

Ute Effner
Mathias Woydt

Wälzverschleiß und Endbearbeitung von Ingenieurkeramiken

Einfluss der bearbeitungsbedingten Oberflächenausbildung auf das tribologische Verhalten unter Wälzreibung und deren Charakterisierung mittels Ultraschallmikroskopie

237

Forschungsbericht



Die Aufgaben
der Bundesanstalt
stehen unter der Leitlinie:

Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik

Die Aufgaben

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungserlaß die Zweckbestimmung, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern. Sie ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- ▶ Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- ▶ Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z.B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- ▶ Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- ▶ Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- ▶ Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

Die Tätigkeitsbereiche

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfaßt die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- ▶ Forschung und Entwicklung
- ▶ Prüfung, Analyse und Zulassung
- ▶ Beratung und Information.

Die nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstituten, eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Meßwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MNPQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

Der Status

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie Nachfolgeinstitution des 1871 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1700 Mitarbeiter, darunter mehr als 800 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Dr. rer. nat. Ute Effner
Dr.-Ing. Mathias Woydt

Wälzverschleiß und Endbearbeitung von Ingenieurkeramiken

Einfluss der bearbeitungsbedingten Oberflächen-
ausbildung auf das tribologische Verhalten
unter Wälzreibung und deren Charakterisierung
mittels Ultraschall

Aus dem DFG-Schwerpunktprogramm 322 697:
Bearbeitungsbedingte Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften keramischer Werkstoffe
von der DFG gefördert unter: Wo 521/1-1 bis -6

Impressum

Forschungsbericht 237

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
D-12205 Berlin
Postanschrift: D-12200 Berlin
Telefon (0 30) 81 04-0
Telefax (0 30) 8 11 20 29
E-Mail: info@bam.de
Internet: <http://www.bam.de>

Copyright © 2000 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76
D-27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 9 45 44-0
Telefax (04 71) 9 45 44 77/88

Umschlag: Lutz Mittenzwei
Layout: BAM, Referat G.3

ISSN 0938-5533
ISBN 3-89701-520-X

Zusammenfassung

Die vorliegenden Untersuchungen haben erwartungsgemäß gezeigt, dass der Wälzverschleiß eines Bauteils abhängig ist von folgenden Parametern:

- a) vom Werkstoff selbst,
- b) von der Endbearbeitung der Funktionsfläche,
- c) von dem Zwischenmedium und
- d) von der Pressung.

Unerwartet dagegen war das Ergebnis, dass mit der Wahl des Zwischenmediums und der Endbearbeitung bzw. des Zeitspannvolumens der Wälzverschleißbetrag einer Werkstoffpaarung über mehrere Zehnerpotenzen „eingestellt“ werden kann.

Alle hier untersuchten Werkstoffe eignen sich für eine Wälzbelastung in Paraffinöl, wenn auch bei den SiC-Werkstoffen die Flächenpressung angepasst werden musste.

Mit dem neu am Markt eingeführten ZrO_2 -Werkstoff ist ein Material verfügbar, welches unter Wälzbelastung in Paraffinöl bei feiner Endbearbeitung der Funktionsflächen Verschleißbeträge unterhalb der Nachweisgrenze erreicht.

Für die Wälzbelastung in Wasser sind nur wenige Werkstoffe geeignet, da es aufgrund tribochemischer Prozesse zu Pitting kommen kann.

Die Fragestellung des Forschungsprojektes konnte beantwortet und Ergebnissen zugeführt werden.

Alle im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse haben Eingang in die tribologische Faktendatensammlung Tribocollect, welche über BAM-VIII.11 erhältlich ist, gefunden.

Für die Zukunft bleibt z. B. zu erörtern, wie sich die untersuchten keramischen Werkstoffe bei unterschiedlicher Endbearbeitung mit ansteigender Temperatur verhalten. Eine Untersuchung der Wälzverschleißbelastung von keramischen Werkstoffen im Hoch- bzw. Tieftemperaturbereich wurde bisher noch nicht systematisch durchgeführt und stellt ein Thema für zukünftige Untersuchungen dar.

Abstract

The present study on the slip-rolling friction and wear behaviour of self-mated monolithic ceramics and ceramic-ceramic-composites under mixed/boundary lubrication has confirmed the expected influence of the following parameters:

- a) the material itself,
- b) the machining of the functional surface (cylindrical or convex),
- c) the interfacial media and
- d) the hertzian pressure.

Unexpected was the finding that the choice of the interfacial media and the machining e. g. the material removal rate determinate the wear coefficient in the range of several orders of magnitude. All materials tested during this program are suitable for slip-rolling contacts in unadditivated paraffinic oil even at a contact pressure of 3 GPa, were as for silicon carbide materials the contact pressure should not exceed 1.5 GPa.

An additional surprising finding was, that high-strength hiped Y_2O_3 -stabilised zirconia exhibited in unadditivated paraffinic oil with a rough polished surface after 20 millions of revolutions no detectable wear amount, even measured with an AFM. The surface seemed to be unaffected by the cyclic tribological stress.

In contrast, water increased the wear coefficient by 2 to 4 orders of magnitude and enhanced the formation of pitting. In water silicon nitride exhibited within the ceramics investigated the best wear behaviour.

The initial questions of this research project were answered and a model predicting the machinability was developed within the consortium with the University of Braunschweig. The model and the results enable the industry to select the different ceramics machining parameters giving high removal rates without increasing the wear coefficients and thus helping reduces the machining costs.

The 140 material couples tested over more than 300 Mio. of revolutions were incorporated into the numerical tribological data collection Tribocollect.

The individual results were published in more than 30 publications.

Future work should be focused on the influence of the machining for higher operating temperatures and on the influence of more common interfacial media on wear coefficient and slip-rolling fatigue resistance.

Zusammenfassungen, deutsch und englisch	3
Vorwort	7
1 Einleitung	9
2 Untersuchte Werkstoffe	10
2.1 HIP-Si ₃ N ₄ (NBD 200)	10
2.2 GPS-Si ₃ N ₄ -TiN (EDM)	11
2.3 SSiC (EKasic D)	12
2.4 GPS-SiC-TiC	13
2.5 HIP-ZrO ₂ (htc-PSZA)	14
2.6 LPS-SiC (htc-SiC-B)	15
3 Experimentelles	16
3.1 Apparatives	16
3.2 Das Zwischenmedium	17
3.3 Probekörper für den Wälzverschleiß	17
3.4 Theoretische Anmerkungen zur Versuchsauswertung	18
4 Bearbeitungstechniken der Probekörper	19
5 Akustomikroskopie – Zerstörungsfreie Prüfung	20
5.1 Prinzip der Akustomikroskopie	20
5.2 Weiterentwicklung der Meßmethode	20
6 Modellvorstellungen zum Wälzverschleiß	22
6.1 Verschleißmechanismen	22
6.2 Die Verschleißmechanismen bei keramischen Werkstoffen	23
6.3 Verschleißmechanismen bei der Bearbeitung	23
7 Untersuchungsergebnisse	24
7.1 HIP-Si ₃ N ₄ (NBD 200)	24
7.1.1 Untersuchungen in Paraffinöl	24
7.1.2 Untersuchungen in Wasser	27
7.1.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff HIP-Si ₃ N ₄	30
7.2 GPS-Si ₃ N ₄ -TiN (EDM)	30
7.2.1 Untersuchungen in Paraffinöl	31
7.2.2 Untersuchungen in Wasser	33
7.2.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff GPS-Si ₃ N ₄ -TiN	33
7.3 SSiC (EKasic D)	34

7.3.1	Untersuchungen in Paraffinöl	34
7.3.2	Untersuchungen in Wasser	37
7.3.3	Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff SSiC (EKasic D)	38
7.4	GPS-SiC-TiC	39
7.4.1	Untersuchungen in Paraffinöl	39
7.4.2	Untersuchungen in Wasser	40
7.4.3	Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff GPS-SiC-TiC	44
7.5	HIP-ZrO ₂ (htc-PSZA)	44
7.5.1	Untersuchungen in Paraffinöl	44
7.5.2	Untersuchungen in Wasser	47
7.5.3	Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff HIP-ZrO ₂	48
7.6	LPS-SiC (SiC-B)	48
7.6.1	Untersuchungen in Paraffinöl	48
7.6.2	Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff LPS-SiC	50
8	Vergleich und Diskussion der Untersuchungsergebnisse	51
8.1	Vergleich der Untersuchungsergebnisse in Paraffinöl	51
8.2	Vergleich der Untersuchungsergebnisse in Wasser	53
9	Anhang	57
10	Literatur	67

Vorwort

Der vorliegende Bericht entstand auch als Abschlussbericht im Rahmen des Teilprojektes „Einfluss der bearbeitungsbedingten Oberflächenausbildung auf das tribologische Verhalten unter Wälzreibung und deren Charakterisierung mittels Ultraschallmikroskopie“ innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms „Bearbeitungsbedingte Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften keramischer Werkstoffe“.

Der Bericht wendet sich sowohl an den wissenschaftlich orientierten Leser als auch an den Praktiker. Für die Darstellung der Ergebnisse wurde eine wissenschaftliche Form gewählt, da somit die ermittelten Daten zur weiteren Modellentwicklung und Theoriebildung verwendet werden können.

Jedoch auch der eher praxisorientierte Leser, der die Ergebnisse gezielt bei der Konstruktion von Bauteilen einbeziehen möchte, findet Angaben über optimale Endbearbeitungsverfahren und Oberflächenrauheiten, bei denen geringe Verschleißbeträge der jeweiligen Wälzpaarungen erreicht werden. Die Beschreibung der verwendeten Werkstoffe ermöglicht auch eine optimale Wahl des Materials für die jeweilig gewünschte Anwendung.

Es wurde angestrebt, auf knappem Raum möglichst viel an Ergebnissen und brauchbaren Informationen zu geben. Bei den Untersuchungsergebnissen wurde die Aufteilung nach verschiedenen Werkstoffen beibehalten, somit ist ein schneller Querweis zwischen werkstoffwissenschaftlichen Erkenntnissen und tribologischen Ergebnissen möglich.

Besonderer Wert wurde auf eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse der einzelnen tribologisch untersuchten Werkstoffe gelegt, die am Ende der jeweiligen Abschnitte die wichtigsten Punkte hervorhebt und damit eine bequeme Gesamtübersicht und Orientierung ermöglicht.

Wenn dieser Bericht dazu beiträgt, dass ein Teil der standardmäßig vorgenommenen „best-als-möglichen“ Bearbeitungsschritte verschwindet, falls diese von der Konstruktion her nicht notwendig und ökonomisch wenig sinnvoll erscheinen, so ist der Zweck dieser Arbeit erfüllt.

Dafür, dass der Bericht in der vorliegenden Form entstehen konnte, bedanken sich die Autoren bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Bereitstellung der Fördermittel und für die Mitarbeit bei Frau S. Binkowski und Frau R. Pahl für metallographische Arbeiten und die Lichtmikroskopie-Aufnahmen, Frau S. Benemann für die REM-Aufnahmen, Frau B. Strauß für die EDX-Spektren, Frau Dr. I. Dörfel für die TEM-Aufnahmen, Herrn Dr. M. Neuber für die ESCA-Spektren, Herrn Dr. M. Haubold für die Akustomikroskopie-Aufnahmen, Herrn Dr. Th. Schneider für die AFM-Aufnahmen sowie Herrn J. Schwenzien für die profilometrischen Verschleißbetrag-Messungen und das sorgfältige Redigieren des Berichts. Schließlich sei noch all denjenigen Kolleginnen und Kollegen gedankt, die hier namentlich nicht genannt wurden, die jedoch durch Diskussionsbeiträge und Interesse an der Arbeit zu deren Gelingen beigetragen haben.

Berlin, Februar 1999

Ute Effner

Mathias Woydt

1 Einleitung und Ausgangssituation

Aufgrund ihrer herausragenden tribologischen Eigenschaften haben keramische Werkstoffe breite, nicht mehr wegzudenkende Einsatzgebiete in verschiedenen Bereichen der Produktion und Anwendung [1, 2, 3, 4] gefunden und dadurch klassische Werkstoffe verdrängt. Der Einsatz der teuren Keramiken rechnet sich nur aufgrund der funktionellen Vorteile im System, der längeren Zeitabstände für Wartungsintervalle und der Minimierung der Betriebskosten oder der Performance.

Geschmierte Si_3N_4 -Hybrid-Wälzlager (keramische Kugeln und metallische Ringe) werden bei niedrigen Temperaturen, hohen Drehzahlen und Start-Stop-Bedingungen z. B. standardmäßig in Spindellagerungen von Werkzeugmaschinen eingesetzt. Si_3N_4 -Hybrid-Wälzlager besitzen momentan einen Marktanteil von ca. 3 Prozent. Vollkeramische Wälzlager aus Si_3N_4 haben sich unter Trockenlauf-Bedingungen und bei hohen Temperaturen bewährt [4, 5].

Sowohl Vollkeramik- als auch Hybridlager erfüllen in der Praxis, bei hohen Präzisionsanforderungen und hoher Lebensdauer im Vergleich zu Stahl unter extremen Bedingungen die an sie gestellten Erwartungen und ermöglichen z. T. ungeahnte Funktionsvorteile.

In korrosiven Medien und dort, wo Mangelschmierzustände auftreten, haben sich Gleitlager und Gleitringdichtungen aus verschiedensten SiC-Werkstoffen bewährt und zu außerordentlich betriebssicheren Komponenten geführt [6], da keramische Gleitpaarungen durch wässrige, saure und basische Medien reibungs- und verschleißbarm geschmiert werden können [7], woraus sich eine gute Marktdurchdringung ergibt.

Gegenüber Metallen bieten die keramischen Werkstoffe bei Mangelschmierung sowohl unter Gleit- als auch grundsätzlich unter Wälzbeanspruchung Schutz vor adhäsivem Versagen.

Die hohen Herstellungskosten – besonders bedingt bei der Endbearbeitung von Konturen mit verschiedenen und veränderlichen Radien (vgl. *Tabelle 1*) – behindern eine breite Marktdurchdringung von keramischen Komponenten in wälzbeanspruchten Tribosystemen. Der Anteil der Bearbeitungskosten an den Gesamtkosten bewegt sich zwischen 15 und 80 Prozent [8]; deshalb muss ein Ziel die Reduzierung der Bearbeitungskosten sein, um die Gesamtherstellungskosten bei gleichbleibender Zuverlässigkeit der keramischen Bauteile zu verringern.

Durch die verschiedenen Verfahren der spanenden Endbearbeitung der Funktionsflächen entstehen an der Bauteil-

Tabelle 1
Anteil der Bearbeitungskosten für keramische Bauteile in der Großserie.

Komponente	Anteil der Bearbeitungskosten
Automobilventil aus Si_3N_4	~ 55 %
Wälzlagerkugel aus Si_3N_4	~ 70 %
Massendichtring aus SiC	15 - 30 %
Dichtscheibe aus Al_2O_3	~ 35 %
Schneidkeramik	~ 30 %
Spezialdichtring aus SiC	60 - 80 %
Gleitlager aus SiC	~ 70 %

oberfläche unterschiedlich ausgeprägte Randzonen, die das tribologische Verhalten des Bauteils beeinflussen. Somit geht die Endbearbeitung unmittelbar in das Verschleißverhalten und die verschleißbedingte Lebensdauer des Bauteils ein, was ein Ausdruck für die Zuverlässigkeit des Bauteils bzw. die Sicherheit der Maschine ist. Um die bearbeitungsbedingten Schäden (Risse oder Eigenspannungen) der Oberfläche gering zu halten oder zu beseitigen, werden wälzbeanspruchte Bauteile poliert. Nach heutiger Anschauung wird die Philosophie „best-as-possible“ für notwendig gehalten, da die Keramiken eine niedrige Risszähigkeit besitzen und es sich bei einer Wälzbeanspruchung um eine periodische Beanspruchung unter hohen Pressungen und mit großen Zyklenzahlen handelt, so dass eine schädigungsarme Endbearbeitung zu wählen ist, weil Oberflächenrisse unter mechanischer Beanspruchung wachsen.

Der bearbeitungsbedingte Einfluss auf das tribologische Verhalten unter Wälzreibung kann mittels der Modellverschleißprüfung, angelehnt an DIN 50324, untersucht werden. Somit kann der Kreis zwischen den tribologischen Untersuchungsbedingungen und den Bearbeitungsparametern und -verfahren geschlossen werden.

Ziel der Modellverschleißuntersuchungen ist die Entwicklung von Kriterien, welche die Zuverlässigkeit für die tribologische Anwendung der keramischen Bauteile bei ökonomischer Endbearbeitung unter Berücksichtigung des Zwischenmediums, der Bearbeitungsparameter und des Zeitspanvolumens gewährleisten, d. h. bei denen mit größtmöglichem Zeitspanvolumen die niedrigsten Verschleißkoeffizienten erreichen werden.

2 Untersuchte Werkstoffe

Für das umfassende Untersuchungsprogramm wurden nur Werkstoffe ausgewählt, die kommerziell erhältlich sind, eine besondere Marktdurchdringung haben oder sich durch besondere Eigenschaften auszeichnen (s. *Tabelle 2*). Es handelt sich um die Werkstoffe HIP-Si₃N₄ (NBD 200), GPS-Si₃N₄-TiN (EDM), SSiC (EKasic D), GPS-SiC-TiC [9] sowie hochfestes HIP-ZrO₂ (htc-PSZA) und Flüssigphasen gesinteres LPS-SiC (htc-SiC-B). Diese Werkstoffe decken ein breites Spektrum bei den Eigenschaften wie Härte, E-Modul, Risszähigkeit oder Biegebruchfestigkeit ab, welche eine wichtige Basis für die Modellentwicklung bilden.

Die Werkstoffe wurden vor der Wälzverschleißuntersuchung im „as-fired“-Zustand mittels Lichtmikroskopie, Akustomikroskopie, TEM (Transmissions Elektronen Mikroskopie), REM (Raster Elektronen Mikroskopie), Röntgenbeugung (XRD) und Röntgenfluoreszenzanalyse innerhalb der BAM charakterisiert. Die physikalischen Eigenschaften der Materialien wurden aus den Datenblättern der Hersteller entnommen. An dem neu am Markt eingeführten hochfesten ZrO₂-Werkstoff wurden innerhalb der BAM-V.22-Untersuchungen die 4-Punkt-Biegebruchfestigkeit σ_{4B} , die Rißzähigkeit K_{IC} und der Weibull-Modul bestimmt. Für den Werkstoff LPS-SiC wurde an der BAM die Härte des Werkstoffs bestimmt, da hierzu die Herstellerangaben fehlten. Die Charakterisierung der Werkstoffe kam zu folgenden Ergebnissen:

2.1 HIP-Si₃N₄ (NBD 200)

Das gewählte Si₃N₄ (NBD 200) wird in hochwertigen Hybridwälzlagern eingesetzt. Das Processing dieses Materials erfolgt in Anlagen, die im Innern mit Si₃N₄ (NBD 100) ausgekleidet sind, so dass es deshalb nicht zu Fremdeinschlüssen im Gefüge kommen kann, die als Ausgangsquelle von Pitting gelten. Die TEM-Untersuchungen zeigen ein Gefüge aus β -Si₃N₄, wobei die Korngröße im Bereich von 0,1 bis 1 μ m liegt (vgl. *Abb. 1*). Diese sehr geringe Korngröße des HIP-Si₃N₄-Werkstoffs erlaubt keine lichtmikroskopischen Untersuchungen. Die großen β -Si₃N₄-Körner enthalten zum Teil Subkorn Grenzen. Aufgrund des geringen Glasphasenanteils bilden sich an den Korngrenzen und den Kornwickeln keine amorphen Glasphasen aus, wie dies bei anderen gesinterten Si₃N₄-Qualitäten üblich ist. Die Glasphase ist generell für die Wälzbeanspruchung ungünstig.

