Contact stresses and coefficient of friction effects on
ceramic interfaces
Surfaces and interfaces in ceramic and ceramic-metal-
systems, ed. J.A. Pask and A.G. Evans, Plenum, New
York, 1981, 661-676
- /30/ G.M. Hamilton and L.E. Goodman
The stress field created by a circular sliding contact
Transactions of the ASME, 33 (1966) 371-376
- /31/ J.K. Lancaster
A review of the influence of environmental humidity and
water on friction, lubrication and wear
Tribology International, 23 (1990) [6] 371-389
- /32/ S. Sasaki
The effects of surrounding atmosphere on the friction
and wear of alumina, zirconia, silicon carbide and
silicon nitride
Wear, 134 (1989) 185-200
- /33/ G. Kapelski
Etudes des proprietes tribologiques de ceramique
thermo-mecaniques en fonction de la temperature et pour
différents environments
Thesis, University of Limoges, 1988
- /34/ R.S. Gates, S.M. Hsu and E.E. Klaus
Tribochemical mechanism of alumina with water
Tribology Transactions, 32 (1989) [3] 357-363
- /35/ N. Wallbridge, D. Dowson and E.W. Roberts

- The wear characteristics of sliding pairs of high density polycrystalline aluminium oxid under both dry and wet conditions
Wear of Materials, 2 (1983) 202-211
- /36/ H. Ishigaki, I. Kawaguchi, M. Iwasa and Y. Toibana
Friction and wear of hot-pressed silicon nitride and other ceramics
Wear of Materials, 1 (1985) 13-21
- /37/ D. Klaffke and K.-H. Habig
Fretting wear tests of silicon carbide
Wear of Materials, 2 (1987) 361-370
- /38/ H. Ishigaki, R. Nagato and M. Iwasa
Friction and wear of partially stabilized zirconia
Proc. Conference on Tribology, 2 (1987) 609-614
- /39/ D. Klaffke
Tribological surface layers in the fretting of ceramics
Proc. 14th Leeds-Lyon Symp. on Interface Dynamics, Elsevier, 1988, 237-244
- /40/ H.G. Scott
Friction and wear of zirconia at very low sliding speeds
Wear of Materials, 1 (1985) 8-12
- /41/ K.-H. Zum Gahr
Sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel and steel-steel pairs in lubricated and unlubricated contact
Wear, 133 (1989) 1-22
- /42/ K.-H. Habig and M. Woydt
Sliding friction and wear of Al₂O₃, ZrO₂, SiC and Si₃N₄
Proc. of the 5th International Congress on Tribology, June 1989, 106-113
- /43/ K.F. Dufrane and W.A. Glaeser
Wear of ceramics in advanced heat engine applications
Wear of Materials, 1 (1987) 285-291
- /44/ D.H. Buckley and K. Miyoshi
Tribological properties of structural ceramics
NASA TM-87105, 1985
- /45/ M. Woydt, D. Klaffke, K.-H. Habig and H. Czichos
Tribological transition phenomena of ceramic materials
Wear, 136 (1990) 373-381
- /46/ Y. Yamamoto and K. Okamoto
Effect of environment on wear and friction of Al₂O₃ and SiC ceramics
Proc. of the Japan International Tribology Conference, Nagoya 1990, 1455-1460
- /47/ K. Kato
Tribology of ceramics
Wear, 136 (1990) 117-133

- /48/ O.O. Ajayi and K.C. Ludema
Surface damage of structural ceramics: implications for wear modeling
Wear of Materials, 1 (1987) 349-360
- /49/ J.J. Habeeb, A.G. Blahey and W.N. Rogers
Wear and lubrication of ceramics
Proc. International Mechanical Engineering, 5 (1987) 555-564
- /50/ P. Studt
Adsorption von Schmierölzusätzen
Tribologie und Schmierungstechnik, 34 (1987) [1] 2-9
- /51/ P. Studt
Influence of lubricating oil additives on friction of ceramics under conditions of boundary lubrication
Nordic Symposium on Tribology, Lulea, June 1986
- /52/ P. Andersson and O. Ylöstala
The influence of lubrication on ceramic and steel sliding contacts
Materials Science and Engineering, 109 (1989) 407-413
- /53/ C.S. Yust and C.E. DeVore
The friction and wear of lubricated $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}(w)$ composites
Tribology Transactions, 34 (1991) [4] 497-504
- /54/ E.E. Klaus, J.L. Duda and W.-T. Wu
Lubricated wear of silicon nitride
Lubrication Engineering, 47 (1991) [8] 679-684
- /55/ R. Wäsche
Grundlagen und Anwendung von festen Schmierstoffen
BAM-Forschungsbericht 158, April 1989
- /56/ C. Della Corte
Experimental evaluation of chromium-carbide-based solid lubricant, coatings for use to 760°C
NASA CR-180808, 1987
- /57/ R. Wäsche
Feste Schmierstoffe für hohe Temperaturen
Tribologie und Schmierungstechnik, 36 (1989) [3] 145-151
- /58/ H.E. Sliney
Solid lubricant materials for high temperatures-a review
Tribology International, Oct. 1982, 303-314
- /59/ J.L. Lauer and B.G. Bunting
High temperature solid lubrication by catalytically generated carbon
Tribology Transactions, 31 (1987) [3] 338-349
- /60/ S. Sasaki
Adsorption activities and friction properties of sintered alumina