Tabelle 2

Mechanische Eigenschaften der verschiedenen untersuchten keramischen Werkstoffe

Mechanische Eigenschaften	Si ₃ N ₄ [5]	SiC [10]	SiC [11]	Si ₃ N ₄ -TiN [10]	ZrO ₂ [12]	SiC-TiC [13]
Dichte ρ [g/cm ³]	3,17	3,10	3,22	3,86	5,42	3,79
E-Modul E [GPa]	309	410	456	300	256	444
Poisson Zahl ν	0,27	0,17	0,14	0,26	0,23	0,18
Härte, Vickers [GPa]	16,5	28	25	17	14,5	22,4
	[HV 10]	[HV 0,5]	[HV 0,5]	[HV 0,5]	[HV 0,5]	[HV 5]
Bruchzähigkeit K_{IC} [MPa·m ^{1/2}]	6,8	3,2	7,5	7,5	13,9	5,5
Biegebruchfestigkeit σ_{4B} [MPa]	750	410	670	700	1399	490

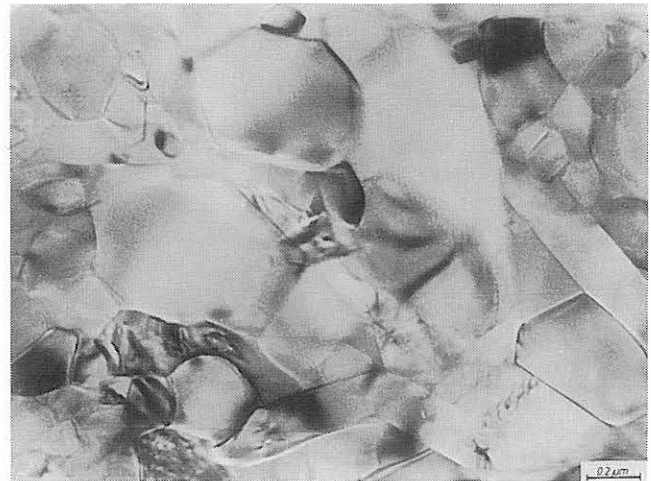


Abb. 1
TEM-Aufnahme des HIP-Si₃N₄-Werkstoffs mit dem stengeligen β -Si₃N₄-Gefüge

Bei den höchstauffösenden TEM-Untersuchungen des Werkstoffs wurde ein (100) Netzebenenabstand des β -Si₃N₄ von 0,66 nm ermittelt (vgl. *Abb. 2*). Die mit dem TEM gekoppelte EDX-Analyse konnte in feinkörnigen Bereichen des Werkstoffs einige eisenhaltige Einschlüsse identifizieren.

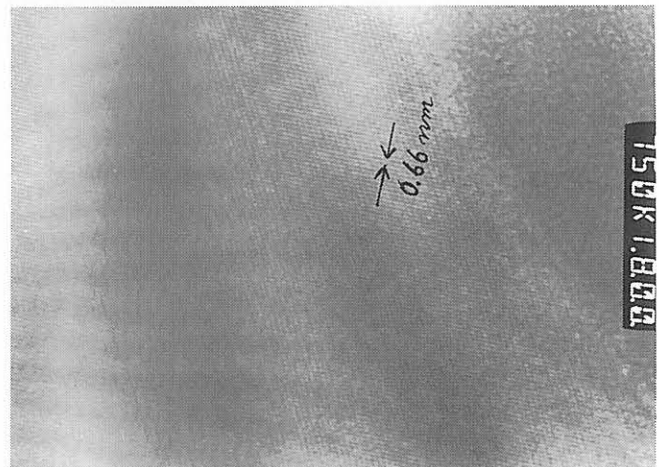


Abb. 2
Hochauflösende TEM-Aufnahme des Werkstoffs HIP-Si₃N₄

Aufgrund des geringen Glasphasenanteils stellt sich das stengelige β - Si_3N_4 -Gefüge bei REM-Untersuchungen nur schwach dar. Dies ändert sich auch nicht, wenn der HIP- Si_3N_4 -Werkstoff mit einer NaOH-Schmelze 90 Sekunden bei ca. 350 °C geätzt und anschließend mit Graphit bedampft wird.

Die Ergebnisse der Röntgenbeugung (XRD) bestätigen, dass der größte Anteil des HIP- Si_3N_4 -Werkstoffs aus β - Si_3N_4 besteht (95,62 Vol.-%), der restliche Anteil (4,38 Vol.-%) des Gefüges wurde als Si-O-N-Phase angegeben. Diese Angaben bestätigt die Röntgenfluoreszenzanalyse, welche folgende Elemente bzw. chemischen Verbindungen ermittelte, die in dem HIP- Si_3N_4 -Werkstoff enthalten sind:

Tabelle 3

Im Werkstoff HIP- Si_3N_4 enthaltene Elemente bzw. Verbindungen gemäß der Röntgenfluoreszenzanalyse

Element/Verbindung	Gew.-%
Si	59,30
N	37,30
Al_2O_3	0,11
MgO	1,18
Fe_2O_3	0,50

Somit kann der Anteil an Sinteradditiven mit 1,79 Gew.-% angegeben werden und liegt gering über der Herstellerangabe [5].

Bei ESCA-Untersuchungen wurden noch zusätzlich die Elemente C (Kohlenstoff) und Na (Natrium) nachgewiesen. Diese Messungen konnten bestätigen, dass Al (Aluminium) bzw. Mg (Magnesium) oxidisch gebunden sind und dass C als carbidisch gebunden vorliegt. Die bereits bei den TEM/EDX-Untersuchung und der Röntgenfluoreszenzanalyse detektierten eisenhaltigen Verbindungen bzw. Einschlüsse sind auch mittels ESCA nachweisbar (vgl. Abb. 3). Aus der Energieverschiebung der einzelnen Rumpfniveaus kann geschlossen werden, dass die verschiedenen Elemente oxidisch, carbidisch bzw. nitridisch gebunden im Werkstoff vorliegen, da eine Verschiebung gegenüber dem reinen Element zu verzeichnen ist.

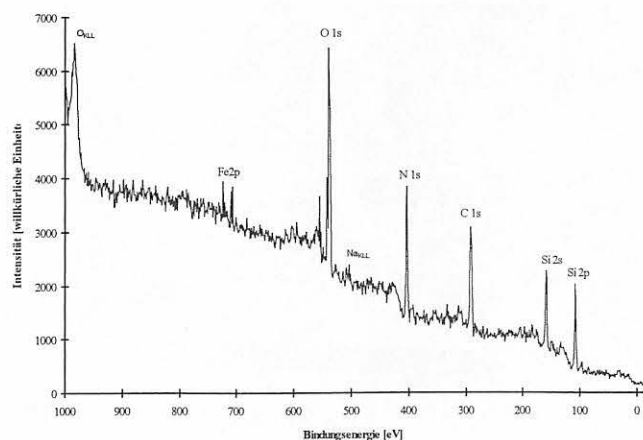


Abb. 3
ESCA-Messung des Si_3N_4 -Werkstoffs in der Übersicht. ($E_F = 0\text{eV}$)

Mit der Akustomikroskopie (vgl. Kapitel 5) kann die Porenverteilung im Werkstoff zerstörungsfrei untersucht werden. Je nach gewählter Frequenz ist die Eindringtiefe und somit die Oberflächen- bzw. Volumenempfindlichkeit der Methode unterschiedlich. Je höher die Frequenz, desto oberflächennäher ist der untersuchte Bereich. Der Porengehalt des Si_3N_4 -Werkstoffs ist so gering, dass eine akustomikroskopische Messung mit 1 GHz nicht vorgenommen werden konnte, sondern die Untersuchung bei 800 MHz durchgeführt werden musste, bei der ein größerer Tiefenbereich detektiert wird. Die Untersuchung ergab eine Porendichte von 0,37 Prozent, wobei alle Poren zur niedrigsten Größenklasse ($< 33 \mu\text{m}^2$) gehören, die vom Akustomikroskop aufgelöst werden kann.

Die chemische und physikalische Zusammensetzung des Werkstoffs bedingt die mechanischen Eigenschaften, die aus Tabelle 2 zu entnehmen sind. Alle durchgeführten Untersuchungen bestätigen, dass mit der untersuchten HIP- Si_3N_4 -Qualität ein Werkstoff vorliegt, der hohen Ansprüchen genügt. Der geringe Porenanteil und die praktisch nicht vorhandene Glasphase sowie der geringe Anteil von Sinteradditiven lässt den Einsatz von HIP- Si_3N_4 auch unter Wälzbeanspruchung zu.

2.2 GPS- Si_3N_4 -TiN (EDM)

Aus dem gasdruck-gesinterten Si_3N_4 -TiN (EDM) können mittels Erodieren Bauteile gefertigt werden [10]. Die TiN-Phase bedingt die elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs, somit können einfachere Halbzeuge mit komplizierter Geometrie aus dem Material hergestellt werden.

Der Werkstoff GPS- Si_3N_4 -TiN zeigt bei den TEM-Untersuchungen eine bimodale Korngrößenverteilung, wobei die großen Körner meist aus TiN bestehen (s. Abb. 4). Die Korngröße der β - Si_3N_4 -Körner ist mit der des HIP- Si_3N_4 -Werkstoffs vergleichbar und beträgt somit zwischen 0,1 und 1 μm . Die Korngröße der TiN-Phase beträgt 1-3 μm . In der TiN-Phase wurden einige Versetzungen gefunden. Analog zu dem Werkstoff HIP- Si_3N_4 wurden auch bei dem Si_3N_4 -TiN-Werkstoff keine amorphen Korngrenzen beobachtet. Aufgrund des geringen Anteils an Sinterhilfsstoffen waren amorphe Korngrenzen auch nicht zu erwarten. Die stengelige β - Si_3N_4 -Phase ist zwischen die größeren TiN-Körner eingelagert. Bei dem Werkstoff Si_3N_4 -TiN konnten ebenfalls eisenhaltige Einschlüsse nachgewiesen werden, die vermut-



Abb. 4
TEM-Aufnahme des Werkstoffs GPS- Si_3N_4 -TiN. Die dunklen großen Körner sind die TiN-Phase

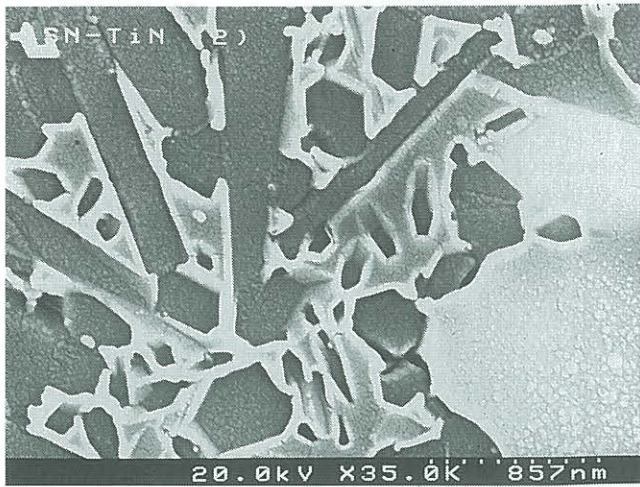


Abb. 5
REM-Aufnahme des Werkstoffs $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$; links: $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ -Phase, rechts: TiN-Phase

lich auf das Mahlen der Keramik-Pulver in Kugelmöhlen oder ähnlichen Geräten während des Herstellungsprozesses zurückzuführen sind.

Die Gefügedarstellung mittels der REM-Aufnahme (s. Abb. 5) zeigt deutlich das stengelige Gefüge des $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ -Anteils, welches fächerförmig in der linken Bildhälfte dargestellt ist, die größere Körnung der TiN-Phase ist in der rechten Bildhälfte zu sehen.

Mittels der Röntgenbeugung lassen sich die Si_3N_4 - und TiN-Phasen gut getrennt darstellen. Es wurde ein Anteil von 66,66 Vol.-% $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ -Phase und ein Anteil von 33,34 Vol.-% TiN-Phase ermittelt, dies ergibt für die Volumenverhältnisse im Werkstoff

$$\text{TiN} : \beta\text{-Si}_3\text{N}_4 = 1 : 2.$$

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Gewichts-% der einzelnen Phasen jeweils ca. 50 Prozent ausmachen. Eine dritte Phase konnte nicht ermittelt werden.

Die Röntgenfluoreszenzanalyse konnte folgende Massenanteile in dem Werkstoff ermitteln:

Gemäß der Werkstoffzusammensetzung aus Tabelle 4 ergibt sich ein Anteil der Sinterhilfsstoffe von 4,41 Gew.-%.

Sowohl mit der Lichtmikroskopie als auch mit der Akustomikroskopie lässt sich die Zwei-Phasigkeit des GPS- $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ -Werkstoffs gut darstellen. Die Poren im Werkstoff ergeben optisch einen geringen, akustomikroskopisch jedoch einen hohen Kontrast. Im Gegensatz dazu liefern in der op-

Tabelle 4
Chemische Elemente und Verbindungen des Werkstoffs $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$

Element/Verbindung	Gew.-%
Si	32,30
Ti	33,20
N	29,30
MgO	1,54
Fe_2O_3	2,87

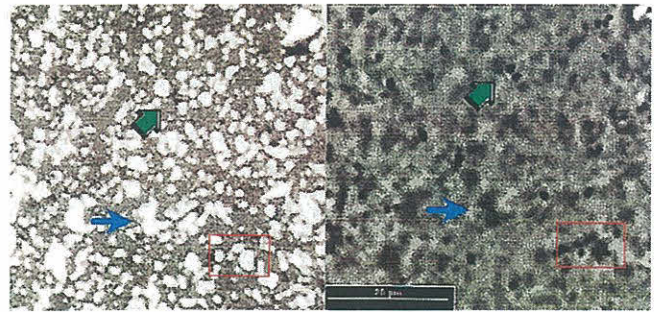


Abb. 6
Zwei-Phasigkeit des Werkstoffs GPS- $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$. Links die lichtmikroskopische Aufnahme, rechts die akustomikroskopische Aufnahme bei 1000MHz
(\blacksquare = TiN-Körner, \rightarrow = Poren)

tischen Aufnahme die TiN-Körner einen hohen Kontrast, in der akustomikroskopischen Aufnahme sind sie noch detektierbar, jedoch weniger kontrastreich. Hierbei ist zu beachten, dass im akustischen Signal die Information über eine Tiefenausdehnung enthalten ist.

Die mechanischen Eigenschaften (vgl. Tabelle 2) sind mit denen des Werkstoffs HIP- Si_3N_4 vergleichbar. Jedoch können aufgrund der Erodierbarkeit von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ auch Bauteile mit komplexen Geometrien aus Halbzeugen dieses Werkstoffs gefertigt werden.

2.3 SSiC (EKasic D)

SiC ist in Gleitringdichtungen und Gleitlagern der am häufigsten eingesetzte Werkstoff. Selbst in hochbelasteten Gleitlagern ist SSiC ein vielfach verwendetes Material. Jedoch ist über das Verhalten dieses Werkstoffs unter Wälzreibung wenig bekannt, da für diese Beanspruchung seine Biegebruchfestigkeit und Risszähigkeit als zu gering angesehen werden.

Das Gefüge des Werkstoffs SSiC (EKasic D) kann im Lichtmikroskop im Durchlichtverfahren dargestellt werden (vgl. Abb. 7), was den präparativen Aufwand in Grenzen hält, da Ätzen aufgrund der chemischen Beständigkeit von SiC keinen zusätzlichen Gefügekontrast liefert. Für die Durchlichtaufnahmen (Vergrößerung: 1000 : 1) mit dem Lichtmikroskop werden durch Polieren Dünnschliffe hergestellt, die im Mikroskop durchleuchtet werden. Diese Technik wurde für den

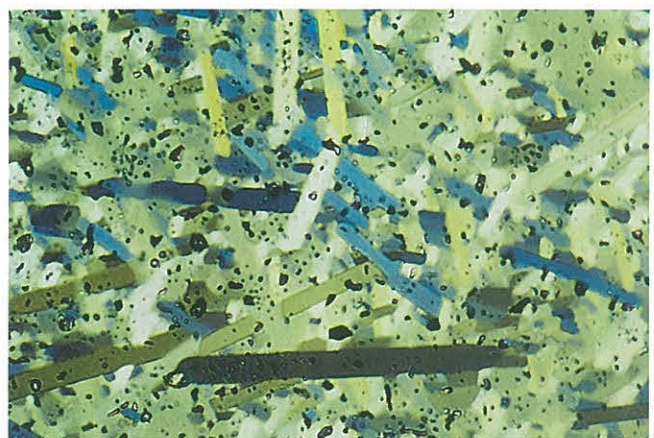


Abb. 7
Lichtmikroskopische Aufnahme des Werkstoffs SSiC (EKasic D) mittels Durchlicht, Vergrößerung: 1000 : 1

SSiC-Werkstoff neu entwickelt und im Rahmen dieser Arbeit erstmals angewendet. Die stengeligen Kristalle des SiC-Gefüges haben einen Durchmesser von 4 bis 5 μm bei einer Länge von ca. 20 bis 50 μm . Die unterschiedliche Färbung der stengeligen SiC-Kristalle ist abhängig von der Lichtbrechung bei der Durchstrahlung.

Die Poren in dem Werkstoff sind in der lichtmikroskopischen Aufnahme gut als schwarze Punkte sichtbar. Der Hersteller (ESK GmbH) gibt für die geschlossene Porosität einen Wert $< 3,5 \text{ Vol.-%}$ an [10]. Da die Porosität eines Werkstoffs (ähnlich wie die Korngröße) in die mechanischen Eigenschaften eingeht, wurde eine Porenbestimmung mittels Akustomikroskopie vorgenommen. Die akustomikroskopischen Aufnahmen bei verschiedenen Frequenzen zeigen, dass die Tiefenausdehnung der Poren recht unterschiedlich und das gesamte Werkstoffvolumen mit geschlossenen Poren durchsetzt ist. Die Aufnahme mit 1000 MHz (vgl. Abb. 8 oben links) liefert keine Tiefeninformation und ist der lichtmikroskopischen ähnlich. Die Aufnahme mit 100 MHz (vgl. Abb. 8 unten rechts) liefert im Vergleich zu der Aufnahme mit 200 MHz (vgl. Abb. 8 unten links) keine neuen Informationen mehr. Ein Vorteil der akustomikroskopischen Untersuchung ist, dass das Bauteil nicht zerstört werden muß. Jedoch ist zu beachten, dass nicht nur Poren, sondern auch Risse und andere Defekte Störsignale hervorrufen und somit zuerst eine Standardisierung dieser Methode erfolgen muß.

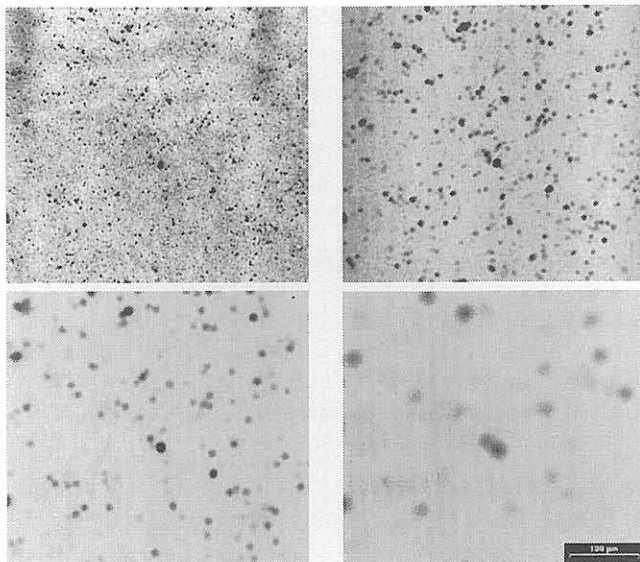


Abb. 8
Akustomikroskopische Aufnahmen des Werkstoffs SSiC;
Oben: links: 1000 MHz, rechts: 400 MHz,
Unten: links: 200 MHz, rechts: 100 MHz

Die Mikrostruktur mit einer Korngröße von 15 μm , einer bimodalen Kornverteilung sowie einer Porosität von 3,5 Vol.-% in Verbindung mit dem hohen E-Modul wird sich allerdings grundsätzlich als ungünstige Voraussetzung für eine Wälzbelastung dieses Materials bei einer anfänglichen Hertzschen Pressung von 3 GPa erweisen.

2.4 GPS-SiC-TiC

Mit SiC-TiC wurde eine Werkstoffzusammensetzung durch Gasdrucksintern hergestellt, die ebenfalls erodierbar ist. Dieser Werkstoffverbund ist mit $\text{HV5} = 22,5 \text{ GPa}$ vergleichsweise „hart“. Aus anderen Untersuchungen war bekannt [14, 15], dass TiC die Verschleißbeständigkeit im Trockenlauf unter Gleit- wie auch unter Wälzbeanspruchung gegenüber SSiC erhöht. Die Kombination der Materialien sowie die höhere Zähigkeit und die geringe Porosität ($< 1 \text{ Prozent}$) lassen den carbidischen Werkstoff ohne Glasphase für die Wälzbeanspruchung günstiger erscheinen als reines SiC. Der Werkstoff SiC-TiC wurde in der BAM hergestellt und charakterisiert [13]. Die Daten zu den mechanischen Eigenschaften, die ebenfalls an der BAM ermittelt wurden, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Der Werkstoff enthält eine ca. 50 : 50 Prozent Zusammensetzung, SiC ist zu 54 Gewichts-%, TiC zu 43 Gewichts-% enthalten. Als Sinteradditive wurden ein Gew.-% Al_2O_3 und zwei Gew.-% C verwendet. Der Werkstoff besitzt eine geringe Porosität mit $< 1 \text{ Prozent}$. Mittels der Akustomikroskopie konnte bestimmt werden, dass die wenigen im Werkstoff enthaltenen Poren eine nur geringe Ausdehnung (ca. $10\text{-}30 \mu\text{m}^2$) aufweisen.

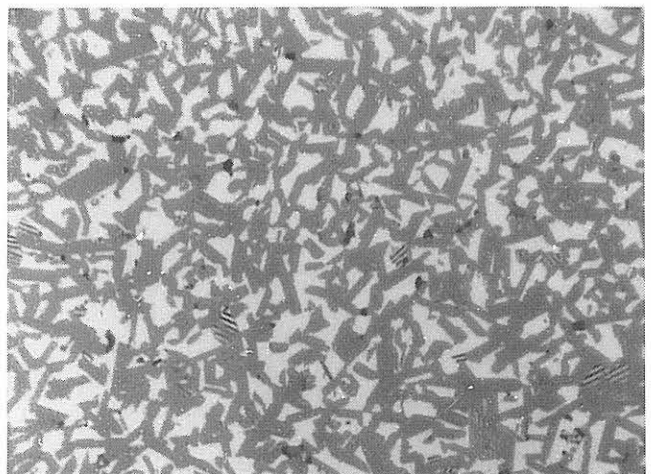


Abb. 9
Lichtmikroskopische Aufnahme des an der BAM hergestellten und charakterisierten Werkstoffs GPS-SiC-TiC



Abb. 10
REM-Aufnahme des Werkstoffs GPS-SiC-TiC, die helleren Körner sind die TiC-Phase, die dunkleren die SiC-Phase

Bereits in der lichtmikroskopischen Aufnahme wird die Zwei-Phasigkeit des Werkstoffs sichtbar. Die SiC-Phase bildet sich grau ab und die TiC-Phase weiß, die Poren sind als schwarze Punkte sichtbar.

Die REM-Untersuchungen bestätigen die bereits aus der lichtmikroskopischen Aufnahme gewonnenen Ergebnisse. Auch in der REM-Aufnahme sind die TiC-Körner etwas heller abgebildet. Die verschiedenen Phasen können mittels EDX eindeutig zugeordnet werden.

Die stengeligen SiC-Körner haben eine Größe von 1-4 μm , die TiC-Körner sind größer und haben eine Ausdehnung von 2-6 μm . Die Körnung des Gefüges ist deutlich kleiner als die des reinen SiC-Werkstoffs, ebenfalls ist die Porosität geringer.

2.5 HIP-ZrO₂ (htc-PSZA)

Der neu am Markt eingeführte HIP-ZrO₂-Werkstoff ist vor allem aufgrund seiner Biegebruchfestigkeit und Bruchzähigkeit interessant (s. *Tabelle 2*). Die physikalischen Eigenschaften von ZrO₂-Werkstoffen schlagen eine Brücke zwischen den Extremen von Si₃N₄ und 100Cr6. Die auffälligsten Vorteile von ZrO₂ gegenüber Si₃N₄ ergeben sich bei der Wärmedehnung, der Risszähigkeit, dem E-Modul und der Biegebruchfestigkeit, die sich sehr stark den Werten von 100Cr6 annähern. Dieses mehrphasige ZrO₂-Material hat eine homogene Korngrößenverteilung mit einer Korngröße von 0,7 μm für Al₂O₃ und im Bereich von 0,4 μm für die Y₂O₃-stabilisierte ZrO₂-Phase [12].

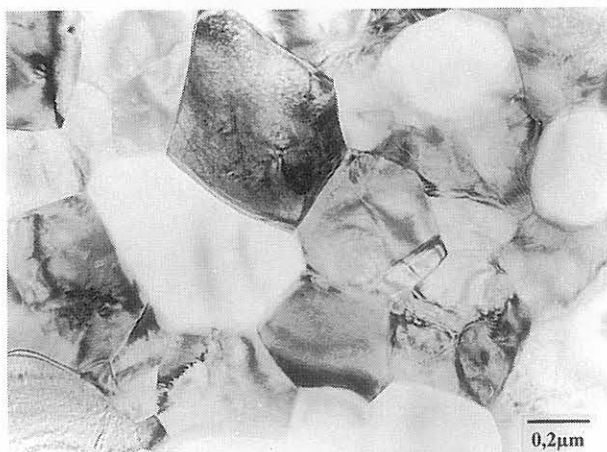


Abb. 11
TEM-Aufnahme des Gefüges des Werkstoffs HIP-ZrO₂

In *Abb. 11* ist das Gefüge des Werkstoffs ZrO₂ abgebildet. Der Werkstoff besteht vorwiegend aus zwei Phasen [12]: Korund und Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{1,93}. Die hellen Körner wurden als Korund identifiziert und haben einen Größenbereich um 0,7 μm . Die Körner der kubischen Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{1,93}-Phase (dunkle Körner in der *Abb. 11*) sind genau wie die Aluminiumoxid-Phase von isometrischem Habitus und weisen einen Größenbereich von 0,4 μm auf. Die Aluminiumoxid-Phase ist in die Zirkonoxid-Phase eingebettet, welche als Matrix-Werkstoff anzusehen ist. Vereinzelt liegt im Werkstoff als dritte Phase ZrO₂ in der monoklinen Phase Baddelyit vor, die eine typische Zwillingsbildung zeigt. Diese reine ZrO₂-Phase liegt in so geringer Menge im Werkstoff vor, dass sie für das Gesamtmaterial nicht relevant ist. Durch Wärmebehandlung kann die Phasenzusammensetzung beeinflusst werden.

Der Werkstoff weist keine glasigen Korngrenzen auf, ist aber stark defekthaft und zeigt Anpassungsversetzungen. Das Material ist in abgedünnter Form extrem spröde und steht unter starken Spannungen, so dass schon der geringste Aufheizvorgang im Elektronenmikroskop zur Rissbildung führt.

Die heiß isostatisch gepresste ZrO₂-Qualität weist laut Herstellerangaben eine 4-Punkt-Biegebruchfestigkeit von $\sigma_{4Bb} = 1800 \text{ MPa}$ auf. Da dieser Werkstoff mit der hohen Festigkeit neu auf dem Markt ist und das Festigkeitsniveau von der Wärmebehandlung abhängt, wurden die Herstellerangaben verifiziert. Die Untersuchungen ergaben eine 4-Punkt-Biegebruchfestigkeit von $\sigma_{4Bb} = 1.399 \text{ MPa} \pm 40 \text{ MPa}$, was unter den Herstellerangaben liegt [12]. Für den Weibull-Parameter ergab sich nach der Maximum-Likelihood-Methode $m = 23,07$.

Die Phasen des Gefüges konnten mittels der Röntgenbeugung (XRD) bestätigt werden. Die Reflexe der verschiedenen Phasen überlagern sich zum Teil, was eine Auswertung erschwert, dennoch lassen sich die verschiedenen Phasen zuordnen.

Der Fehler im R-Wert ist < 3 . Als Ergebnis der Messung lässt sich festhalten:

Al₂O₃ liegt als Korund vor (rhombisch bzw. hexagonal); Y liegt nach dieser Messung nicht als Y₂O₃ vor, sondern im ZrO₂ gelöst als kubisches Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{1,93}; ZrO₂ liegt hier nur in orthorhombischer Form vor, zur Umordnung in die orthorhombische Phase kann es aufgrund des HIP-Herstellungsprozesses kommen, wenn die Bedingungen $T \approx 950 \text{ }^\circ\text{C}$ und $P > 10 \text{ GPa}$ auftreten [13].

Die Röntgenfluoreszenzanalyse zeigt den Massenanteil in Prozent auf, der mit den vorherigen Messergebnissen übereinstimmt. Es wurden folgende chemischen Elemente in dem Werkstoff ermittelt, wobei der Sauerstoffgehalt über die Oxidform der verschiedenen Elemente errechnet wurde.

Die feine Mikrostruktur des HIP-Al₂O₃-ZrO₂ (htc-PSZA) kann lichtmikroskopisch nicht aufgelöst werden. Die hochfrequente Akustomikroskopie kann ebenfalls das ZrO₂-Gefüge im Submikronbereich mit der speziellen Kugellinse nicht auflösen. Aber im Gegensatz zur Licht- und Elektronenmikroskopie können die Poren und Einschlüsse (dunkel) des Werkstoffs detektiert werden (vgl. *Abb. 12*).

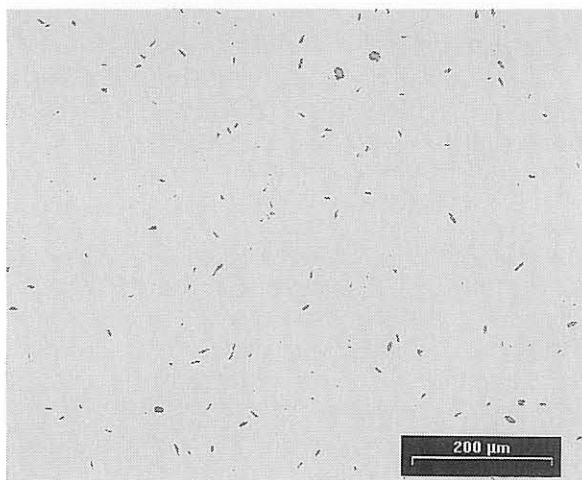


Abb. 12
Akustomikroskopische Aufnahme; 1 GHz; Einschlüsse und Poren (dunkel)

Tabelle 5
Chemische Elemente in dem Werkstoff HIP-ZrO₂ gemäß der Röntgenfluoreszenzanalyse

Element/Verbindung	Gew.-%
Zr	47,4000
O	29,8000
Al	12,8000
Y	4,6000
Rb	0,1670
Si	0,0678
S	0,0638

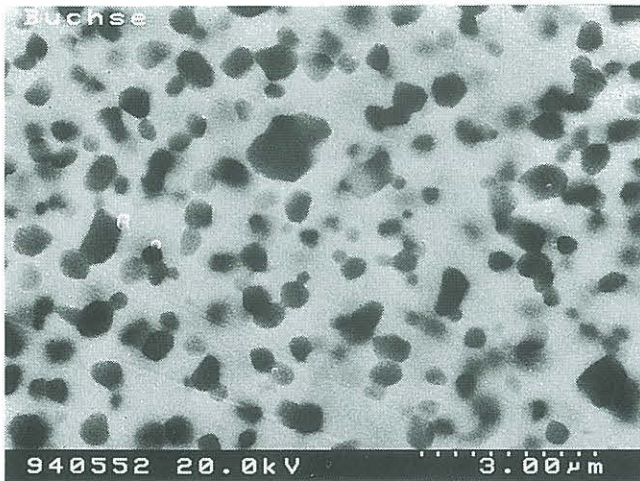


Abb. 13
REM-Aufnahme von ZrO₂: dunkle Punkte Al₂O₃; helle Fläche ZrO₂

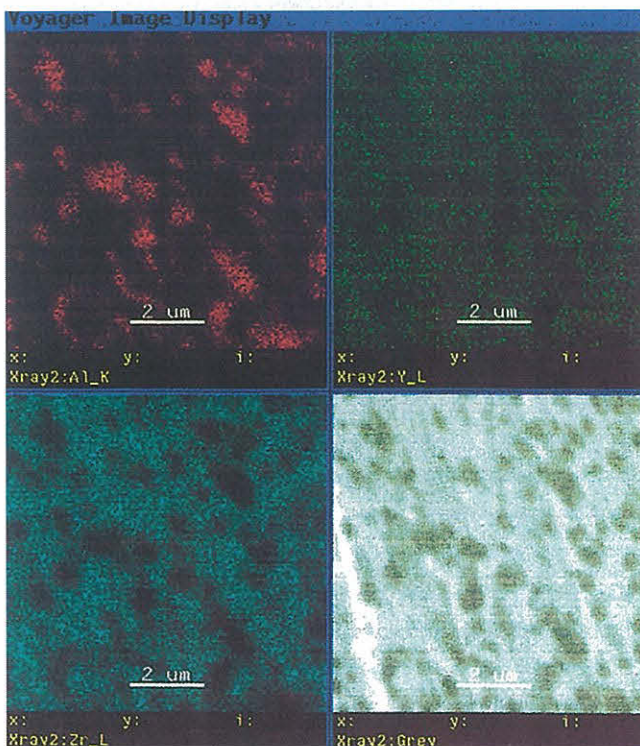


Abb. 14
EDX-Untersuchung der verschiedenen Elementverteilungen;
Oben links: Al, oben rechts: Y, unten links: Zr, unten rechts: Grauwertdarstellung

Ein zweiphasiges Gefüge zeigt erst die REM-Aufnahme. Aufgrund des Unterschiedes in der Ordnungszahl können die helle Matrix dem ZrO₂ und die dunklen Einschlüsse dem Al₂O₃ zugeordnet werden.

Die EDX-Untersuchungen, die insitu bei den REM-Untersuchungen durchgeführt werden können, ordnen eindeutig das zweiphasige Gefüge den Al₂O₃- und ZrO₂-Phasen des Werkstoffs zu. Beide Phasen sind auch chemisch zu trennen. Y ist auch hier nicht als einzelne Phase zu beobachten, was die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse bestätigt. Es ist aber überwiegend im ZrO₂-Gitter gelöst, dies kann vom EDX jedoch nicht aufgelöst werden.

Da die werkstoffphysikalischen Eigenschaften von ZrO₂ mit denen von Stählen z. T. vergleichbar sind [17], kann der Konstrukteur ZrO₂ relativ problemlos in bestehende Konstruktionen integrieren. So verändern sich infolge von Temperaturbelastungen Presssitz und Spiele kaum. Ebenso kann ZrO₂ unter den Keramiken als relativ schlagzäh eingestuft werden.

Ähnlich wie bei Si₃N₄ [18, 19, 20] bekannt, kann aus neueren Untersuchungen gefolgert werden, dass bestimmte Zirkondioxid-Qualitäten eine Dauerschwingfestigkeit besitzen. Leider bewährten sich ZrO₂-Werkstoffe wegen ihrer Phaseninstabilität nicht bei Hochtemperaturanwendungen [21].

2.6 LPS-SiC (htc-SiC-B)

Die Abkürzung LPS steht für Flüssigphasen gesintert (Liquid phase sintered) und wurde für diesen Werkstoff zur Unterscheidung vom einfach gesinterten SiC (SSiC) eingeführt [22]. Dieser Werkstoff wurde in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, um evtl. einen für die Wälzbeanspruchung geeigneteren Siliziumcarbid-Werkstoff zu untersuchen. Auch das LPS-SiC enthält einen Glasphasenanteil, der sich generell ungünstig auf die Wälzbelastung auswirkt.

Die mechanischen Werkstoffdaten für LPS-SiC sind in Tabelle 2 zu finden. Eine Überprüfung einiger der mechanischen Größen mittels der Akustomikroskopie lieferte für den E-Modul den Wert $E = 454 \text{ GPa}$ und für die Poissonzahl den Wert $\nu = 0,157$. Die verifizierten Messgrößen liegen im Bereich der Herstellerangaben.

Eine Darstellung des Gefüges konnte mittels Lichtmikroskopie erreicht werden. Hierfür wurde das Durchlichtverfahren verwendet. Aus der LPS-SiC-Probe wurde ein Dünnschliff hergestellt und dieser wurde mit dem Verfahren der modifizierten Murakamiätzung [23] behandelt. Die modifizierte Murakamiätzung wurde zur Präparation verwendet, da mittels dieses Verfahrens ein Nachweis sowohl von α -SiC als auch von β -SiC erfolgen kann. Der vorliegende Werkstoff wurde 30 Minuten der Ätzlösung ausgesetzt. Diese Zeit ist jedoch abhängig von den im Werkstoff enthaltenen Sinteradditiven und der Korngröße des Materials [23].

Aus den lichtmikroskopischen Untersuchungen (vgl. Abb. 15) ist zu erkennen, dass der Werkstoff größtenteils aus polygonen α -SiC-Körnern besteht mit einer Korngröße von 0,5 - 0,6 µm bei schmalen Körnern und 20-24 µm bei breiten Körnern. Um die α -SiC-Matrix herum sind zu einem geringen Anteil β -SiC-Körner angelagert. Damit unterscheidet sich dieses Gefüge erheblich von dem des SSiC mit seinen stengeligen Kristalliten aus α -SiC.

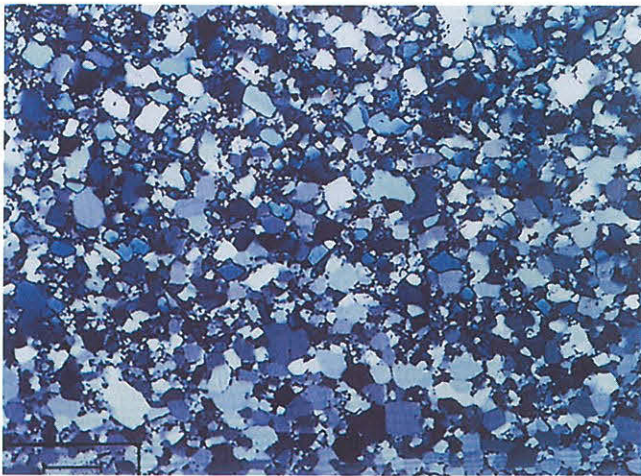


Abb. 15
Gefügedarstellung des Werkstoffs LPS-SiC mit dem lichtmikroskopischen Durchlichtverfahren

Die Untersuchungen mittels Röntgenbeugung zeigen, dass das Gefüge des Werkstoffs LPS-SiC zu 77 Gewicht-% aus hexagonalem α -SiC besteht und zu ca. 20 Gewicht-% aus kubischem β -SiC. Die verbleibenden ca. 3 Gewicht-% werden aus Materialien der Sinterhilfsstoffe gebildet, die letztendlich die Glasphase des Werkstoffs darstellen. Da der Anteil von anderen Stoffen im Werkstoff ≤ 5 Prozent ist, kann

3 Experimentelles

Die experimentellen Voraussetzungen wurden bei den gesamten Wälzverschleißuntersuchungen konstant gehalten, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

3.1 Apparatives

Sämtliche tribologischen Wälzverschleißuntersuchungen wurden an einem Zwei-Scheiben-Tribometer vom Typ Amsler [24] durchgeführt. In dem Prüfgerät werden zwei Probekörper (eine Scheibe ist zylindrisch und eine ballig) jeweils an einem der beiden Wellenenden montiert und an ihren Mantelflächen beansprucht (s. Abb. 16). Die Umdre-

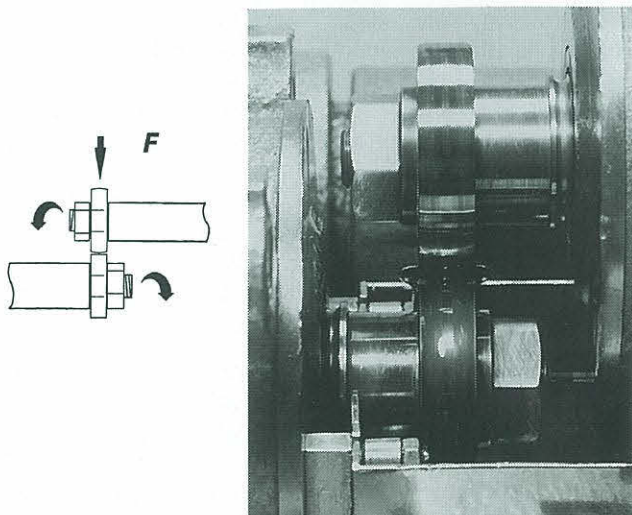


Abb. 16
Prüfanordnung in dem Amsler-Tribometer für den Wälzverschleiß (links: schematisch, rechts: Fotografisch)

mittels Röntgenbeugung keine Aussage getroffen werden, um welche chemischen Verbindungen es sich dabei handelt.

Durch eine Röntgenfluoreszenzanalyse lassen sich die Elemente des Glasphasenteils vor allem als Aluminium und Eisen identifizieren. Ferner sind in geringen Mengen Vanadium, Titan und Schwefel nachweisbar, Zirkonium liegt in Spuren vor. Eisen, Vanadium und Titan lassen sich häufiger als Spuren in gesinterten Werkstoffen finden, was auf den Mahlvorgang in den Pulvermühlen zurückzuführen ist. Al_2O_3 ist ein gängiges Sinterhilfsmittel. Eine quantitative Untersuchung konnte mittels der Röntgenfluoreszenz nicht durchgeführt werden, da kein Referenzmaterial vorlag.

Durch die Untersuchungen konnte bestimmt werden, dass der Glasphasenanteil bei ca. 3 Prozent liegt. Dies liegt über dem Wert von z. B. Si_3N_4 , was einen nur sehr geringen Glasphasenanteil von ≤ 1 Prozent aufweist und für die Wälzbelastung ein typischer Werkstoff ist.