- Proc. of the Japan International Tribology Conference,
Nagoya 1990, 1431-1436
- /61/ S. Sasaki
The effects of water on friction and wear of ceramics
Journal of JSLE International Edition, 10 (1989) 21-26
- /62/ P. Salonen, P. Andersson and P. Lintula
Oil lubricated and water lubricated pin-on-disc wear
tests with engineering ceramics
Helsinki University of Technology, Publication No.
C228, 1990
- /63/ T.A. Michalske and S.W. Freiman
A molecular mechanism for stress corrosion in vitreous
silica
Journal of the American Ceramic Society, 66 (1983) [4]
284-288
- /64/ T.A. Michalske and B.C. Bunker
Stress corrosion of ionic and mixed ionic/covalent
solids
Journal of the American Ceramic Society, 69 (1986) [10]
721-724
- /65/ T. Sato and M. Shimada
Transformation of yttria-doped tetragonal ZrO₂ polycry-
stals by annealing in water
Journal of the American Ceramic Society, 68 (1985) [6]
356-359
- /66/ R.S. Gates, S.M. Hsu and E.E. Klaus
Ceramic tribology: methodology and mechanism of alumina
wear
National Institute of Standards and Technology, Special
Publication 758, Sept. 1988
- /67/ H. Kim, D. Shin and T.E. Fischer
Mechanical and chemical aspects in the wear of alumina
Proc. of the Japan International Tribology Conference,
Nagoya 1990, 1437-1442
- /68/ B.H. Dalglesh and R.D. Rawlings
A comparison of the mechanical behaviour of aluminas in
air and simulated body environments
Journal of Biomedical Materials Research, 15 (1981)
527-542
- /69/ A.R.C. Westwood, N.H. MacMillan and R.S. Kalyoncu
Environment-sensitive hardness and machinability of
Al₂O₃
Journal of the American Ceramic Society, 56 (1973) [5]
258-262
- /70/ H. Shimura and Y. Tsuya
Effects of atmosphere on the wear rate of some ceramics
and cermets
Wear of Materials, (1977) 452-461

- /71/ A.R.C. Westwood, J.S. Ahearn and J.J. Mills
 Developments in the theory and applications of chemomechanical effects
 Colloids and Surfaces, 2 (1981) 1-35
- /72/ P.A. Rehbinder and E.D. Shahukin
 Surface phenomena in solids during deformation and fracture processes
 Progress Surface Science, 3 (1972) 97-188
- /73/ T.E. Fischer, M.P. Anderson, S. Jahanmir and R. Salher
 Friction and wear of tough and brittle zirconia in nitrogen, air, water, hexadecane and hexadecane containing stearic acid
 Wear, 124 (1988) 133-148
- /74/ W. Bundschuh und K.-H. Zum Gahr
 Einfluß der Porosität auf den Verschleiß keramischer Gleitpaarungen aus TZP-ZrO₂
 Universität Karlsruhe, Institut für Keramik im Maschinenbau, Jahresbericht 1990, 97-102
- /75/ J.F. Braza, H.S. Cheng, M.E. Fine, A.K. Gangopadhyay, L.M. Keer and R.E. Worden
 Mechanical failure mechanism in ceramic sliding and rolling contacts
 Tribology Transactions, 32 (1989) 1-8
- /76/ T. Sugita, K. Ueda and Y. Kanemura
 Material removal mechanism of silicon nitride during rubbing in water
 Wear, 97 (1984) 1-8
- /77/ S. Jahanmir and T.E. Fischer
 Friction and wear of silicon nitride lubricated by humid air, water, hexadecane and hexadecane+0,5 percent stearic acid
 STLE Transactions, 31 (1986) [1] 32-43
- /78/ H. Tomizawa and T.E. Fischer
 Friction and wear of silicon nitride and silicon carbide in water: hydrodynamic lubrication at low sliding speed obtained by tribochemical wear
 ASLE Transactions, 30 (1988) [1] 41-46
- /79/ R.K. Iler
 The chemistry of silica
 John Wiley and Sons, New York, 622-729
- /80/ Y. Kanno, K. Suzuki and Y. Kuwahara
 NH₃ formation caused by presence of H₂O in the wet grinding of silicon nitride powder
 Yogyo-Kyokai-Shi, 91 (1983) [8] 386-388
- /81/ T.E. Fischer and H. Tomizawa
 Interaction of tribochemistry and microfracture in the friction and wear of silicon nitride
 Wear, 105 (1985) 29-45