Die an der BAM durchgeführten Härte-Messungen ergaben für den Werkstoff LPS-SiC eine Vickers-Härte [HV 0,5] von 25 GPa, was im Bereich der Härte des einfach gesinterten SiC bzw. des Werkstoffs SiC-TiC liegt, d. h. alle SiC-Werkstoffe zeigen vergleichbare Härtewerte. Die Bestimmung der Härte ist jedoch bei dem LPS-SiC schwierig, da an den Härteeindrücken laterale Risse gebildet wurden.

Die Umdrehungsgeschwindigkeiten der beiden Wellen unterscheiden sich um ca. 10 Prozent. Für einen Probenwechsel kann die obere, in einer Schwinde gelagerte Welle, abgehoben werden.

Zur Vorbereitung der tribologischen Wälzverschleißuntersuchungen wurde das verwendete Amsler-Tribometer modifiziert. Es wurde ein Umdrehungszähler installiert, wobei auf die innen verzahnte Schwungradscheibe der Prüfmaschine ein Streifen Reflexfolie geklebt wurde, so dass mit einem in unmittelbarer Nähe befestigten optischen Sensor mit nachgeschaltetem Zähler die Anzahl der Umdrehungen/Überrollungen der Unterprobe, die immer die zylindrische Probe ist, ermittelt werden kann. Aufgrund dieser Maßnahme konnte die exakte Anzahl der Überrollungen bzw. der daraus resultierende Gleitweg ermittelt werden.

Tabelle 6
Testbedingungen im Zwei-Scheiben-Tribometer vom Typ Amsler

Beanspruchungsbedingungen	Parameter
Art der Bewegung	wälzen; rollen mit 10 % Schlupf
anfängliche Hertzsche Pressung P_0	3 GPa; 1,5 GPa (SSiC)
Umdrehungsgeschwindigkeit	386 Upm/ 347 Upm
Gleitgeschwindigkeit v_{diff}	0,085 m/s
Anzahl der Überrollungen n_{ges}	$2 \cdot 10^6$ ($\rightarrow 2 \cdot 10^7$)
Gleitweg s	26.390 m ($\rightarrow 263.900$ m)
Umgebungstemperatur T	RT (≈ 23 °C)
Umgebungsmedium	Paraffinöl, Wasser

Für die tribologischen Versuche mittels Wälzverschleiß wurden folgende anwendungsnahen Parameter gewählt (s. Tabelle 6).

Die Normalkraft ist mittels einer Feder einzustellen, die obere Schwinde wird mit dem balligen Probekörper gegen die untere Welle und den zylindrischen Probekörper gepresst.

3.2 Das Zwischenmedium

Als Zwischenmedium für die Wälzverschleißuntersuchungen wurde unadditiviertes Paraffinöl bzw. destilliertes Wasser benutzt.

Das unadditivierte Paraffinöl als Zwischenmedium wurde auch zur Vermeidung thermisch bedingter Verschleißmechanismen eingesetzt. Dieses Paraffinöl wird bei Versagenslastversuchen für das System „Nocken/ Stößel“ bereits verwendet [25].

Dem Paraffinöl sind keine Additive zugesetzt, die das Reibungs- und Verschleißverhalten zusätzlich beeinflussen könnten. Die Verminderung von Reibung und Verschleiß bei Keramik/Keramik-Paarungen durch den Zusatz von Schmieröl-Additiven ist abhängig von den verwendeten Zusätzen und von der Länge der Ketten der chemischen Verbindungen [26]. Das Paraffinöl der Firma Merck wird unter der Bezeichnung „Paraffinöl dickflüssig“ vertrieben und weist eine dynamische Viskosität bei 20 °C von 110-230 m*Pa*s sowie eine kinematische Viskosität bei 40°C von > 34,5 cSt [27] auf. Das entionisierte Wasser wurde als Gegensatz zu dem Paraffinöl eingesetzt, da im Chemie- und Anlagenbau sowie im Maschinenbau auch wässrige Medien vorkommen. Auch hierbei wurde darauf geachtet, dass keine Zusätze vorhanden waren, die Einfluss auf den Verschleiß haben könnten.

Bei dem verwendeten Zwischenmedium ist die Wirkung des Rehbinder-Effekts [28] auf die Oberfläche des zu prüfenden Werkstoffs zu berücksichtigen. Das Wesen des Rehbinder-Effekts besteht darin, dass die Oberflächenenergie des Festkörpers und damit auch dessen Festigkeit unter dem Einfluss eines Zwischenmediums vermindert wird. Das Zwischenmedium vermindert die Oberflächenenergie des Festkörpers dann sehr deutlich, wenn beide Materialien chemisch miteinander verwandt sind [29]. Der Rehbinder-Effekt ist wichtig im Bereich der Materialermüdung, wenn aus Mikrorissen makroskopische Risse werden oder es zu Ausplatzungen bzw. Pitting kommt. Die Ermüdung eines Materials kann aufgrund von oberflächenaktiven Zwischenmedien forciert werden; um dies zu vermeiden, werden Zwischenmedien bzw. Schmierstoffe gewählt, die möglichst keine oberflächenaktiven Stoffe enthalten [29].

Da die bei den hier durchgeführten Untersuchungen gewählten Zwischenmedien keine Zusätze enthalten, ist zu Beginn der Untersuchungen davon auszugehen, dass die Oberflächenaktivität gering ist und somit verschleißfördernde Effekte in einem geringeren Rahmen zu Tage treten könnten.

Bei den durchgeführten Wälzverschleißuntersuchungen in Wasser an den Werkstoffen Si_3N_4 -TiN, ZrO_2 und SiC zeigte sich jedoch, dass ein Ermüdungsverschleiß mit Ausbrüchen zum Versagen der Werkstoffe führte und diese somit nicht für die Schmierung mit Wasser unter Wälzbeanspruchung geeignet sind. Eine Ursache hierfür könnte die oberflächen-

aktive Wirkung von Wasser sein, was die Rissbildung fördert. So löst sich z. B. bei dem Werkstoff Si_3N_4 -TiN die TiN-Phase in Wasser über Titanhydroxid auf und in dem Werkstoff ZrO_2 wird das Y_2O_3 als Hydroxid herausgelöst, was zu Materialausbrüchen und zum Versagen des Werkstoffs führt.

3.3 Probekörper für den Wälzverschleiß

Für die Wälzverschleißuntersuchungen wurden immer artgleiche keramische Probekörper verwendet, d. h. beide Wälzkörper bestanden immer aus dem gleichen Material und die Funktionsflächen waren i.d.R. auch nach dem gleichen Verfahren endbearbeitet. Von den Herstellern wurden die Prüfkörper gemäß der Geometrie in Abb. 17 geliefert.

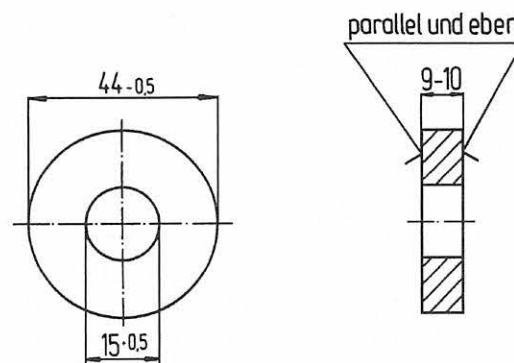


Abb. 17
Prüfkörpergeometrie vor der Endbearbeitung

Die Versuchsparameter und die Geometrie wurden so gewählt, dass die Randzonen der Werkstoffoberflächen im Bereich der Ermüdung beansprucht werden. Zum Beispiel ergibt sich bei der verwendeten Geometrie und den Werkstoffeigenschaften von HIP- Si_3N_4 sowie bei einer eingestellten Last von $F_N = 1005$ N eine Hertzsche elastische Kontaktbreite von 1,2 mm und eine radiale Abplattung von 0,5 bis 2 μm . Diese Spurbreite ist nach den Versuchen auf den Probenoberflächen in jedem Fall mit dem Auge sichtbar, auch wenn die Verschleißspurbreiten z. T. kleiner sind.

Der gewählte Radius von 21 mm bei den runden Probekörpern ist von der Geometrie her so gewählt, dass die Beanspruchungen überwiegend in einem dünnen Randzonenvolumen stattfinden und somit eine bessere Aussage über diearbeitungsbedingten Einflüsse gemacht werden kann. Die Verschleißlängen betragen weniger als 3 μm pro Probekörper. Der zweite Probekörper hat ein ebenes Profil. Mit den ebenen und runden Probekörpern ergeben sich somit aufgrund des Punktkontaktes definierte Bedingungen zu Versuchsbeginn.

Nach Aussagen von Adachi und Hokkirigawa [30] liegt für den Werkstoff Si_3N_4 ein Schlupf von ≥ 10 Prozent beim Wälzverschleiß im Bereich der Verschleißhochlage der Funktionsfläche. Somit kann auch von einem kritischen Schlupf, der jedoch pressungsabhängig ist, gesprochen werden.

3.4 Theoretische Anmerkungen zur Versuchsauswertung

Für die Auswertung der gemessenen Standardgrößen ist nur ein relativ geringer theoretischer Aufwand nötig. Die gemessenen tribologischen Größen sind die Reibungszahl f und der Verschleißkoeffizient k_v .

Die Reibungszahl f kann ermittelt werden über das Drehmoment des Schwungrades, dividiert durch die eingestellte Normalkraft und den Radius des Probekörpers.

Der Verschleißkoeffizient wird wie folgt berechnet:

$$k_v = \frac{W_v}{F_N \cdot s} \quad [\text{mm}^3/\text{Nm}] \quad \text{Gleichung I}$$

mit dem Verschleißvolumen W_v [mm³], der Normalkraft F_N [N] und dem Gleitweg s [m].

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Ingenieurkeramiken zu erreichen, wurde eine gleiche anfängliche Flächenpressung gewählt, so dass als variable Parameter nur die Oberflächenendbearbeitung und der Werkstoff bei den Untersuchungen verändert wurden.

Die unterschiedlich einzustellende Normalkraft bei den verschiedenen keramischen Werkstoffen ergibt sich gemäß der Hertzschen Gleichung [31] (vgl. Gleichung II) bei gleicher Flächenpressung (vgl. Tabelle 6) in Verbindung mit den mechanischen Eigenschaften (E-Moduli E und Poisson-Zahlen ν , vgl. Tabelle 2). Erfahrungsgemäß muss die Pressung im Vergleich zur Normalkraft im Tribokontakt für den Werkstoff als die bedeutendere Größe angesehen werden, weshalb diese auch als konstant gewählt wurde.

Die Flächenpressung P_0 ergibt sich gemäß der Hertzschen Gleichung aus:

Gleichung II

$$F_N = \pi^3 m^3 n^3 \frac{1}{6(B + A)^2} (k_1 + k_2)^2 P_0^3 \quad [\text{N}]$$

Tabelle 7

Normalkraft für die verschiedenen keramischen Werkstoffe bei einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$

Werkstoff	Si ₃ N ₄	SSiC	LPS-SiC	Si ₃ N ₄ -TiN	SiC-TiC	ZrO ₂	100Cr6
Normalkraft F_N [N]; ($P_0 = 3 \text{ GPa}$)	1005	665	548	1150	563	1575	2000 ^s
Normalkraft F_N [N]; ($P_0 = 1,5 \text{ GPa}$)		250*	205*				

* Die anfänglichen Hertzschen Flächenpressungen für die verschiedenen SiC-Qualitäten mussten herabgesetzt werden

^s $F_N = 2000 \text{ N}$ ist die maximal einstellbare Normalkraft der Prüfmaschine, dafür ergab sich für 100Cr6 eine Flächenpressung von $P_0 = 2 \text{ GPa}$

In Gleichung II bezeichnen die Parameter m , n , B und A von der Probengeometrie abhängige Größen. Im vorliegenden Fall gilt für die Probekörper beim Wälzverschleiß: $m = 1,276$; $n = 0,8045$ und $(B+A) = 1/14 \text{ [mm}^{-1}\text{]}$; (k_1+k_2) wird mit Gleichung III berechnet, in welche die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs aus Tabelle 2 eingehen.

$$(k_1 + k_2) = \frac{2(1 - \nu^2)}{E} \quad [\text{mm}^2/\text{N}] \quad \text{Gleichung III}$$

In Gleichung III bezeichnen E den Elastizitätsmodul und ν die Poisson-Zahl.

Wird Gleichung III in Gleichung II eingesetzt, ergeben sich nach Gleichung II die jeweils einzustellende Normalkraft F_N [N] (vgl. Tabelle 7) für die verschiedenen ingenieurkeramischen Werkstoffe.

Aufgrund der Ergebnisse der Wälzverschleißuntersuchungen an dem Werkstoff SiC bei einer anfänglichen Hertzschen Pressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ und einer damit verbundenen Normalkraft von $F_N = 665 \text{ N}$ wurde die anfängliche Hertzsche Flächenpressung halbiert und auf $P_0 = 1,5 \text{ GPa}$ herabgesetzt, was eine Normalkraft von $F_N = 250 \text{ N}$ ergab. Nur unter den modifizierten Einstellungen erwies sich der Werkstoff SSiC tauglich für den Wälzverschleiß. Gleiches ließ sich für den Werkstoff LPS-SiC beobachten, für den ebenfalls die anfängliche Hertzsche Flächenpressung um die Hälfte reduziert wurde. Bei $P_0 = 1,5 \text{ GPa}$ ergab die Normalkraft $F_N = 205 \text{ N}$.

Da die gewonnenen Ergebnisse an den keramischen Werkstoffen mit dem in der Praxis weit verbreiteten und erprobten Wälzlagerstahl 100Cr6 verglichen werden sollten, wurden einige Untersuchungen unter den oben genannten Bedingungen auch mit Probekörpern aus diesem Material durchgeführt. Da die an dem Amsler-Tribometer maximal einzustellende Normalkraft $F_N = 2.000 \text{ N}$ ist, wurde nur eine anfängliche Flächenpressung von $P_0 = 2 \text{ GPa}$ erreicht.

4 Bearbeitungstechniken der Probekörper

Vor den Wälzverschleißuntersuchungen wurden die Werkstücke, die im „as-fiered“-Zustand vom Hersteller geliefert wurden, mittels der Feinbearbeitungsverfahren Schleifen, Honen, Läppen oder Polieren am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig (Prof. Drs. E. Westkämper), D-38106 Braunschweig, endbearbeitet und wiesen somit unterschiedliche Randzonen und Oberflächenmorphologien auf. Die Endbearbeitung erfolgte jeweils in einer „rauheren“ und einer „feineren“ Spezifikation [32] für jedes der Bearbeitungsverfahren. Pro Werkstoff ergaben sich somit acht Versuche pro Medium. Für jede einzelne tribologische Untersuchung wurden jeweils neue endbearbeitete Probekörper verwendet.

Das Schleifen der Ringe erfolgte auf einer CNC-Innenrundschleifmaschine vom Typ Overbeck 600 IR, deren maschineneigene Steuerung das Verfahren von fünf Achsen ermöglicht. Die Fertigung der beiden Bauteilgeometrien unterschied sich hier nur durch eine angepasste Programmierung der Schleifmaschine. Die Ringe wurden mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 30$ m/s bearbeitet. Zum Einsatz kamen bei der „Grob“-Bearbeitung Schleifscheiben der Spezifikation D64 VSS 2813 DK 1AC C140. Bei der „Fein“-Bearbeitung wurde die Spezifikation D15 C100 B61 verwendet.

Für das Honen wurde ein Modellversuchsstand [33] eingesetzt, auf dem beide Bauteilgeometrien durch unterschiedliche Vorrichtungen erzeugt wurden. Der Modellversuchsstand wurde am IWF in Braunschweig entwickelt und in Betrieb genommen. An diesem Modellgerät konnten beide Probengeometrien gefertigt werden. Schnittgeschwindigkeit und Honwinkel betragen beim Honen $v_c = 1$ m/s bzw. $\alpha = 25^\circ$. Für das „Grob“-Honen wurde die Honleistspezifikation D30/710/6/75 verwendet, beim „Fein“-Honen kamen Honleisten der Spezifikation D7/512/1/100 zum Einsatz.

Um die zylindrischen und toroidischen Mantelflächen der Keramikringe läppen und polieren zu können, war ein spezieller Aufbau nötig [34]. Die Ringe wurden senkrecht auf die Polierscheibe gedrückt und konnten durch eine Drehlagerung frei abrollen (vgl. *Abb. 18*). Für die toroidischen Ringe wurde eine Nut mit dem erforderlichen Radius in die Polierscheibe eingedreht. Da diese Nut nur mit großem Aufwand abgerichtet werden konnte, wurden die toroidischen Ringe hin- und hergeschwenkt. Auf diese Weise verschliss die Radius-

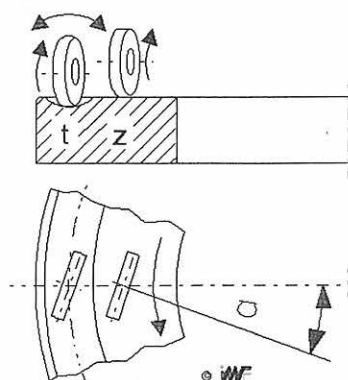


Abb. 18
Kinematische Anordnung der Probekörper auf der Polierscheibe bei der Oberflächenendbearbeitung;
t: toroidischer Ring,
z: zylindrischer Ring,
a: Schrägungswinkel

nut gleichmäßig. Durch das freie Abrollen der Ringe kam ein Abtrag durch Überrollen der Läppkörner zustande, die sich in die Oberfläche der Werkstücke eindrückten und dabei Werkstoffpartikel herausbrachten.

Um den Abtragsprozess zu verstärken, wurden die Ringe um den Schrägungswinkel α von der tangentialen Richtung aus gemessen schräg gestellt. Dadurch wurde eine Gleitbewegung zwischen Ring und Polierscheibe in radialer Richtung erzeugt. Auf diese Weise bewirkten Körner, die sich zeitweise in der Polierscheibenoberfläche festsetzen, einen zusätzlichen Abtrag durch ritzende Körner.

Eine entsprechende Vorrichtung positionierte die Ringe auf der Polierscheibe und erzeugte durch eine verstellbare Gewichtskraft den nötigen Anpressdruck. Da es sich hier im Gegensatz zum Planpolieren um eine Linienberührung handelt, waren die Anpressdrücke deutlich höher. Mit einer Abschätzung der realen Breite der Berührfläche ergaben sich Anpreßdrücke von 1,3 bis 13,8 N/mm². Beim Planpolieren sind Werte um 0,05 N/mm² üblich.

Die Ringe wurden auf diese Weise geläppt und zum Teil anschließend poliert. Es wurde jeweils eine Spezifikation „grob“ und eine „fein“ gewählt. Als Läppkorn kam Borkarbid mit mittleren Korngrößen von 30 und 7 μ m zum Einsatz. Es wurde im Verhältnis 1 : 2 mit Wasser aufgemischt. Zum Polieren wurde Diamantkorn mit 3 und mit 1 μ m Korngröße verwendet. Dabei wurde die Poliersuspension mit Wasser und Glycerin angemischt.

In *Abb. 19* sind die Aufmaße für die einzelnen Bearbeitungsschritte dargestellt. Ausgangszustand war immer eine vorgeschliffene Oberfläche. Durch die Aufeinanderfolge der verschiedenen Fertigungsverfahren wurde sichergestellt, dass die erzeugte Randzone nur durch das letzte Bearbeitungsverfahren beeinflusst wurde [34]. Bei den sehr fein bearbeiteten Funktionsflächen (fein polierten) konnte durch das hier angewandte Verfahren eine kürzere Bearbeitungszeit erreicht werden.

Die Bearbeitungsspezifikationen der Endbearbeitung der Funktionsflächen der keramischen Wälzkörper sind zusammengefasst aus *Tabelle 8* zu entnehmen.