- /82/ P. Kapsa and Y. Enomoto
Sliding damage on hot-pressed and sintered silicon nitride caused by diamond tip under controlled humidity
Wear, 127 (1988) 65-83
- /83/ L.M. Keer and R.E. Worden
A qualitative model to describe the microchipping wear mode in ceramic rollers
Tribology Transactions, 33 (1990) [3] 411-417
- /84/ Y. Tsuya
Tribology of ceramics
Proc. of the JSLE International Tribology Conference, Tokyo 1985, 641-646
- /85/ K.Miyoshi and D.H. Buckley
Anisotropic tribological properties of Silicon carbide
Wear of Materials, (1981) 501-509
- /86/ D. Klaffke und P. Lucke
Tribologisches Verhalten modifizierter SiC-Keramiken in aggressiven Medien
Tagungsband zur 5. Präsentation Tribologie, Koblenz, Mai 1991, 244-256
- /87/ P. Kapsa, M. Bauer and D. Mazuyer
Effect of environmental parameters on friction of alumina
Proc. of the Japan International Tribology Conference, Nagoya 1990, 1419-1424
- /88/ Y. Mizutani, Y. Shimura, Y. Yahagi and S. Hotta
Friction and wear of ceramics in various environments
Proc. of the Japan International Tribology Conference, Nagoya 1990, 1461-1466
- /89/ W. Genthe und H. Hausner
Korrosion keramischer Werkstoffe
DKG-Vorträge: Keramik in der Anwendung, Verschleiß und Korrosion, Mai 1990, 132-140
- /90/ W. Genthe, J. Kadoori-al Robayie und H. Hausner
Korrosion von SiC/TiC-Werkstoffen in Säuren und Laugen
DKG-Jahrestagung, Sept. 1990, 9-11
- /91/ K.G. Nickel, R. Danzer, G. Schneider und G. Petzow
Korrosion und Oxidation von Hochleistungskeramik
BMFT-Verbundprojekt 03M2012
- /92/ R. Stevens
Zirconia and zirconia ceramics
Department of Ceramics, University of Leeds, Published by Magnesium Elektron Ltd
- /93/ W. Genthe und H. Hausner
Korrosionsverhalten von Aluminiumoxid in Säuren und Laugen
cfi/Ber. DKG, 67 (1990) [1/2] 6-10
- /94/ Datenblatt der Fa. Wazau, Mess- und Prüfsysteme

- /95/ E. Santner
Rechnergestützte Prüftechnik in der Tribologie
Materialprüfung, 32 (1990) [1/2] 18-24
- /96/ M. Gienau, M. Woydt und K.-H. Habig
Hochtemperaturtribometer für Reibungs- und Verschleiß-
untersuchungen bis 1000°C
Materialprüfung, 29 (1987) [7/8] 197-199
- /97/ Datenblatt der Fa. Schunk Kohlenstofftechnik GmbH
- /98/ Datenblatt der Fa. Hoechst CeramTec AG
- /99/ DIN 4768
Ermittlung der Rauheitsmeßgrößen R_a , R_z , R_{max} mit elek-
trischen Tastschnittgeräten
Beuth-Verlag Berlin, Aug. 1974, 4 Seiten
- /100/ DIN 4776
Kenngrößen R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{z1} , M_{z2} zur Beschreibung des
Materialanteils im Rauheitsprofil
Beuth-Verlag Berlin, Mai 1990, 5 Seiten+Beiblatt
- /101/ S. Hofmann
Charakterisierung keramischer Werkstoffe mit der Auger-
Elektronenspektroskopie: Möglichkeiten und Grenzen
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 21 (1990)
93-104
- /102/ H. Salmang und H. Scholze
Keramik, Teil 2: Keramische Werkstoffe
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo,
6. Auflage
- /103/ M. Woydt, A. Skopp und K.-H. Habig
Dry friction and wear of self-mated sliding couples of
SiC-TiC and Si₃N₄-TiN
Wear, 148 (1991) 377-394
- /104/ D. Kuhlmann-Wilsdorf
Flash temperatures due to friction and joule heat at
asperity contacts
Wear, 105 (1985) 187-198
- /105/ D. Kuhlmann-Wilsdorf
Demystifying flash temperatures
Materials Science Engineering, 93 (1987) 107-133
- /106/ D. Kuhlmann-Wilsdorf
Temperatures at interfacial contact spots: dependence
on velocity and on role reversal of materials in
sliding contact
Transactions of the ASME, 109 (1987) 321-329
- /107/ H. Blok
Theoretical study of temperature rise at surfaces of
actual contact under oiliness lubricating conditions
Mechanical Engineers, General Discussion on Lubrication
and Lubricants, 2 (1937) 222-235

- /108/ H.S. Carslaw and J.C. Jaeger
The conduction of heat in solids
Oxford University Press, London, 2nd edition (1959)
- /109/ J.C. Jaeger
Moving sources of heat and temperature at sliding contact
J. Proc. R. Soc. N.S.W., 76 (1942) 203-224
- /110/ B. Hwang, C.R. Houska, G.E. Ice and A. Habenschuss
X-ray analysis of the near-surface phase distribution
applied to wear on a PSZ-disc
Advanced Ceramic Materials, 3 (1988) [2] 180-183
- /111/ M. Woydt and K.-H. Habig
High temperature tribology of ceramics
Tribology International, 22 (1989) [2] 75-88

9. Anhang

Seitennummer 1
14.03.91

TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN SSi3N4/SSi3N4 (ND 200) - GLEITPAARUNGEN
NORMALKRAFT = 22 N, MISCHREIBUNG

BAM-Code-Grundkörper	BAM-Code-Gegenkörper	Zwischenstoff	Rauheit Gegenkörper Ra [µm]	Temperatur T [°C]	Gleitgeschwindigkeit v [m/s]	Laufweg s [m]	Reibungszahl nach 2000 m	Verschleißvolumen Grundk. Wv [mm³]	Verschleißvolumen Gegenk. Wv [mm³]	Summierter Verschleißkoeffizient [mm³/Nm]*E-9
UO 201	UO 801 B	H2O	0,060	23	0,10000	2000	0,040	0,053000	0,070000	2800
UO 202	UO 802 B	NaOH (pH 13)	0,070	23	0,10000	2000	0,030	0,017000	0,018000	790
UO 204	UO 804 B	KOH (pH 13)	0,080	23	0,10000	2000	0,050	0,018000	0,060000	1800
UO 205	UO 805 B	HCl (pH 3)	0,090	23	0,10000	2000	0,020	0,024000	0,041000	1560
UO 206	UO 806 B	HNO3 (pH 3)	0,080	23	0,10000	2000	0,020	0,016000	0,035000	1180
UO 207	UO 807 B	H2SO4 (pH 3)	0,100	23	0,10000	2000	0,040	0,013000	0,021000	750
UO 208	UO 808 B	H3PO4 (pH 3)	0,080	23	0,10000	2000	0,150	0,005500	0,008600	330
UO 209	UO 809 B	CH3COOH (pH 3)	0,080	23	0,10000	2000	0,040	0,003900	0,005600	219
UO 210	UO 810 B	NH4OH (pH 12)	0,070	23	0,10000	2000	0,040	0,084000	0,091000	3900
UO 211	UO 811 B	NH4OH (pH 12)	0,080	23	0,10000	2000	0,030	0,084000	0,110000	4400
UO 212	UO 812 B	KOH (pH 13)	0,090	23	0,10000	2000	0,530	0,012000	0,078000	2070
UO 213	UO 813 B	HCl (pH 3)	0,100	23	0,10000	2000	0,030	0,003300	0,009300	285
UO 214	UO 814 B	HClO4 (pH 3)	0,080	23	0,10000	2000	0,010	0,004100	0,013000	393
UO 216	UO 816 B	CH3COOH (pH 3)	0,100	23	0,10000	2000	0,020	0,003500	0,008600	280
UO 217	UO 817 B	HCl (pH 3)	0,100	23	0,10000	2000	0,020	0,005000	0,005900	250
UO 218	UO 818 B	trocken (30I r.F.)	0,100	23	0,10000	2000	0,790	0,027000	0,094000	2710

Seitennummer 1
14.03.91

TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN HIP-RBSN/HIP-RBSN (411) - GLEITPAARUNGEN
NORMALKRAFT = 22 N, MISCHREIBUNG

BAM-Code-Grundkörper	BAM-Code-Gegenkörper	Zwischenstoff	Rauheit Gegenkörper Ra [µm]	Temperatur T [°C]	Gleitgeschwindigkeit v [m/s]	Laufweg s [m]	Reibungszahl nach 2000 m	Verschleißvolumen Grundk. Wv [mm³]	Verschleißvolumen Gegenk. Wv [mm³]	Summierter Verschleißkoeffizient [mm³/Nm]*E-9
VP 210	VP 810 B	H2O	0,050	23	0,10000	2000	0,020	0,071000	0,140000	4800
VP 201	VP 801 B	NaOH (pH 13)	0,080	23	0,10000	2000	0,040	0,002300	0,008500	252
VP 202	VP 802 B	KOH (pH 13)	0,090	23	0,10000	2000	0,030	0,003200	0,009900	302
VP 204	VP 804 B	HCl (pH 3)	0,030	23	0,10000	2000	0,030	0,028000	0,082000	2530
VP 203	VP 803 B	HNO3 (pH 3)	0,060	23	0,10000	2000	0,020	0,017000	0,045000	1390
VP 205	VP 805 B	H2SO4 (pH 3)	0,040	23	0,10000	2000	0,020	0,019000	0,033000	1160
VP 206	VP 806 B	H3PO4 (pH 3)	0,050	23	0,10000	2000	0,030	0,003100	0,013000	360
VP 207	VP 807 B	CH3COOH (pH 3)	0,030	23	0,10000	2000	0,020	0,004900	0,015000	440
VP 208	VP 808 B	NH4OH (pH 12)	0,040	23	0,10000	2000	0,110	0,058000	0,180000	5300
VP 209	VP 809 B	NH4OH (pH 12)	0,050	23	0,10000	2000	0,020	0,039000	0,170000	4890
VP 211	VP 811 B	H2O	0,040	23	0,10000	2000	0,020	0,021000	0,078000	2280
VP 212	VP 812 B	NaOH (pH 13)	0,040	23	0,10000	2000	0,040	0,004100	0,007700	263
VP 213	VP 813 B	KOH (pH 13)	0,040	23	0,10000	2000	0,030	0,004100	0,011000	353
VP 214	VP 814 B	H3PO4 (pH 3)	0,040	23	0,10000	2000	0,020	0,004900	0,016000	480
VP 215	VP 815 B	NH4OH (pH 12)	0,040	23	0,10000	6300	0,170	0,110000	0,270000	6690
VP 216	VP 816 B	NH4OH (pH 12)	0,040	23	0,10000	7000	0,130	0,045000	0,230000	5290
VP 217	VP 817 B	HClO4 (pH 3)	0,040	23	0,10000	2000	0,020	0,004400	0,021000	600
VP 200	VP 800 B	trocken (30I r.F.)	0,040	23	0,10000	2000	1,050	0,036000	0,084000	2720