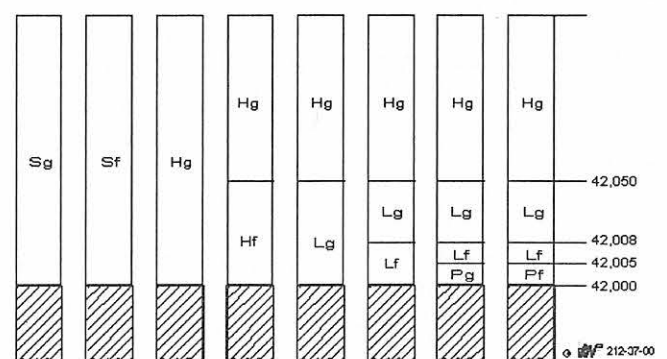


Abb. 19
Aufmaße der Bearbeitungsschritte bei den verschiedenen Prozessketten. Die Abkürzungen bedeuten: Bearbeitungsverfahren: S: Schleifen, H: Honen, L: Läppen, P: Polieren, sowie g: grob und f: fein

Tabelle 8

Bearbeitungsspezifikationen bei der Endbearbeitung der Funktionsflächen der Wälzproben am IWF der TU Braunschweig [32]

Schleifen:		Läppen:	
Korngröße	D126, D 64, D15	Läppkorn	B 30, B 7, F 240
Diamantkonzentration	25 Vol.-%	Normalkraft	2 N
Bindung	keramische	Läppmedium	Wasser mit Additiv, Korn zu Wasser 1:3 Vol.
Schnittgeschwindigkeit	30 m/s	Läppscheibengeschwindigkeit	0,6 m/s
Kühlschmierstoff	Öl, Variocat G 500		
Honen:		Polieren:	
Korngröße	D30, D7	Polierkorn	D 3, D1
Diamantkonzentration	25 Vol.-%	Normalkraft	3 N
Bindung	keramische	Poliermedium	wässrige Suspension mit Glyzerinzusatz
Anpressdruck	$p_n = 3 \text{ N/mm}^2$	Polierscheibengeschwindigkeit	0,6 m/s
tangentiale Hongschwindigkeit	$v_t = 1 \text{ m/s}$		
axiale Hongschwindigkeit	$v_a = 0,2 \text{ m/s}$		
Kühlschmierstoff	Öl, Honilo 930		

5 Akustomikroskopie – Zerstörungsfreie Prüfung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Akustomikroskopie für die Untersuchung von tribologisch beanspruchten Probekörpern weiterentwickelt und deren Aussagefähigkeit überprüft.

Es war im Vorfeld angenommen worden, dass mit der Akustomikroskopie an und unterhalb der Oberfläche bearbeitungsbedingte Oberflächenfehler sowie in der Verschleißspur tribologisch entstandene Fehler zerstörungsfrei detektiert werden können.

5.1 Prinzip der Akustomikroskopie

Bei dem Prinzip der Akustomikroskopie handelt es sich um ein spezielles Echoverfahren. Die Probe, die im „Gesichtsfeld“ der Linse liegt, wird von der akustischen Linse Punkt für Punkt abgetastet und das sich ergebende Bild wird elektronisch aufgebaut. Die vom Fokus ausgehende Welle wird an der Probenoberfläche oder im Probenvolumen gebrochen, aber auch an unregelmäßigen Strukturen, wie z. B. Rissen, gestreut, gebeugt, z. T. absorbiert und reflektiert.

Spezielle akustische Linsen mit großer Appretur und Öffnungswinkeln von 60° bis 100° verursachen die Umwandlung eines Teils der Schallwelle in eine Rayleighwelle (Oberflächenwelle). Am piezoelektrischen Wandler (vgl. Abb. 20) entsteht ein Signal, welches durch die Interferenz der reflektierten Strahlen zusammengesetzt ist [35]. Dieses Signal ist empfindlich auf eine Änderung des (Schall-) Weges sowie der Schallgeschwindigkeit (Laufzeit). Lokale Änderungen im Probenmaterial verursachen eine Änderung der Schallgeschwindigkeit und wirken somit auf den Signalinhalt, was sich als Bildkontrast darstellt. Die photometrischen Hell-Dunkel-Kontraste lassen somit Hinweise auf die mechanisch-elastischen Kenngrößen des Probenmaterials zu [36].

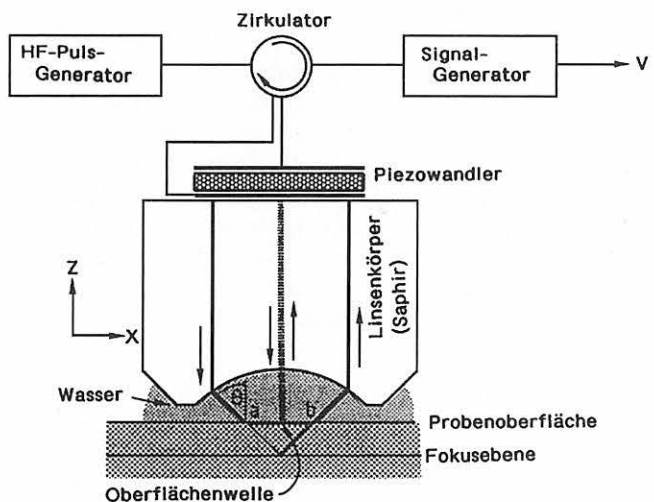


Abb. 20 Schematische Darstellung der Prüfkopf-anordnung und des Strahlenganges im Akustomikroskop.

Das Eindringvermögen der Schallwellen ist abhängig von der eingestrahelten Wellenlänge, je größer die eingestrahelte Frequenz ist, je oberflächennäher kann beobachtet werden.

5.2 Weiterentwicklung der Meßmethode

Die Untersuchungen zur Charakterisierung der Prüfköpfe zeigten, dass bei der Messung von für die Anwendung wichtigen Parametern wie Fokusschlauchlänge, -durchmesser und Prüfkopfspektrum der benutzte Reflektor und die Länge des Prüfkopfkabels entscheidend die Messergebnisse beeinflussen. Für die geplanten akustomikroskopischen Untersuchungen mussten neue breitbandige Prüfköpfe inkludiert werden.

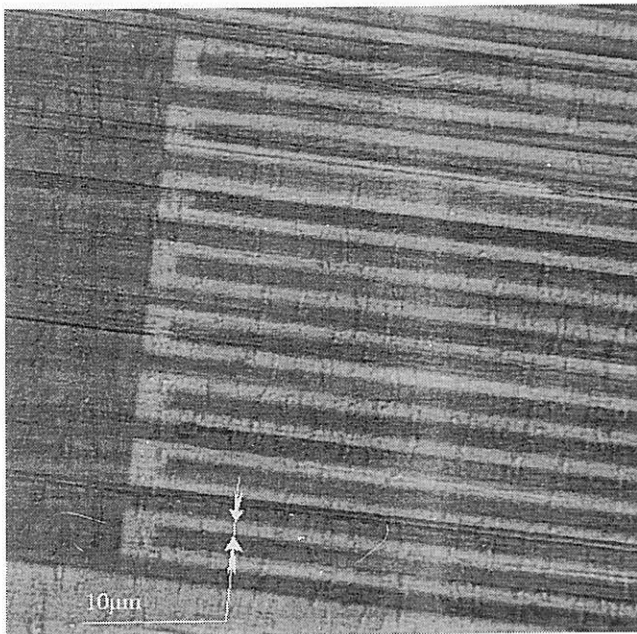


Abb. 21
PVDF-Folie mit strukturierten Goldkontakten

sive der nachgeschalteten Elektronik entwickelt werden, da hierfür kein kommerzieller Anbieter zur Verfügung stand.

Die Mittenfrequenzen der Prüfköpfe lagen bei 7,5 MHz und die Bandbreite betrug 10 MHz. Hierfür wurden Tests mit PVDF-Folien gemacht (vgl. Abb. 21), die die Bearbeitung mit den herkömmlichen Schritten der Mikroelektronik erlauben. Die Folien sind zwischen 5 und 50 μm dick. Mit ihnen können Ultraschall-Wellen bis über 100 MHz angeregt werden, was abhängig von der konkreten Folienstärke ist. Die untersuchten Folien waren 40 μm dick und mit 100 nm Gold beschichtet. Der elektromechanische Koppelfaktor entspricht etwa dem des Zinkoxids. Auf Grund der geringen akustischen Güte des Materials besitzen die Wandler eine große Bandbreite. Wesentlich für den praktischen Einsatz im Impuls-Echo-Verfahren ist die hohe Spannungsfestigkeit.

Um die gewünschte Verlustreduzierung zu erreichen, musste eine spezielle Anpassschaltung realisiert werden, so dass ein effektiver Einsatz in der Prüftechnik möglich ist. Mit der gleichen Technologie wurde ein phasenempfindlicher Wandler für das Akustomikroskop entwickelt und gebaut. Des Weiteren wurde ein 32-Elemente-Array entworfen, dessen akustisch aktive Struktur mit der Fotolithografie hergestellt wurde.

Für die Erzeugung der komplexen Strukturen auf den Folien wird die Standard-Fotolithografie eingesetzt. Mit ihr ist es möglich, auf der Folie Strukturbreiten von weniger als 10 μm und geringer Kantenrauigkeit zu erzeugen. Die Kontaktierung der Leitbahnen auf der Folie mit äußeren elektrischen Anschlüssen geschieht gegenwärtig mit Leiterplattensteckern oder mit leitfähigem Epoxidharz.

Die PVDF-Folie wird als piezoelektrischer Wandler eingesetzt, da sie die Eigenschaften einer großen Wandlungsbandbreite und leichter mechanischer Form- und Handhabbarkeit vereint. Damit ist die Folie hervorragend geeignet, auch kompliziertere Wandleroberflächen und Strukturen zu realisieren. Nachteilig wirkt sich die hohe elektrische Impedanz und der im Vergleich zu anderen Wandlermaterialien

geringere elektromechanische Koppelfaktor aus. Diese Nachteile lassen sich jedoch in gewissen Grenzen durch aufwendigere elektronische Anordnungen kompensieren.

Eine der Aufgabenstellungen war die Untersuchung der (nicht-planen) Mantelflächen der Wälzproben mittels der Akustomikroskopie, aus diesem Grund musste eine Weiterentwicklung der akustischen Linse erfolgen, da die Verwendung rotationssymmetrischer akustischer Linsen nicht die Auflösung richtungsabhängiger Materialeigenschaften gestatten.

Im folgenden sind die Ergebnisse der Prüfkopf-(Linsen-)Entwicklung und das elektronische Schaltungskonzept dargestellt. In Abb. 22 ist der schematische Aufbau einer derartigen Linse gezeigt. Durch diesen Aufbau wird eine punktfokussierte Strahlungscharakteristik realisiert. Die Segmentierung des Schwingers und der Epoxidharzschicht in vier Sektoren teilt die Linse in rechtwinklig zueinander stehende, völlig unabhängige Strahlungskanäle.

Mit den zur Verfügung stehenden technologischen Mitteln lassen sich Brennweiten zwischen 5 und 20 mm bei einem Öffnungswinkel bis 80° einstellen. Die Linsen können im Frequenzbereich von 5 bis 50 MHz ohne Neujustage eingesetzt werden. Durch die Realisierung einer gekrümmten Wandlerfläche kann auf akustische Fokussierungsmittel im Strahlengang verzichtet werden. Es entfallen entsprechende Linsenechos, die den Störsignalpegel merklich beeinflussen würden.

Für den Betrieb der Sektorlinse wurde der Aufbau von einem Sendekanal und zwei separaten Empfangskanälen vorgesehen und realisiert. Als Anregungssignal für die als Sen-

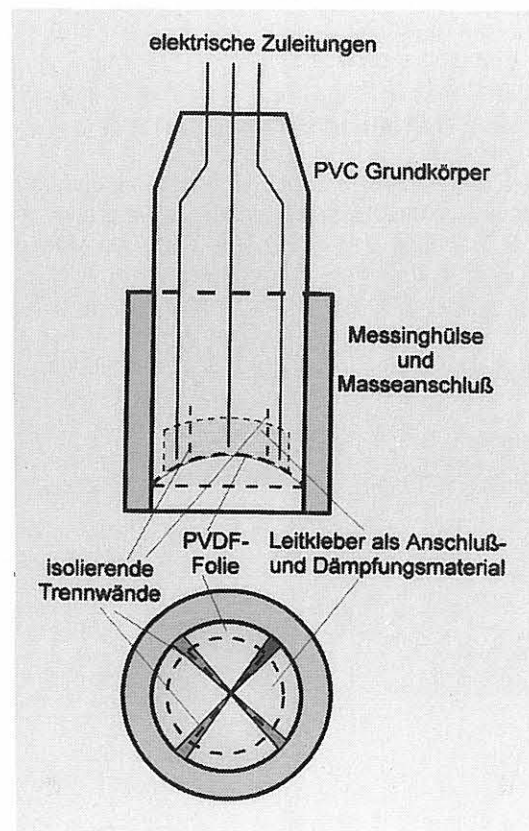


Abb. 22
Schematischer Aufbau einer Sektorlinse

der wirkenden Sektoren wird ein HF-Burst verwendet. Seine Erzeugung übernimmt ein HF-Generator, ein elektronischer Schalter und ein Rechteckgenerator. Die erforderlichen 20 V Spitzenspannung werden durch nachträgliche Verstärkung in einem Leistungsverstärker aufgebracht. Die hohe Impedanz der Folie erfordert spezielle Anpassverstärker und Maßnahmen zur Kompensation kapazitiver Belastungen. Obwohl das Linsensystem hohe Bandbreiten zulässt, entsteht an dieser Stelle eine Bandbegrenzung auf den gerade eingestellten Frequenzbereich. Über eine Verzögerungseinheit, einen zweiten Kanal des Rechteckgenerators und entsprechende HF-Schalter werden Übersprech- und andere Störsignale zeitlich herausgefiltert. Das resultierende Nutzsignal wird rauscharm weiter verstärkt, gleichgerichtet und über eine Digitalisierung zum Bildaufbau verwendet.

Ein Kontrollrechner übernimmt die Steuerung des mechanischen Kreuztisches und die rechen-technische Bildaufbereitung. Damit ist ein eigenständiges Akustomikroskop entstanden, welches neben der herkömmlichen Betriebsweise einige neue Messprinzipien gestattet. Die Messgeschwindigkeit wird derzeit vom eingesetzten Kreuztisch auf etwa zwei Minuten für 200 x 200 Bildpunkte begrenzt.

Durch Integration einer Drehachse in den Messaufbau ist die Messung zylindrischer Oberflächen möglich geworden,

wobei die zu vermessende Funktionsfläche unter der Messlinse weggedreht wird. Mit dem Aufbau der Sektorlinse (s. Abb. 22) und der Entwicklung der dazugehörigen Messtechnologie gelingt die selektive Darstellung von Strukturen mit bearbeitungsbedingten Vorzugsorientierungen. In einer Messfahrt können gleichzeitig über getrennte Kanäle Querrisse und Längsriefen selektiert werden. Im Unterschied zur konventionellen Ultraschallmikroskopie wird hier nicht mehr die Oberfläche abgebildet, sondern eine genaue Position der Defekte ermittelt. Mit einem großen Arbeitsabstand von ca. 2 cm ist dieses Verfahren für eine automatisierbare Oberflächenkontrolle nach Bearbeitungsprozessen geeignet und bei entsprechender Manipulatorführung an komplizierte Oberflächenformen anpassbar.

Zu den Vorteilen der Ultraschallmikroskopie zählt der geringe präparative Aufwand vor den Untersuchungen, d. h. die zu untersuchenden Proben können unzerkleinert eingebaut werden. Das ausschließliche Detektieren von Defekten ist durch Ein- und Ausblenden der Untergrundsignale möglich. Durch das Abrollen der Mantelfläche können große Bereiche untersucht werden und es entsteht somit ein guter Gesamtüberblick über die Strukturen und Defekte der Funktionsfläche.

6 Modellvorstellungen zum Wälzverschleiß

Im Rahmen der Aufgabenstellung sind Verschleißmechanismen als Folge der tribologischen Beanspruchung und während der Endbearbeitung zu betrachten. Angestrebt wird, dass der Werkstoff während der Endbearbeitung schädigungsfrei abgetragen wird, damit der Verschleißbetrag während der tribologischen Belastung klein bleibt.

6.1 Verschleißmechanismen

Die Verschleißmechanismen beschreiben die Wechselwirkung zwischen Grund- und Gegenkörper während der tribologischen Beanspruchung. Die verschiedenen Mechanismen, die Reibung und Verschleiß beeinflussen, sind Adhäsion, Tribooxidation, Abrasion und Oberflächenzerrüttung. Schematisch sind diese verschiedenen Mechanismen in Abb. 23 dargestellt und in DIN 50320 [37] beschrieben.

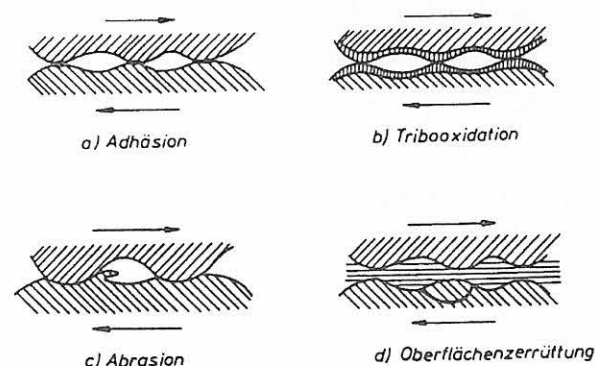


Abb. 23
Schematische Darstellung der verschiedenen Verschleißmechanismen

Im folgenden werden diese Mechanismen kurz erläutert und dabei besonders auf die Mechanismen bei keramischen Tribokontakten eingegangen:

- Bei der *Adhäsion* kommt es zu Bildung und Trennung von atomaren Bindungen (Mikroverschweißungen) zwischen Grund- und Gegenkörper. Bei keramischen Werkstoffen ist aufgrund ihrer ionischen bzw. kovalenten Bindungen die Neigung zur Adhäsion sehr gering. Die benötigte Oberflächenenergie zum Kracken dieser Bindungsarten ist wesentlich höher als z. B. die für metallische Bindungen. Die geringe Neigung zum Mikroverschweißen wird auch durch die kleine Kontaktfläche, die hohe Härte und den hohen E-Modul begünstigt. Bei den Werkstoffen SiC und Si₃N₄ kommt noch hinzu, dass diese Stoffe keinen Schmelzpunkt, dafür aber eine Zersetzungstemperatur besitzen und die plastische Verformungsfähigkeit eingeschränkt ist.
- Die *Tribooxidation* ist eine chemische Reaktion von Grund- und Gegenkörper mit Bestandteilen des Schmierstoffs oder des Umgebungsmediums infolge reibungsbedingter Aktivierung. Sowohl oxidische als auch insbesondere nichtoxidische keramische Werkstoffe unterliegen sowohl unter Trockenreibung als auch unter geschmierten Bedingungen den tribologisch bedingten chemischen Veränderungen ihrer Oberflächen. Bei diesen Werkstoffen bilden sich meist dünne, passive Reaktionsschichten. Somit sind bei keramischen Werkstoffen kleinere Schichtdicken, die auf eine Tribooxidation zurückzuführen sind, zu erwarten als bei metallischen Werkstoffen.

- c) Bei der *Abrasion* handelt es sich um eine Ritzung und Mikrozerspannung des Grundkörpers durch harte Rauheitshügel des Gegenkörpers oder durch Partikel im Zwischenstoff.

Die Vorgänge beim abrasiven Verschleiß lassen sich nach K.-H. Zum Gahr [38] wie folgt unterteilen:

Mikropflügen

tritt bei keramischen Werkstoffen nur bei hohen Temperaturen oder hohen Kontaktspannungen auf. Der Mechanismus begründet sich auf die Einwirkung eines einzelnen abrasiven Teilchens und führt nur zum plastischen Verformen und nicht zum Materialabtrag.

Mikrospanen

hierbei bildet sich im Idealfall ein Span mit gleichem Volumen wie die entstandene Furche.

Mikrobrechen

ist der bei keramischen Werkstoffen vorherrschende Mechanismus und durch das Ausbrechen größerer Verschleißpartikel gekennzeichnet. Aufgrund der Sprödigkeit und der geringen plastischen Verformbarkeit dieser Werkstoffe kommt es vermehrt zur Rissbildung sowie Rissausbreitung im Bereich hoher Spannungskonzentrationen und schließlich zum verformungsarmen Ausbrechen von Verschleißpartikeln an der Werkstückoberfläche.

- d) Die *Oberflächenzerrüttung* ist das Ergebnis von Rissbildung und Risswachstum bis zum Abtrennen von Partikeln infolge zyklischer mechanischer Beanspruchungen. Diese Beanspruchungen sind in den Oberflächenbereichen von Grund- und Gegenkörper wirksam. Die Spannungsfelder entstehen aufgrund einer mechanischen Oberflächenbeanspruchung oder im Trockenlauf durch Umwandlung der Reibungsverlustleistung in Wärme, woraus eine Dehnung der Oberfläche und folglich Spannungen resultieren. Innere Fehler, Sprünge in den Werkstoffeigenschaften zwischen zwei oder mehr Phasen und Eigenspannungen im Werkstoff begünstigen die Oberflächenzerrüttung.

6.2 Die Verschleißmechanismen bei keramischen Werkstoffen

Die hohe Härte und der hohe E-Modul sowie die kleine Kontaktfläche und die Art der chemischen Bindung von keramischen Werkstoffen beeinflussen die geringe Neigung zur Adhäsion.