Seitennummer 1
14.03.91

TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN SSiC/SSiC (EkaSiC D) - GLEITPAARUNGEN
NORMALKRAFT = 22 N, MISCHREIBUNG

BAM-Code-Grundkörper	BAM-Code-Gegenkörper	Zwischenstoff	Rauheit Gegenkörper Ra [µm]	Temperatur T [°C]	Gleitgeschwindigkeit v [m/s]	Laufweg s [m]	Reibungszahl nach 2000 m	Verschleißvolumen Grundk. Wv [mm³]	Verschleißvolumen Gegenk. Wv [mm³]	Summierter Verschleißkoeffizient [mm³/Nm]*E-9
UD 200	UD 800 B	H2O	0,020	23	0,10000	2000	0,030	0,023000	0,010000	760
UD 203	UD 803 B	NaOH (pH 13)	0,020	23	0,10000	2000	0,040	0,023000	0,010000	760
UD 204	UD 804 B	KOH (pH 13)	0,020	23	0,10000	2000	0,030	0,018000	0,009800	630
UD 201	UD 801 B	HCl (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,020	0,021000	0,009400	690
UD 202	UD 802 B	HNO3 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,020	0,021000	0,015000	820
UD 205	UD 805 B	NaOH (pH 13)	0,020	23	0,10000	2000	0,030	0,021000	0,011000	730
UD 207	UD 807 B	H2SO4 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,030	0,026000	0,015000	940
UD 208	UD 808 B	H3PO4 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,020	0,022000	0,011000	750
UD 209	UD 809 B	CH3COOH (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,020	0,018000	0,009400	620
UD 210	UD 810 B	NH4OH (pH 12)	0,020	23	0,10000	2000	0,010	0,014000	0,005900	460
UD 211	UD 811 B	trocken (30I r.F.)	0,020	23	0,10000	1000	0,000	0,095000	0,140000	7500
UD 212	UD 812 B	HClO4 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,020	0,020000	0,015000	780
UD 216	UD 816 B	H2O	0,020	23	0,10000	2000	0,020	0,020000	0,007700	630
UD 215	UD 817 B	trocken (30I r.F.)	0,020	23	0,10000	2000	0,660	0,056000	0,082000	3200

Tab. 8-10
Versuchsergebnisse der Mischreibungsversuche mit
SSi₃N₄-, HIP-RBSi₃N₄- und SSiC-Gleitpaarungen

Seitennummer 1
14.03.91

TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN SiSiC-P/SiSiC-P - GLEITPAARUNGEN
NORMALKRAFT = 22 N, MISCHREIBUNG

BAM-Code-Grundkörper	BAM-Code-Gegenkörper	Zwischenstoff	Rauheit Gegenkörper Ra [μm]	Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$]	Gleitgeschwindigkeit v [m/s]	Laufweg s [m]	Reibungszahl nach 2000 m	Verschleißvolumen Grundk. Wv [mm^3]	Verschleißvolumen Gegenk. Wv [mm^3]	Summierter Verschleißkoeffizient [mm^3/Nm]*E-9
WG 200	WG 800 B	H2O	0,020	23	0,10000	2000	0,180	0,180000	0,140000	7300
WG 203	WG 803 A	NaOH (pH 13)	0,020	23	0,10000	2000	0,180	0,100000	0,054000	3500
WG 205	WG 805 A	KOH (pH 13)	0,020	23	0,10000	2000	0,210	0,110000	0,079000	4300
WG 201	WG 801 B	HCl (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,150	0,140000	0,110000	5700
WG 202	WG 802 B	HNO3 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,190	0,210000	0,160000	8400
WG 204	WG 804 A	H2SO4 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,140	0,180000	0,140000	7300
WG 206	WG 806 A	H3PO4 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,200	0,200000	0,150000	7800
WG 207	WG 807 A	CH3COOH (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,220	0,200000	0,170000	8300
WG 208	WG 808 B	NH4OH (pH 12)	0,020	23	0,10000	2000	0,210	0,210000	0,130000	7700
WG 209	WG 809 A	HClO4 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,190	0,200000	0,160000	8000
WG 214	WG 804 B	H2SO4 (pH 3)	0,020	23	0,10000	2000	0,200	0,210000	0,150000	8200
WG 215	WG 805 B	KOH (pH 13)	0,020	23	0,10000	2000	0,190	0,060000	0,040000	2310
WG 216	WG 810 B	trocken (30% r.F.)	0,020	23	0,10000	2000	0,620	0,070000	0,084000	3500

Seitennummer 1
14.03.91

TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN MgO-ZrO2/MgO-ZrO2 (2N 40) - GLEITPAARUNGEN
NORMALKRAFT = 22 N, MISCHREIBUNG

BAM-Code-Grundkörper	BAM-Code-Gegenkörper	Zwischenstoff	Rauheit Gegenkörper Ra [μm]	Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$]	Gleitgeschwindigkeit v [m/s]	Laufweg s [m]	Reibungszahl nach 2000 m	Verschleißvolumen Grundk. Wv [mm^3]	Verschleißvolumen Gegenk. Wv [mm^3]	Summierter Verschleißkoeffizient [mm^3/Nm]*E-5
UA 200	UA 800 B	H2O	0,010	23	0,10000	2000	0,370	0,009300	0,002100	260
UA 203	UA 803 B	NaOH (pH 13)	0,010	23	0,10000	2000	0,420	0,006400	0,006900	300
UA 201	UA 801 B	KOH (pH 13)	0,010	23	0,10000	2000	0,430	0,052000	0,040000	2110
UA 202	UA 802 B	HCl (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,300	0,015000	0,007400	510
UA 204	UA 804 B	HNO3 (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,410	0,024000	0,016000	920
UA 205	UA 805 B	H2SO4 (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,700	0,007400	0,003300	243
UA 206	UA 806 B	H3PO4 (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,420	0,003700	0,008500	284
UA 207	UA 807 B	CH3COOH (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,280	0,013000	0,003400	377
UA 208	UA 808 B	NH4OH (pH 12)	0,010	23	0,10000	2000	0,440	0,004800	0,004500	210
UA 209	UA 809 B	CH3COOH (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,180	0,007500	0,001400	201
UA 210	UA 810 B	HClO4 (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,340	0,002800	0,003000	132
UA 211	UA 812 B	KOH (pH 13)	0,010	23	0,10000	2000	0,350	0,001700	0,003700	-23
UA 212	UA 811 B	HClO4 (pH 3)	0,010	23	0,10000	2000	0,270	0,002300	0,004100	-45
UA 213	UA 813 B	KOH (pH 13)	0,010	23	0,10000	2000	0,390	0,001000	0,002200	74
UA 214	UA 814 B	trocken (30% r.F.)	0,010	23	0,10000	2000	0,890	2,200000	1,700000	89000

Seitennummer 1
14.03.91

TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN Al2O3/Al2O3 (A1999.7) - GLEITPAARUNGEN
NORMALKRAFT = 22 N, MISCHREIBUNG

BAM-Code-Grundkörper	BAM-Code-Gegenkörper	Zwischenstoff	Rauheit Gegenkörper Ra [μm]	Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$]	Gleitgeschwindigkeit v [m/s]	Laufweg s [m]	Reibungszahl nach 2000 m	Verschleißvolumen Grundk. Wv [mm^3]	Verschleißvolumen Gegenk. Wv [mm^3]	Summierter Verschleißkoeffizient [mm^3/Nm]*E-5
TZ 200	TZ 800 B	H2O	0,060	23	0,10000	2000	0,220	0,000250	0,002600	65
TZ 203	TZ 803 B	NaOH (pH 13)	0,060	23	0,10000	2000	0,140	0,015000	0,017000	720
TZ 201	TZ 801 B	KOH (pH 13)	0,060	23	0,10000	2000	0,140	0,010000	0,019000	660
TZ 202	TZ 802 B	HCl (pH 3)	0,060	23	0,10000	2000	0,150	0,006100	0,009800	360
TZ 204	TZ 804 B	HNO3 (pH 3)	0,060	23	0,10000	2000	0,150	0,005700	0,013000	430
TZ 205	TZ 805 B	H2SO4 (pH 3)	0,060	23	0,10000	2000	0,150	0,005700	0,010000	370
TZ 206	TZ 806 B	H3PO4 (pH 3)	0,060	23	0,10000	2000	0,180	0,009200	0,013000	510
TZ 207	TZ 807 B	CH3COOH (pH 3)	0,060	23	0,10000	2000	0,140	0,005600	0,007800	320
TZ 208	TZ 808 B	NH4OH (pH 12)	0,060	23	0,10000	2000	0,140	0,006900	0,009300	370
TZ 209	TZ 809 B	H2O	0,060	23	0,10000	2000	0,250	0,000130	0,001900	45
TZ 210	TZ 810 B	HClO4 (pH 3)	0,060	23	0,10000	2000	0,140	0,002600	0,001900	123
TZ 211	TZ 811 B	H2O	0,060	23	0,10000	2000	0,260	0,000150	0,001500	36
TZ 212	TZ 812 B	trocken (30% r.F.)	0,060	23	0,10000	2000	0,490	0,000110	0,001500	37