Die ionischen oder kovalenten Bindungen der keramischen Werkstoffe sind chemisch sehr stabil und tragen somit dazu bei, dass diese Stoffe chemisch nicht oder nur gering reaktiv sind. Gegenüber der Tribooxidation bei Metallen sind die zumeist oxidischen Reaktionsschichten weicher als ihr Substrat.

Die geringe Bruchzähigkeit der Ingenieurkeramiken und die geringe plastische Verformbarkeit bewirken, dass es aufgrund von Rissbildung und -ausbreitung zu einer Ermüdung des Werkstoffs kommt. Somit ist die Oberflächenzerrüttung ein maßgeblicher Verschleißmechanismus, auch im Falle der Trockenreibung oder unter Wasserschmierung. Andererseits sind jüngst bei Si_3N_4 und ZrO_2 Dauerschwingfestigkeiten

bekannt geworden, so dass Keramiken auch unterhalb einer bestimmten Spannung überrollfest sein können.

Die Rissbildung und -ausbreitung ist auch an den Abrasionsvorgängen beteiligt und kann das Abtrennen von Partikeln aus dem Oberflächenbereich begünstigen. Aufgrund der geringen plastischen Verformung von ingenieurkeramischen Werkstoffen ist das Mikrobrechen der am meisten vorkommende abrasive Verschleißmechanismus.

6.3 Verschleißmechanismen bei der Bearbeitung

Auch bei der Endbearbeitung keramischer Bauteile sind die zuvor genannten Verschleißmechanismen und damit deren Einfluss auf die Oberfläche und die oberflächennahen Zonen zu berücksichtigen.

Bei der Bearbeitung bilden Werkstück und Werkzeug ein tribologisches System, bestehend aus dem Werkstück als Grundkörper und dem Werkzeug als Gegenkörper. Es kommt zu einem Materialabtrag mit Auswirkungen auf die Randzone beim Gegenkörper und zu einem Verschleiß des Grundkörpers [39]. Somit treten bei der Bearbeitung die bekannten Verschleißmechanismen nach DIN 50 320 [37] auf.

Am Beispiel der Schleif-Bearbeitung soll verdeutlicht werden, wie der Verschleißmechanismus bei keramischen Werkstoffen zustande kommt und dadurch ein Abtrag des Materials möglich wird.

Das Schleifkorn bewegt sich in *Abb. 24* von links nach rechts. Zuerst kommt es zu einer elastischen Verformung des Werkstoffs, dem folgt die Rissbildung, indem sich Mikrorisse in der Werkstoffoberfläche bilden. Weiterhin kommt es zu einer plastischen Verformung. Das Schleifkorn ritzt sich in die Oberfläche ein. Aufgrund der Sprödigkeit der Keramiken, werden Spanbruchstücke herausgetrennt [39]. Hieran ist zu erkennen, dass es nicht zu einem abhebenden Span kommt wie bei metallischen Werkstoffen, die gut plastisch verformbar sind.

Die erzielten Untersuchungsergebnisse werden unter anderem auch bezüglich des Zeitspanvolumens bei der Endbearbeitung betrachtet. Dieses Zeitspanvolumen ist eine gängige Größe für den Materialabtrag [in mm^3] bei der Bearbeitung im Verhältnis zu der dazu benötigten Zeit [in s].

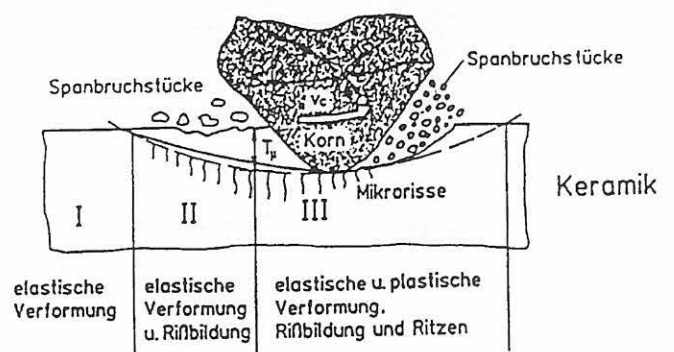


Abb. 24
Verschleißmechanismen bei der Schleif-Bearbeitung

7 Untersuchungsergebnisse

Bei den Wälzverschleißuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden immer artgleiche Ingenieurkeramiken verwendet und in der Regel waren die Funktionsflächen auch nach dem gleichen Endbearbeitungsverfahren bearbeitet. Die verschiedenen verwendeten Werkstoffe sind in Kapitel 2 ausführlich beschrieben. Die Bearbeitung der Funktionsfläche wird in Kapitel 4 behandelt und ist in der Übersicht in *Tabelle 8* aufgelistet.

Vor Beginn der tribologischen Untersuchungen wurden die Rauheitskenngrößen R_a und R_z nach DIN 4768 [40] und R_{vk} und R_{pk} nach DIN 4776 [41] sowie die Konturprofile für die quantitative Bestimmung des Verschleißbetrages ermittelt.

Um eine Aussage über den bearbeitungsbedingten Einfluss auf das Wälzverschleißverhalten machen zu können, wurden für jeden Werkstoff mehrere Bearbeitungsverfahren angewendet, die unterschiedliche Rauheiten und Morphologien der Funktionsflächen produzierten. Durch dieses Vorgehen konnten Aussagen über den Einfluss der Bearbeitung gemacht werden. Bei einigen Werkstoffen konnte gezeigt werden, dass eine Bearbeitung „the-best-as-possible“ nicht zu den geringsten Verschleißbeträgen führt.

Die Versuchsreihen wurden mit verschiedenen Zwischenmedien durchgeführt, um zusätzlich den Einfluss des Zwischenmediums auf den Verschleiß berücksichtigen zu können. Als Zwischenmedium wurden Paraffinöl ohne Additive oder entionisiertes Wasser verwendet. Einige der Werkstoffe eignen sich nicht für eine Wasser-Schmierung, weshalb diese Versuchsreihen bis auf einige wenige Versuche nicht weiter fortgesetzt wurden.

Das breit gefächerte Versuchsprogramm lässt eine gezielte Aussage zu, wie der entsprechende Werkstoff für ein gutes Verschleißverhalten und ökonomisch bearbeitet werden sollte.

Die Untersuchungsergebnisse sind im Folgenden nach den verschiedenen Werkstoffen geordnet dargestellt mit einem abschließenden Vergleich der verschiedenen Ingenieurkeramiken. In der Anlage sind tabellarisch alle Ergebnisgrößen für jede einzelne tribologische Untersuchung aufgelistet.

7.1 HIP-Si₃N₄ (NBD 200)

Die Werkstoffbeschreibung zu HIP-Si₃N₄ (NBD 200) ist in Kapitel 2.1 zu finden.

7.1.1 Untersuchungen in Paraffinöl

Für die Wälzverschleißuntersuchungen von HIP-Si₃N₄ in Paraffinöl wurden artgleich bearbeitete Wälzkörper verwendet. Aufgrund des guten Wälzverschleißverhaltens des Werkstoffs wurde ein umfassendes Untersuchungsprogramm durchgeführt. Die apparativen Einstellungen der Versuchsreihe sind Kapitel 3.1 zu entnehmen.

7.1.1.1 Reibung

Die Reibungszahlen können abhängig von den Überrollungszahlen aufgezeigt werden (s. *Abb. 25*). Aus *Abb. 25* ist deutlich zu erkennen, dass die Reibungszahl für die einzelne tribologische Untersuchung vom Beginn der Untersuchung bis zu deren Ende bei einer Überrollungszahl von $n = 2 \cdot 10^6$ nur geringfügig variiert. Insgesamt betrachtet liegen die Reibungszahlen auch nur in einem engen Bereich von $f = 0,04$ bis etwa $f = 0,12$. Die grob geschliffenen Probenkörper, die eine relativ raue Funktionsfläche aufweisen, zeigen auch die höchste Reibungszahl über die gesamte Versuchsdauer. Die geläppten und polierten Probenoberflächen weisen einen mittleren Reibwert auf, während die gehonten die geringsten Reibwerte zeigen.

Schon bei den Reibungszahlen zeigt sich, dass bei dem Werkstoff HIP-Si₃N₄ unter Wälzreibung in Paraffinöl nicht die feinste Endbearbeitung auch zu den niedrigsten Reibungszahlen führt.

Die nahezu konstanten Reibwerte für die jeweiligen Bearbeitungsparameter lassen vermuten, dass sich in allen Fällen eine „individuelle Rauheit“ von selbst einstellt. Die anfängliche Oberflächenrauheit ist abhängig vom Bearbeitungsverfahren, somit beeinflusst das Bearbeitungsverfahren die auftretende Reibung.

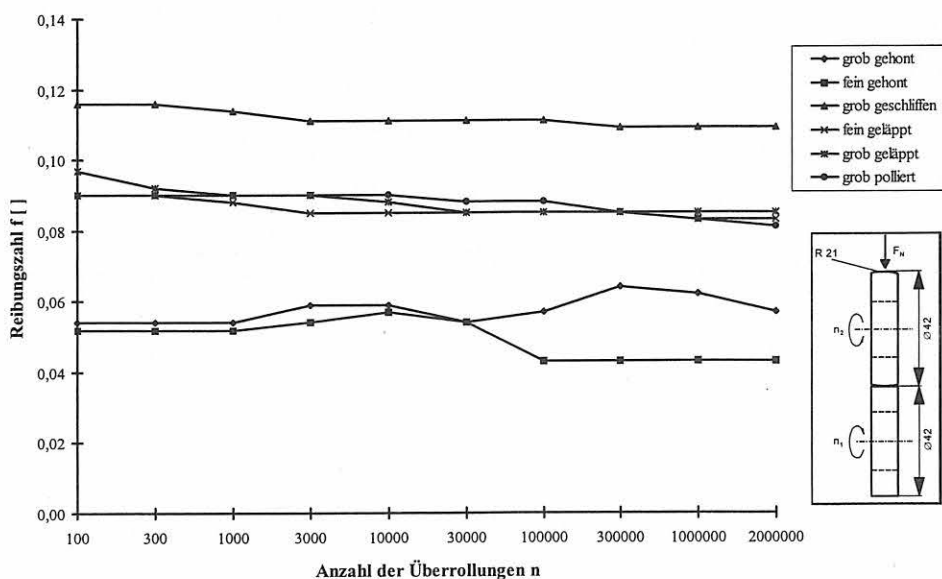


Abb. 25
Reibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen für den Werkstoff HIP-Si₃N₄ bei Wälzreibung in Paraffinöl

7.1.1.2 Verschleiß

Im Allgemeinen ist der Verschleißbetrag des Werkstoffs HIP-Si₃N₄ bei der Wälzreibung in Paraffinöl niedrig und liegt je nach der Endbearbeitungsart der Funktionsfläche zwischen Werten von 0,06 und 30,2 * 10⁻⁹ [mm³/Nm] für die einzelnen Probekörper. Der Verschleißbetrag nimmt mit zunehmender anfänglicher Oberflächenrauheit zu, d. h. mit größer werdendem Endbearbeitungsverfahren, was auch bedeutet, dass das Zeitspanvolumen für die hier verwendeten Verfahren zunimmt.

Für den Werkstoff HIP-Si₃N₄ gilt, dass der Verschleißbetrag um so niedriger ist, je feiner das Endbearbeitungsverfahren ist. Jedoch wird der Verschleißbetrag nur unwesentlich geringer von den Bearbeitungsverfahren des Feinhonens oder Feinschleifens zum Polieren. Dies bedeutet, dass auf die Polierbearbeitung verzichtet werden kann, wenn ein geringfügig höherer Verschleißbetrag für die Anwendung akzeptabel ist.

Die Streubreite der Verschleißbeträge bei den balligen Probekörpern ist größer als bei den zylindrischen, was jedoch an

dem komplizierteren Verfahren der Endbearbeitung liegt, und somit an den i. d. R. höheren anfänglichen Oberflächenrauheiten der balligen Funktionsflächen. Selbst die groben Bearbeitungsverfahren, wie Grobschleifen und -honen, zeigen einen niedrigen Verschleißwert. In Abb. 26 ist ersichtlich, dass der Verschleißbetrag für Zeitspanvolumen von $Q_w \leq 0,02 \text{ mm}^3/\text{s}$ eine Verschleißtieflage aufweist und in seinem Wert nur geringfügig variiert.

Gardos und Hardisty [42] führen den geringen Verschleiß des Werkstoffs HIP-Si₃N₄ (NBD 200) unter Schmierung mit Paraffinöl u. a. auf den geringen Anteil von Glasphase zurück. Weiterhin konnten sie bei ihren Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs HIP-Si₃N₄ und der Abtragsrate bei der Endbearbeitung feststellen [42], welche ebenfalls eine tribologische Beanspruchung darstellt (vgl. auch Kapitel 6.3).

Von der Endbearbeitung direkt abhängig ist die eingestellte Oberflächenrauheit der Funktionsfläche. Somit ist es auch möglich, die Oberflächenrauheit als Bezugsgröße bezüglich des Verschleißbetrages zu ermitteln. In Abb. 27 wird deut-

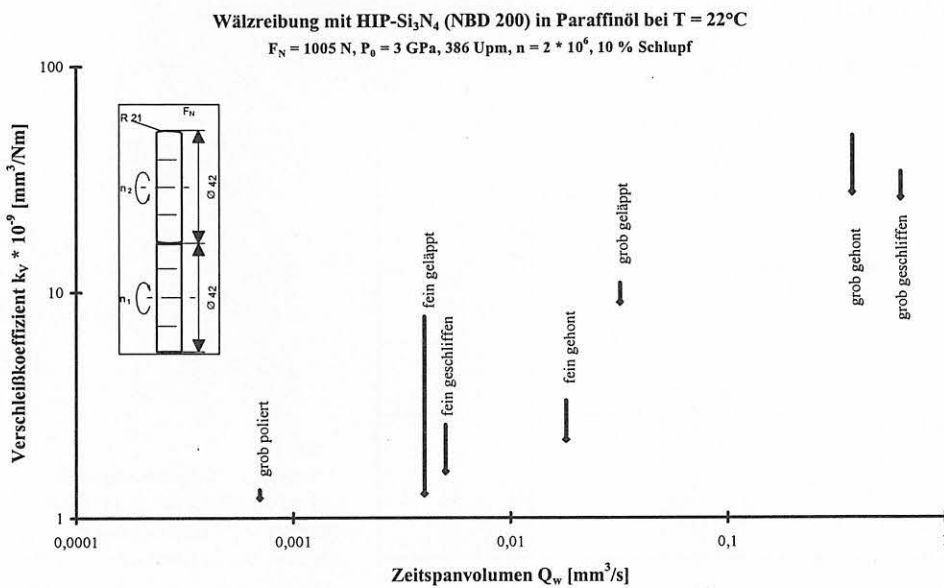


Abb. 26
Gesamtverschleißbetrag des Tribosystems für den Werkstoff HIP-Si₃N₄ in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen bei der Endbearbeitung der Funktionsfläche (Doppelversuche)

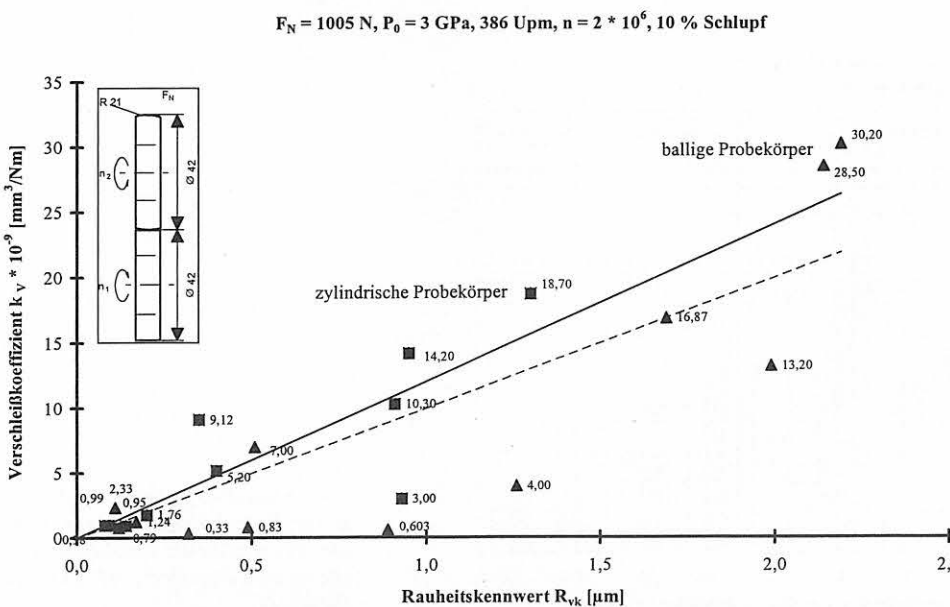


Abb. 27
Verschleißkoeffizient von HIP-Si₃N₄ unter Wälzreibung in Paraffinöl als Funktion von der gefilterten reduzierten Riefentiefe R_{vk} [41]

lich ersichtlich, dass der Verschleißbetrag mit zunehmender Oberflächenrauheit zunimmt. Hierbei ist auch deutlich erkennbar, dass die Streuung der Verschleißbeträge der balligen Probekörper breiter ist als die der zylindrischen.

Die verschiedenen Beziehungen des Verschleißkoeffizienten zu anderen Auswertgrößen zeigen, dass die Bearbeitungsverfahren immer mit den erzielten Rauheiten korreliert werden können und somit eine direkte Aussage über eine optimale Endbearbeitung der Funktionsfläche gemacht werden kann.

7.1.1.3 Oberflächenrauheiten

Die Oberflächenrauheiten sind – wie oben beschrieben – direkt verbunden mit dem angewendeten Endbearbeitungsverfahren der Funktionsfläche. Die Rauheiten wurden vor der tribologischen Beanspruchung und z. T. in der Spur des zylindrischen Probekörpers gemessen.

Werden die Rauheitskennwerte reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und reduzierte Riefentiefe R_{vk} vor der tribologischen Beanspruchung betrachtet, so ist festzustellen, dass die reduzierte Riefentiefe R_{vk} eine bessere Korrelation zum Verschleiß des Bauteils aufweist. Die auftretende Streuung der Werte

(vgl. Abb. 28) deutet darauf hin, dass die gefilterten Rauheitskennwerte gemäß DIN 4776 für keramische Bauteile angepasst werden müssten. Es ergibt sich eine bessere Korrelation mit den ungefilterten Rauheitskennwerten P_{vk} [32], die nahe $R = 1$ liegt. Die gefilterte reduzierte Riefentiefe R_{vk} weist lediglich einen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,47$ auf (vgl. Abb. 28).

Werden die Rauheitskennwerte der gemittelten Rauhtiefe R_z [40] und der Mittenrauhtiefe R_a [40] vor und nach der tribologischen Belastung betrachtet, ist in Abb. 29 zu erkennen, dass sich für grob bearbeitete Oberflächen, d. h. eine rauhe Funktionsfläche, die Oberflächenrauheit in der Spur durch die tribologische Belastung glättet. Sind jedoch die Funktionsflächen bereits nach der Endbearbeitung relativ glatt, so hat die tribologische Beanspruchung nur einen geringfügigen oder keinen Einfluss auf die Rauheitskennwerte.

Für eine anfängliche Oberflächenrauheit von $R_z \leq 0,5 \mu\text{m}$ und $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$ werden keine signifikanten Änderungen der Oberflächenrauheit nach der tribologischen Beanspruchung festgestellt. Dagegen wiesen die Oberflächen mit einer anfänglich größeren Rauheit durch den Einlauf eine Art nachträgliche „Oberflächen-Bearbeitung“ auf.

Wälzverschleiß von HIP-Si₃N₄ (NBD 200)

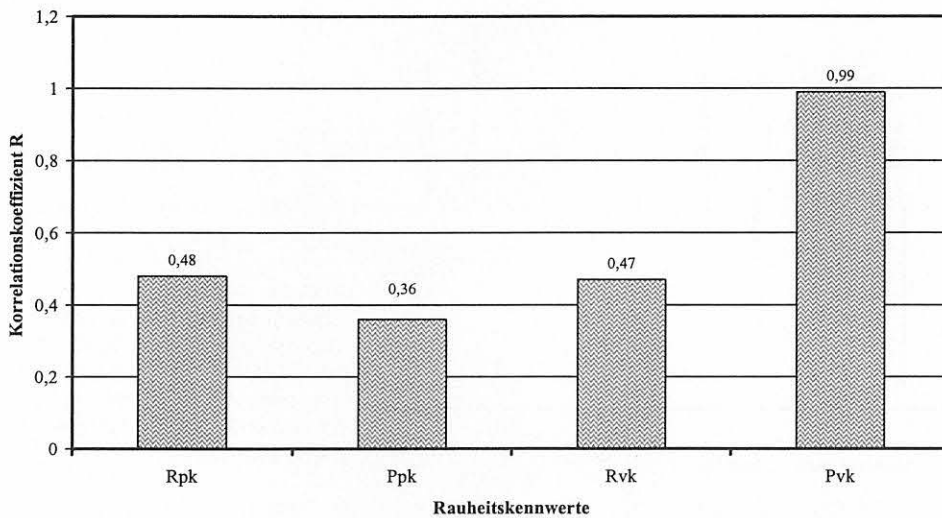


Abb. 28 Korrelation zwischen dem Verschleißkoeffizienten k_v und der gefiltert (R_{pk}) und ungefilterten (P_{pk}) reduzierten Spitzenhöhe sowie der gefilterten (R_{vk}) und ungefilterten (P_{vk}) reduzierten Riefentiefe

Wälzreibung mit Si₃N₄ in Paraffinöl
 $F_N=1005\text{N}$, $P_0=3\text{GPa}$, 386 Upm , 10% Schlupf, $n=2 \cdot 10^6$, $T=22^\circ\text{C}$

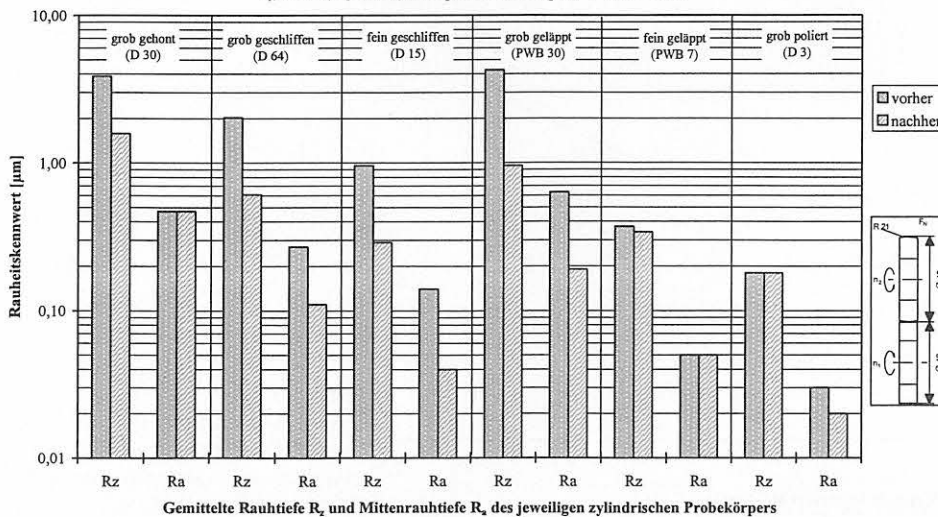


Abb.29 Rauheiten des jeweiligen zylindrischen Probekörpers vor und nach der tribologischen Wälzbeanspruchung des Werkstoffs HIP-Si₃N₄ in Paraffinöl

Im allgemeinen kann das günstige tribologische Einlaufverhalten von HIP-Si₃N₄ in Paraffinöl als kostenfreies „Bearbeitungsverfahren“ angesehen, genutzt und eingesetzt werden, wenn dies die Konstruktion des Bauteils zulässt.

7.1.1.4 Oberflächenanalytik

Für die Wälzbeanspruchung in Paraffinöl zeigt die REM-Aufnahme (s. Abb. 30) z. B. bei einer grob geläpften Probe deutlich, dass die Oberflächenrauheit in der Spur abnimmt.

Starke Vergrößerungen im REM zeigen jedoch auch, dass diese scheinbar glatten Oberflächen feine Risse in der Spur aufweisen (s. Abb. 31). Diese feinen Risse deuten darauf hin, dass es bei einer weiter fortgeführten tribologischen Belastung der Wälzpaarung über ein Risswachstum zu einer Schädigung der Funktionsfläche kommen könnte (vgl. Abb. 36). Ebenfalls kann dies bereits ein Hinweis auf das Wälzverschleißverhalten unter Wasser-Schmierung sein, was in Kapitel 7.1.2 besprochen wird.

Da die Glasphase in dem Werkstoff HIP-Si₃N₄ gering ist, sind chemische Änderungen des Werkstoffs in der Wälzverschleißspur nicht zu erwarten und auch nicht nachzuweisen.

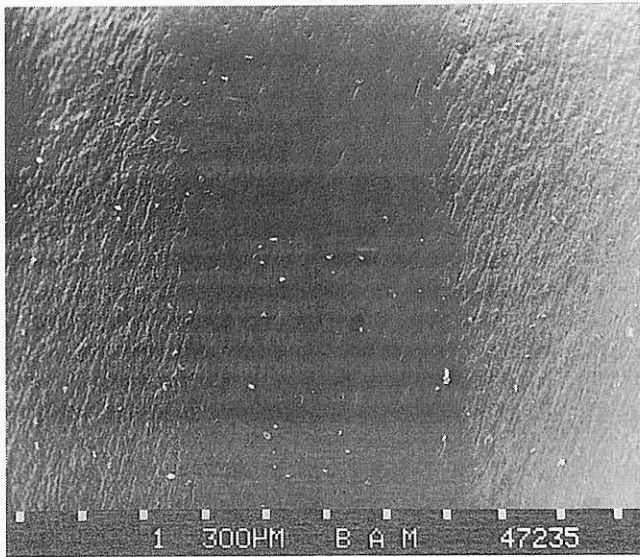


Abb. 30
HIP-Si₃N₄ grob geläpft nach der Wälzbeanspruchung in Paraffinöl

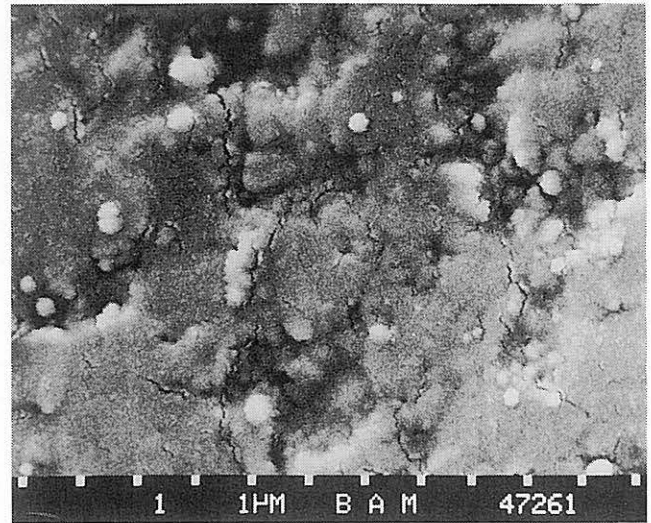


Abb. 31
Feine Risse durchziehen die Verschleißspur einer fein gehonten Proben nach der Wälzbeanspruchung in Paraffinöl.

7.1.2 Untersuchungen in Wasser

Der Werkstoff HIP-Si₃N₄ erweist sich unter der Wälzbeanspruchung in Wasser als relativ stabil, so dass eine Versuchsreihe durchgeführt werden kann. Die apparativen Einstellungen sind Kapitel 3.1 zu entnehmen.

7.1.2.1 Reibung

Die artgleichen HIP-Si₃N₄-Probekörper zeigen eine Abnahme der Reibungszahl im Verlaufe der Wälzbelastung. Je grober zu Beginn der tribologischen Belastung die anfängliche Rauheit der Funktionsflächen waren, desto stärker verminderte sich die Reibung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es während der tribologischen Belastung zu einer Art zusätzlichen „Bearbeitung“ des Werkstoffs in der Verschleißspur kommt. Die Verschleißspur ist nach der tribologischen Belastung immer glänzend und sieht auf den ersten Blick aus wie „poliert“. Aufgrund der Abnahme der Rauheit in der Spur und dem Abtrag der Rauheitsspitzen nimmt die anfängliche Pressung im Laufe des Versuchs (von einer Punkt- zu einer Linienberührung) ab, die Reibung zwischen den Wälzkörpern wird geringer. Bei dieser Versuchsreihe nimmt

$F_N=1005N, P_0=3GPa, 386 Upm, 10\% \text{ Schlupf}, v_{\text{glei}}=0,0085m/s, T=23^\circ C$

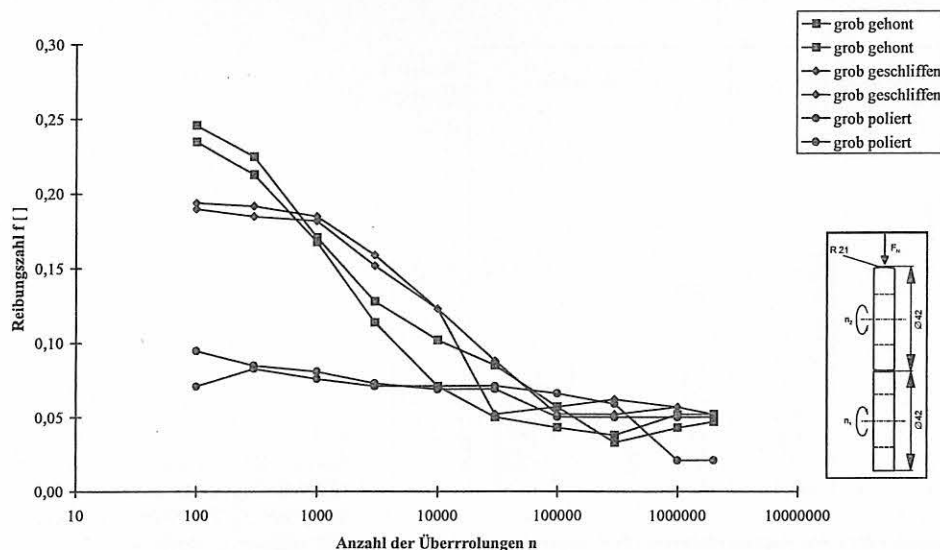


Abb. 32
Wälzreibung von HIP-Si₃N₄ in Wasser

die Reibungszahl bis zu einem Wert von $f = 0,05$ ab, was im gleichen Bereich liegt wie bei den tribologischen Versuchen mit Paraffinöl-Schmierung.

Bei den Versuchen mit Wasser-Schmierung sind die anfänglichen Reibungszahlen deutlich abhängig von der anfänglichen Oberflächenrauheit und somit vom angewendeten Endbearbeitungsverfahren. Die fein bearbeiteten Proben weisen einen geringeren Anfangswert auf, aber auch eine geringere Abnahme der Reibungszahl im Verlauf der Beanspruchung (vgl. Abb. 32).

7.1.2.2 Verschleiß

Der Verschleißkoeffizient des Werkstoffs HIP-Si₃N₄ in Wasser liegt ungefähr zwei Größenordnungen höher als unter Paraffinöl-Schmierung. Es ist eine Tendenz zu erkennen, die abhängig ist von der Endbearbeitung (vgl. Abb. 33). Je feiner die Funktionsflächen der Wälzkörper bearbeitet wurden, desto geringer ist der Verschleißbetrag.

Bei der Wälzreibung mit Wasserschmierung zeigen Reibung und Verschleiß ein gleich verlaufendes Verhalten. Für dieses gewählte Zwischenmedium ist eine gute und somit glatte

bearbeitete Funktionsfläche von Bedeutung, weshalb hier eine Bearbeitung nach dem Grundsatz „the-best-as-possible“ Bestand hat.

7.1.2.3 Oberflächenrauheiten

Werden die gemittelte Rauhtiefe R_z und die Mittenrauhtiefe R_a vor und nach der tribologischen Beanspruchung betrachtet, ist zu erkennen (vgl. Abb. 34), dass es durch den Wälzverschleiß zu einer Glättung der Funktionsfläche kommt.

Im Gegensatz zu der Wälzbeanspruchung in Paraffinöl nimmt die Oberflächenrauheit bei der Wälzbeanspruchung in Wasser auch bei den fein bearbeiteten Oberflächen, wie den polierten Funktionsflächen, ab. Somit kann kein Wert angegeben werden, für den die Oberflächenrauheitswerte nahezu konstant bleiben, wie dies für die Untersuchungen in Paraffinöl möglich ist.

Da die Oberflächenrauheit unter der tribologischen Belastung abnimmt, kann diese als „kostenfreie“, zusätzliche Bearbeitung der Funktionsfläche angesehen werden. Dies kann der Konstrukteur mit einplanen, wenn eine Zunahme des Spiels im Bauteil zulässig ist.

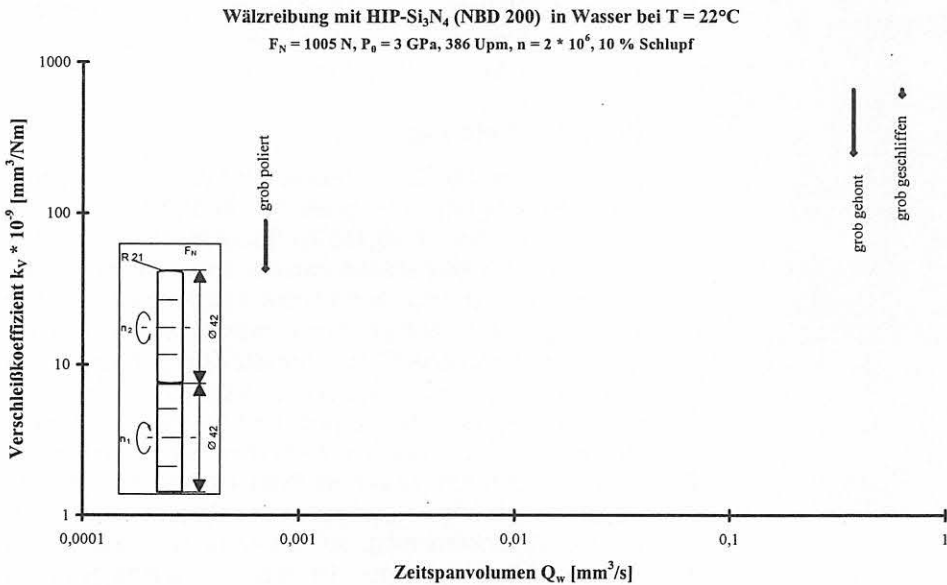


Abb. 33 Wälzreibung mit HIP-Si₃N₄ in Wasser; Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen der Endbearbeitung

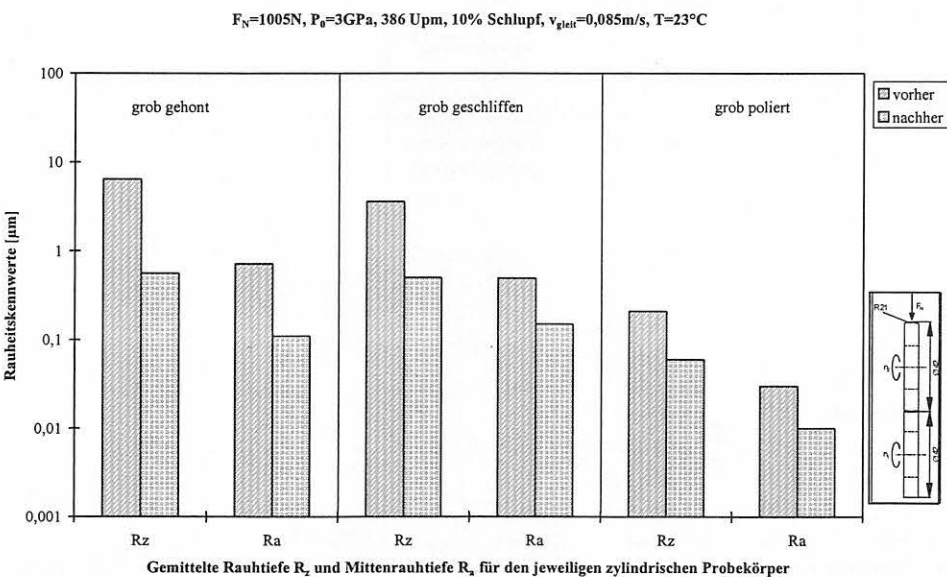


Abb. 34 Rauheitskennwerte vor und nach der tribologischen Beanspruchung von HIP-Si₃N₄ unter Wälzreibung bei Wasser-Schmierung

7.1.2.4 Oberflächenanalytik

Auch unter Wasser-Schmierung ändert sich chemisch nichts nachweisbar in der Verschleißspur durch die Wälzbelastung. Jedoch ist hier die Rissbildung weiter vorangeschritten als bei der Beanspruchung in Paraffinöl. Durch die Wälzbelastung sind in der Verschleißspur Rissnetzwerke entstanden, z. T. sind kleine Materialpartikel als der Werkstoffoberfläche ausgebrochen (vgl. Abb. 35). Bei einer weiteren tribologischen Belastung würde es zu Pitting und Materialversagen kommen.

In Abb. 35 sind deutlich die entstandenen Risse, aber auch die geglätteten Flächen in der Verschleißspur erkennbar. Auch nach 2 Millionen Überrollungen ist die Rissausbreitung noch relativ gering, so dass der Werkstoff HIP-Si₃N₄ in einem gewissen Rahmen auch mit Wasser als Zwischenmedium eingesetzt werden kann.



Abb. 35
REM-Aufnahme einer grob gehonten Probe nach der Wälzbelastung in Wasser

Zu Testbeginn wies diese grob gehonte Probenoberfläche Rauheitskennwerte von $R_z = 6,4 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,71 \mu\text{m}$ auf, nach der tribologischen Beanspruchung lagen die Werte bei $R_z = 0,56 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,11 \mu\text{m}$. Nach $n = 2 \cdot 10^6$ Überrollungen ergab sich ein Verschleißkoeffizient von $k_v = 3,27 \cdot 10^{-7} [\text{mm}^3/\text{Nm}]$. Im Querschliff (s. Abb. 36) ist deutlich das entstandene Rissnetz inner- und unterhalb der Tribospur zu erkennen. Dieses Rissnetzwerk würde bei einer weiteren Belastung zum Verschleißanstieg führen.

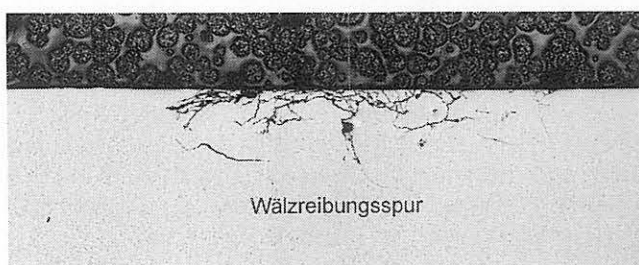


Abb. 36
Querschliff der Tribospur einer grob gehonten HIP-Si₃N₄-Probe nach $n = 2 \cdot 10^6$ Überrollungen unter Wasser-Schmierung

Die Akustomikroskopie kann das entstandene Rissnetzwerk auch in dem Materialvolumen nachweisen, ohne dass – wie beim Querschliff – der Wälzkörper zerteilt und präpariert werden muss. Die technische Vorgehensweise dieser Messmethode ist in Kapitel 5 beschrieben, worauf verwiesen wird. Aus der $V(z)$ -Kurve lässt sich die lokale Schallgeschwindigkeit ermitteln, die sich proportional zu auftretenden mechanischen Spannungen verändert.

Die im weiteren verwendeten Schallgeschwindigkeiten und Darstellungen der Geschwindigkeitsverteilung über der Tribospur sind durch Auswertung der $V(z)$ -Kurven an den entsprechenden Positionen entstanden. Die relative Messunsicherheit liegt bei 10^{-4} . Bei einem Bündeldurchmesser im 10^0 - μm -Bereich lassen sich bearbeitungsbedingte Spannungen über die Schwankungen der Schallgeschwindigkeit ortsbezogen im μm -Bereich quantitativ erfassen.

Bei der grob gehonten HIP-Si₃N₄-Probe ist in der lichtmikroskopischen Aufnahme (s. Abb. 37, Seite 30) ein tiefer Ausbruch sowie einige weitere Strukturen zu erkennen. Eine Verbindung zwischen diesen Strukturen ist lichtmikroskopisch nicht festzustellen. Die akustomikroskopische Aufnahme bei 1000 MHz (s. Abb. 38, Seite 30) zeigt in Konturen den Verlauf einiger oberflächlicher Risse. Bei 400 MHz (s. Abb. 39, Seite 30) ist der Verlauf des Risses in der Tiefe deutlich zu verfolgen. Der starke Helligkeitskontrast in diesem Gebiet könnte Ausdruck für die beim Wälzen aufgebauten mechanischen Spannungen und ihre örtliche Verteilung sein. Röntgenografische Messungen bestätigen diese Aussage, dass ein allgemeiner (großflächiger und über größere Tiefen integrierter) Anstieg der Druckspannung an der Oberfläche nach Wälzbelastung vorliegt.

Die semiquantitative Spannungsanalyse im Mikrobereich durch Auswertung der Schallgeschwindigkeiten mittels der Akustomikroskopie liefert im Vergleich zur Röntgenstreuung differenziertere Aussagen über die laterale Spannungsverteilung. In Abb. 40 (Seite 30) sind Meßpositionen gekennzeichnet. Erhöhte örtliche Schallgeschwindigkeiten (hier 6814 m/s) als Ausdruck von Druckspannungen treten nur an den Positionen 7 und 8 in Abb. 40 in unmittelbarer Nachbarschaft von Rissen auf, die bis an die Oberfläche reichen. In der hellen großflächigen Zone sind die Spannungen in der erfassten obersten Deckschicht durch den darunter liegenden lateralen Riss abgebaut und entsprechen denen im Umfeld (hier 6809 bis 6811 m/s). Die Messungen der Schallgeschwindigkeit wurden bei 1000 MHz durchgeführt, der erfaßte Tiefenbereich liegt bei ca. 2,5 bis 3 μm . Bei der Beobachtung mit 400 MHz (s. Abb. 39) dagegen wird ein Tiefenbereich bis 7,5 μm ausgewertet. Damit lässt sich der laterale Riss auf eine Tiefe um 3 μm lokalisieren, während die spannungsbehaftete Zone darunter erhalten bleibt.

Diese Untersuchungen zeigen, dass sich durch die Wälzbeanspruchung Spannungen im keramischen Material aufbauen, die sich durch die Bildung von Rissen wieder abbauen. Die Risse können bis ins Volumenmaterial verfolgt werden. Diese Rißausbreitung führt letztendlich zu Ausplatzungen von Material und damit zu Pitting und zum Materialversagen.

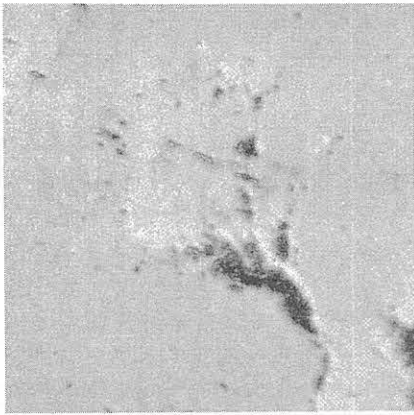


Abb. 37
Lichtmikroskopische Aufnahme des Rissgebietes

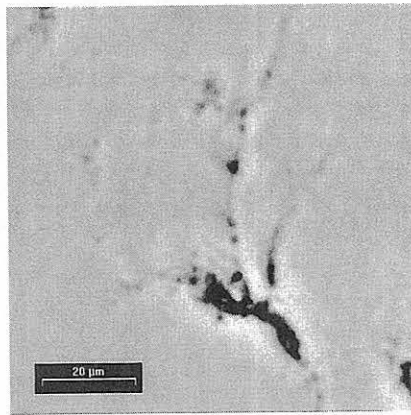


Abb. 38
Aufnahme bei 1000 MHz

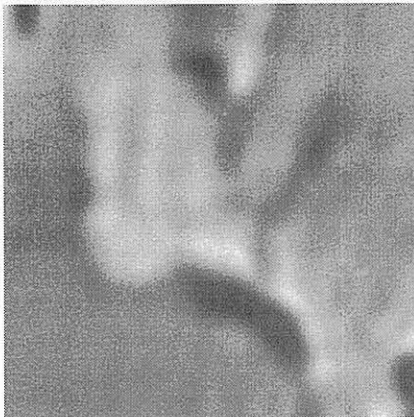


Abb. 39
Rissgebiet bei 400 MHz (Erkennbar die laterale Rissfläche)

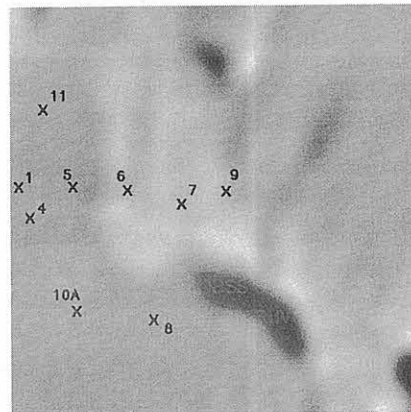


Abb. 40
Messpunkte zur Spannungsanalyse über die Schallgeschwindigkeit

7.1.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff HIP-Si₃N₄

Der Werkstoff HIP-Si₃N₄ (NBD 200) ist geeignet für die Wälzbeanspruchung sowohl mit dem Zwischenmedium Paraffinöl als auch eingeschränkt mit Wasser. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass es bei einer Schmierung mit Wasser früher zu Materialversagen kommt und somit die Bauteile im praktischen Einsatz früher ausgetauscht werden müssten.

Die Verschleißbeträge von HIP-Si₃N₄ bei der Schmierung mit Paraffinöl liegen im Bereich von 10⁻⁹ [mm³/Nm], bei einer Schmierung mit Wasser sind die Verschleißbeträge um zwei Größenordnungen höher im Bereich von 10⁻⁷ [mm³/Nm].

Für HIP-Si₃N₄ in Paraffinöl-Schmierung konnte eine gute Korrelation R des Verschleißkoeffizienten k_v mit der ungefilterten reduzierten Riefentiefe P_{vk} festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass für keramische Werkstoffe evtl. neue bzw. veränderte Rauheitskennwerte bestimmt und durch eine Normung festgelegt werden müssten.

Für grob bearbeitete Funktionsflächen kommt es bei Werten von $R_z \geq 0,5 \mu\text{m}$ und $R_a \geq 0,2 \mu\text{m}$ zu einer Glättung der Oberfläche durch den Einlauf bei Wälzbeanspruchung unter Paraffinöl, die als kostenfreies „Bearbeitungsverfahren“ genutzt werden kann, sofern eine gewisse Spielzunahme durch den Einlaufverschleiß akzeptabel ist.

Bei Überrollungszahlen von $n = 2 \cdot 10^6$ zeigen sich mit Paraffinöl als Zwischenmedium feine Risse in der Oberfläche des Werkstoffs. Wird Wasser als Zwischenstoff verwendet, bauen sich die durch Wälzbelastung eingebrachten Spannungen in Form von einem Rissnetzwerk ab. Mit der Aku-

stomikroskopie ist das entstandene Reißnetzwerk zerstörungsfrei im Werkstoffvolumen nachweisbar. Daraus lässt sich vorhersagen, dass es bei einer weiteren tribologischen Belastung des Bauteils zu einem schollenförmigen Ausplatzen des Materials kommen würde und somit zum Versagen des Bauteils.

Das Verschleißverhalten von HIP-Si₃N₄ ist abhängig von der Endbearbeitung der Funktionsfläche. Zwar ergeben die am besten bearbeiteten Flächen (poliert) die niedrigsten Verschleißbeträge, jedoch zeigen gröber bearbeitete Flächen (z. B. fein gehont) nur geringfügig höhere Verschleißbeträge. Durch dieses Verschleißverhalten können auch weniger fein bearbeitete Funktionsflächen eingesetzt werden. Dies würde bei der Bauteilherstellung die Kosten für die Endbearbeitung erheblich reduzieren.

7.2 GPS-Si₃N₄-TiN (EDM)

Die vollständigen Untersuchungsergebnisse mit dem Werkstoff GPS-Si₃N₄-TiN sind im Anhang zu finden. Dieser Verbundwerkstoff wurde für die Wälzverschleißuntersuchungen gewählt, da es sich um einen erodierbaren Werkstoff handelt. Diese Werkstoffgruppe erlaubt eine Bearbeitung von Halbzeugen mit komplexer Oberflächengeometrie. Die Beschreibung des Werkstoffs ist in Kapitel 2.2 und die apparativen Einstellungen sind in Kapitel 3.1 zu finden.

7.2.1 Untersuchungen in Paraffinöl

Der erodierbare Werkstoff GPS-Si₃N₄-TiN ließ für die Wälzreibung in Paraffinöl ein umfassendes Untersuchungsprogramm zu (s. Anhang).

7.2.1.1 Reibung

Bei dem Werkstoff GPS-Si₃N₄-TiN ist für die Reibungszahl die Bearbeitung der Funktionsfläche von untergeordneter Bedeutung, wenn Paraffinöl als Zwischenmedium eingesetzt wird (s. Abb. 41).

Die Reibungszahl ändert sich über die Testdauer nur unerheblich und sie liegt im Bereich von 0,11 bis 0,08 für alle untersuchten Oberflächen. Die Streuung zwischen den einzelnen Reibungszahlwerten ist auch für alle Bearbeitungsarten und über die gesamte Testdauer gering.

7.2.1.2 Verschleiß

Der Verschleißbetrag für die GPS-Si₃N₄-TiN Probekörper liegt im unteren 10⁻⁹ [mm³/Nm]-Bereich, zwischen 0,1 und 10 * 10⁻⁹ [mm³/Nm]. Die gröberen Endbearbeitungsverfahren, wie z. B. Grobhonen oder Läppen, weisen die höheren Verschleißbeträge auf (s. Abb. 42). Die feineren Bearbeitungsverfahren können immer gewählt werden, wenn niedrige Verschleißbeträge gefordert sind. Auch die geschliffenen

Probekörper zeigen einen Verschleißbetrag, der im gleichen Bereich liegt, wie z. B. beim Feinläppen oder Feinhonen.

Die Versuchsergebnisse mit GPS-Si₃N₄-TiN in Paraffinöl zeigen, dass auch Bearbeitungsverfahren für die Endbearbeitung von Bauteilen gewählt werden können, die ein größeres Zeitspanvolumen aufweisen als z. B. das Polieren. Zwar weisen die polierten Wälzkörper die kleinsten Verschleißbeträge auf, jedoch sind die Verschleißbeträge hier noch in einer ähnlichen Größenordnung. Somit können hier ebenfalls – ähnlich wie bei dem Werkstoff HIP-Si₃N₄ – gröbere Endbearbeitungsverfahren eingesetzt werden.

7.2.1.3 Oberflächenrauheiten

Für die Wälzreibung in Paraffinöl zeigt der Werkstoff GPS-Si₃N₄-TiN eine ähnliche Abhängigkeit wie schon beim Werkstoff HIP-Si₃N₄ besprochen. Die Abnahme der Oberflächenrauheiten ist für grob bearbeitete Funktionsflächen zu verzeichnen. Werden mittels der Endbearbeitung der Funktionsflächen Oberflächenrauheiten von R_z ≤ 0,2 µm und

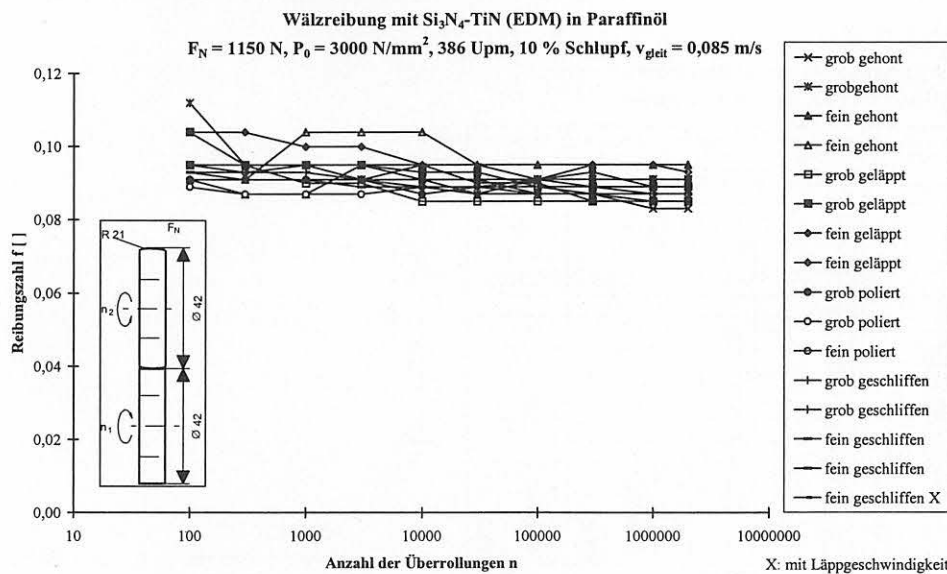


Abb. 41 Wälzreibung mit GPS-Si₃N₄-TiN in Paraffinöl; Reibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen

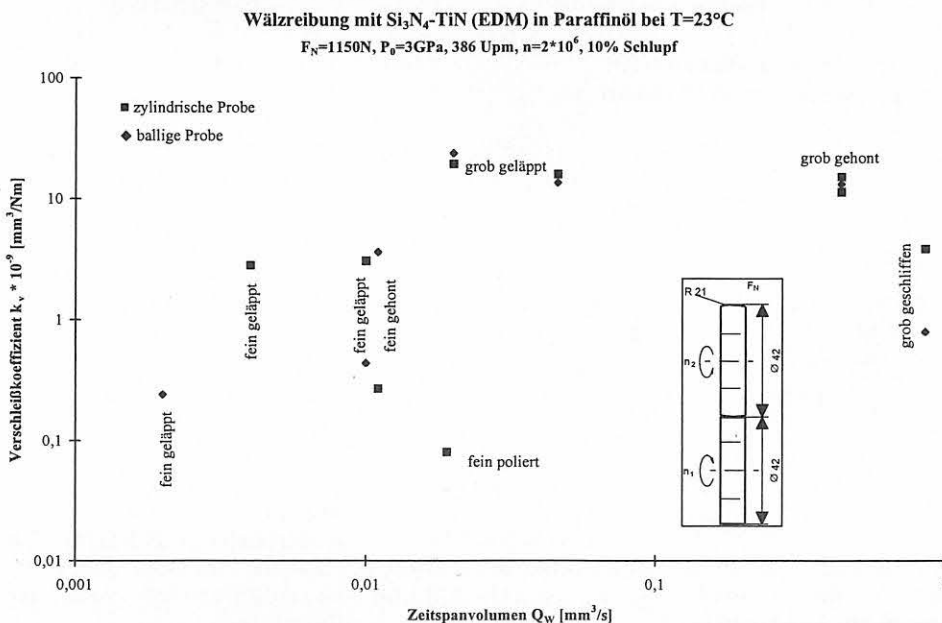


Abb. 42 Wälzreibung mit GPS-Si₃N₄-TiN in Paraffinöl; Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen bei der Bearbeitung

$R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ erreicht, ändert sich die Oberflächenrauheit der Funktionsfläche durch die tribologische Belastung nicht mehr oder nur noch unwesentlich (s. Abb. 43).

Ist eine Spielzunahme des Bauteils zulässig, so kann auch hier das Einlaufverhalten des Werkstoffs als „kostenfreies“ Bearbeitungsverfahren genutzt werden und somit auf ein aufwendiges und kostenintensives Endbearbeitungsverfahren wie z. B. feines Polieren verzichtet werden.

Der Verschleißbetrag zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe R_{vk} (vgl. Abb. 44). Je größer der Betrag der reduzierten Riefentiefe, d. h. auch, je größer das Bearbeitungsverfahren ist, desto höher ist auch der Verschleißbetrag. Hier ist eine direkte Abhängigkeit zwischen Verschleiß und Oberflächenrauheit erkennbar.

Aus dem Verhalten bzgl. der Oberflächenrauhigkeiten des Werkstoffs GPS- Si_3N_4 -TiN lässt sich ableiten, dass je nach gewünschtem Anwendungsgebiet der Werkstoff so bearbeitet werden kann, dass Oberflächenrauheit, Verschleißbetrag und Einlaufverhalten optimal aufeinander abgestimmt werden können. Kann es zu einer Spielzunahme durch das Einlaufen kommen und soll der Verschleißbetrag im unteren

10^{-9} [mm^3/N]-Bereich liegen, so sind Endbearbeitungsverfahren wie Feinhonen oder Feinlappen ausreichend.

7.2.1.4 Oberflächenanalytik

Die tribologisch belasteten Oberflächen zeigen in der REM-Aufnahme deutlich die Zweiphasigkeit des Werkstoffs und die Glättung in der Tribospur. Mittels EDX lassen sich die erhöht erscheinenden Anteile der Oberfläche als TiN-Phase identifizieren (vgl. Abb. 45).

Dieser erhöhte Anteil der Funktionsfläche kann durch einen Übertrag der TiN-Phase durch die Wälzbelastung hervorgerufen worden sein. Eine topographische Erhöhung der Funktionsfläche bestätigen auch Untersuchungen im AFM. Obwohl der Traganteil der Funktionsfläche vor allem aus der reinen TiN-Phase besteht, zeigt der Werkstoff ein gutes Verschleißverhalten unter der Wälzbelastung.

7.2.2 Untersuchungen in Wasser

Der Werkstoff Si_3N_4 -TiN zeigt unter Wälzreibung mit Wasser als Zwischenmedium ein schlechtes Verschleißverhalten, da Wasser TiN über Titanhydroxid auflöst. Dadurch kommt es

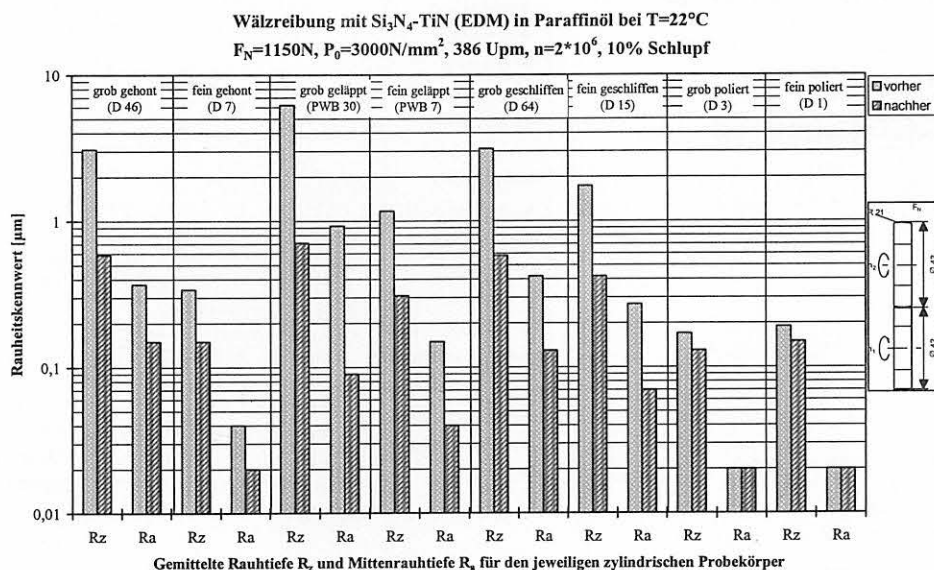


Abb. 43
Rauheitskennwerte für den Werkstoff GPS- Si_3N_4 -TiN vor und nach der Wälzbeanspruchung

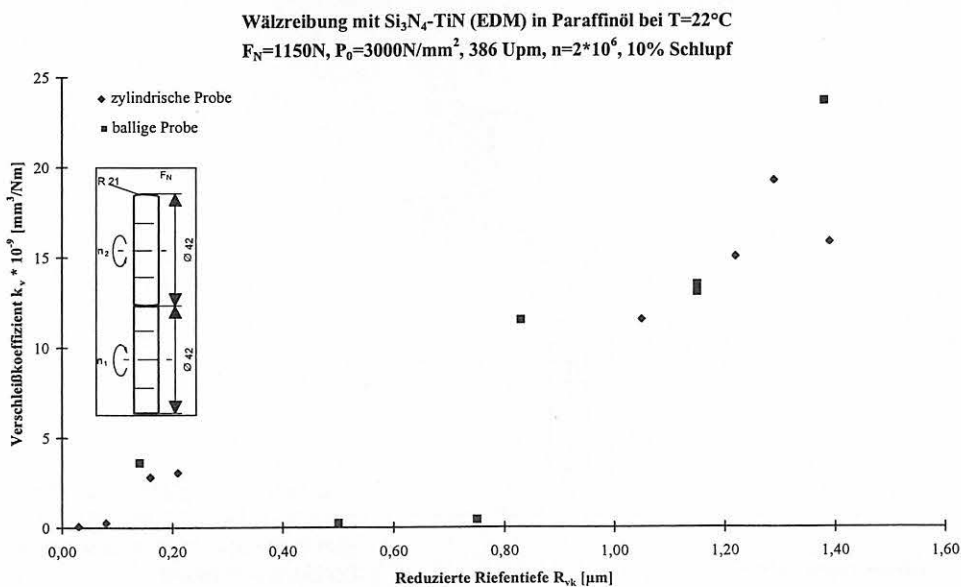


Abb. 44
Wälzreibung von GPS- Si_3N_4 -TiN in Paraffinöl; Verschleißbetrag in Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe R_{vk}