Tab. 11-13
Versuchsergebnisse der Mischreibungsversuche mit
SiSiC-, MgO-ZrO₂- und Al₂O₃-Gleitpaarungen

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

- Nr. 1/1968
Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Nr. 2/1970 (vergriffen)
G. Andreae
Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
- Nr. 3/1970
J. Ziebs
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungssellen als Beispiel für Verbundbauteile
- Nr. 4/1970 (vergriffen)
A. Burmester
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren
- Nr. 5/1971
N. Steiner
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
- Nr. 6/1971
P. Schneider
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
- Nr. 7/1971
H.-J. Petrowitz
Chromatographie und chemische Konstitution – Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
- Nr. 8/1971
H. Veith
Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
- Nr. 9/1971
K.-H. Möller
Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
- Nr. 10/1972
D. Aurich, E. Martin
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
- Nr. 11/1972
H.-J. Krause
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
- Nr. 12/1972
H. Feuerberg
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
- Nr. 13/1972
K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
- Nr. 14/1972
E. Fischer
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
- Nr. 15/1972
H. Pohl
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
- Nr. 16/1972
E. Knublauch
Über Ausführung und Assagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
- Nr. 17/1972
P. Reimers
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
- Nr. 18/1973
W. Struck
Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
- Nr. 19/1973
K. Kaffanke, H. Czichos
Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
- Nr. 20/1973
R. Rudolphi
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
- Nr. 21/1973
D. Klaffke, W. Maennig
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrung
- Nr. 22/1973
R. Rudolphi, E. Knublauch
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
- Nr. 23/1973
W. Ruske
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
- Nr. 24/1973
J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
- Nr. 25/1973
E. Knublauch
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
- Nr. 26/1974
P. Jost, P. Reimers, P. Weise
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM – Eigenschaften und erste Anwendungen
- Nr. 27/1974
H. Wüstenberg
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
- Nr. 28/1974
H. Heinrich
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
- Nr. 29/1974
P. Schneider
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schallenfall
- Nr. 30/1974 (vergriffen)
H. Czichos, G. Salomon
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
- Nr. 31/1975
G. Fuhrmann
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
- Nr. 32/1975
R. Rudolphi, B. Böttcher
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
- Nr. 33/1975
A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
- Nr. 34/1976 (vergriffen)
H.-J. Deppe
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff Nr. 35/1976
E. Limberger
Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper – Vorschlag für ein Prüfverfahren –
- Nr. 36/1976 (vergriffen)
J. Hundt
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
- Nr. 37/1976
W. Struck
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen – Vorschlag für ein Prüfverfahren –
- Nr. 38/1976
K.-H. Habig
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
- Nr. 39/1976
K. Kirschke, G. Kempf
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
- Nr. 40/1976
H. Hantsche
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
- Nr. 41/1976
B. Böttcher
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
- Nr. 42/1976
S. Dietlen
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
- Nr. 43/1976
W. Struck
Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
- Nr. 44/1976
W. Matthees
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
- Nr. 45/1976
W. Paatsch
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
- Nr. 46/1977 (vergriffen)
G. Schickert, H. Winkler
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
- Nr. 47/1977
A. Plank
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
- Nr. 48/1977
U. Holzlöhner
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
- Nr. 49/1977
G. Wittig
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
- Nr. 50/1978 (vergriffen)
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andreae, W. Markowski
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
- Nr. 51/1978
J. Sickfeld
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
- Nr. 52/1978
A. Tomov
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
- Nr. 53/1978
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
- Nr. 54/1978
H. Sander
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 55/1978
D. Klaffke
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegebeanspruchung
- Nr. 56/1979
W. Brüner, C. Langlie
Stabilität von Sandwichbauteilen
- Nr. 57/1979
M. Stadthaus
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung

Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing

Nr. 58/1979

W. Struck

Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau

Nr. 59/1979

G. Plauk

Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl

Nr. 60/1979

H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs

Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken

Nr. 61/1979

K. Richter

Beschreibung von Problemen der höheren Farbmimetrie mit Hilfe des Gegenfarbensystems

Nr. 62/1979

W. Gerisch, G. Becker

Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle

Nr. 63/1979

E. Behrend, J. Ludwig

Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schleibern für Gase

Nr. 64/1980

W. Rücker

Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung

Nr. 65/1980

P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs

Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte

Nr. 66/1980

M. Hattwig

Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung

Nr. 67/1980

W. Matthees

Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung

Nr. 68/1980

D. Petersohn

Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.

Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Gonometers

Nr. 69/1980

F. Buchhardt, P. Brandl

Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitsbehältern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise

Nr. 70/1980 (vergriffen)

G. Schickert

Schwellenwerte beim Betondruckversuch

Nr. 71/1980

W. Matthees, G. Magiera

Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen

Nr. 72/1980

R. Rudolphi

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen

Nr. 73/1980

P. Wegener

Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen

Nr. 74/1980

R. Rudolphi, R. Müller

ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz

Nr. 75/1980

H.-J. Heinrich

Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen

Nr. 76/1980

D. Klaffke, W.-W. Maennig

Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop

Nr. 77/1981

M. Gierloff, M. Maulzsch

Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen

Nr. 78/1981

W. Rücker

Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund

Nr. 79/1981

V. Neumann

Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrüßneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch

Nr. 80/1981

A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch

Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten

Nr. 81/1981

J. Schmidt

Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik

Nr. 82/1982

R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski

Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test

Nr. 83/1982

H. Czichos, P. Feinle

Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -

Nr. 84/1982

R. Müller, R. Rudolphi

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982

H. Czichos

Technische Materialforschung und -prüfung
- Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ -
Materials Research and Testing
- Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme "Basic Technological Research" -

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982

K. Niesel, P. Schimelwitz

Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982

B. Isecke, W. Stichel

Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren

Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983

A. Erhard

Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall

Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983

D. Conrad, S. Dietlen

Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid

Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983

K. Brandes, E. Limberger, J. Herter

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983

M. Weber

Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz

Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983

L. Auersch

Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden

Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983

P. Studt

Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurveneräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983

Xian-Quan Dong

Untersuchungen der Störerschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen

Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983

M. Römer

Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten

Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983

H. Eifler

Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken

Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983

G. Fuhrmann, W. Schwarz

Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung

Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983

E. Schnabel

Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren
- Stretch- und Erholungsvermögen -

Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983

K. Brandes, E. Limberger, J. Herter

Kinetische Grenztragfähigkeit von Stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984

G. Klamrowski, P. Neustupny

Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand

Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984

P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie

Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984

G. Magiera

Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton

Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984

D. Schnitger

Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien

Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984

M. Gierloff

Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen

Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984

B. Schulz-Förberg

Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen

Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984

J. Lehnert

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last

Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984

W. Stichel, J. Ehreke

Korrosion von Stahlradiatoren

Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984

L. Auersch

Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen

Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985

M. Omar

Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N

Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985

H. Walde, B. Kropp

Wasserstoff als Energieträger

Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985

K. Ziegler

Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Anfox-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte

Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985

W. Lützwow

Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen

Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985

R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito

Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen

- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985
K. Richter
Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985
H. Czichos, G. Sievers
**Materials Technologies and Techno-Economic Development
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung. Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986
A. Hecht
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986
P. Feinle, K.-H. Habig
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzung und Wärmebehandlung
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986
J. Mischke
Entsorgung kerntechnischer Anlagen.
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Förberg, K.E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986
D. Rennoch
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986
H.-M. Thomas
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)
B. Droste, U. Probst
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986
W. Stichel
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehgeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986
W. Struck
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987
Chr. Herold, F.-U. Vogdt
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)
M. Woydt, K.-H. Habig
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987
G. Andreae, G. Niessen
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987
H.-J. Deppe, K. Schmidt
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987
M. Dogunke, F. Buchhardt
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987
J. Olschewski, S.-P. Scholz
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987
U. Holzjöhner
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987
W. Schön, M. Mallon
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987
H.-D. Kleinschrodt
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988
W. Müller
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988
U. Holzjöhner
Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988
M. Weber
VG3D Zeichenprogramm für Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988
L. Auersch-Saworski
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988
H. Sander, W.-W. Maennig
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988
K. Breitzkreutz, R. Uttech, K. Haedecke
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988
L. Auersch
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989
E. Limberger, K. Brandes
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugsbewehrung unter stoßartiger Belastung
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989
R. Wäsche, K.-H. Habig
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung – Literaturübersicht –
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989
R. Müller, R. Rudolphi
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989
W. Matthees
Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989
G. Mellmann, M. Maultzsch
Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989
W. Brüner
Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989
W. Brüner, G. Mellmann, W. Struck
Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork
Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger

Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller
Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission.
Teil B: Textilien

Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989
K. Breitzkreutz
Modelle für Stereologische Analysen

Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989
A. Mitakidis, W. Rücker
Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen

Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi
Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels

Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990
Chr. Kohl, W. Rücker
Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)

Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990
P. Studt, W. Kerner, Tin Win
Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen

Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990
F. Buchhardt
Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung

Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990
J. Vielhaber, G. Plauk
Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen

Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg
Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter

Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte

Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski
Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik

Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990
W. Matthees, G. Magiera
Iterative Dekonvolution der seismischen Basiseregung für den Zeitraum

Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggenhauser
Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken

Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen
Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C

Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991
H. Eifler
Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente

Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991
E. Klement, G. Wieser
Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten

Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow
Industrial and Materials Technologies: Research and Development Trends and Needs

Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992
M. Weber
Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken

Nr. 183/ISBN 3-89429-163-x/1992
F. Buchhardt
Zur Dekonvolution im Zeitbereich

Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-J. Vater
Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf

Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs „Umweltfreundlicheres Streusalz“)

Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992
Renate Müller
Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen
- Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen

Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig
Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen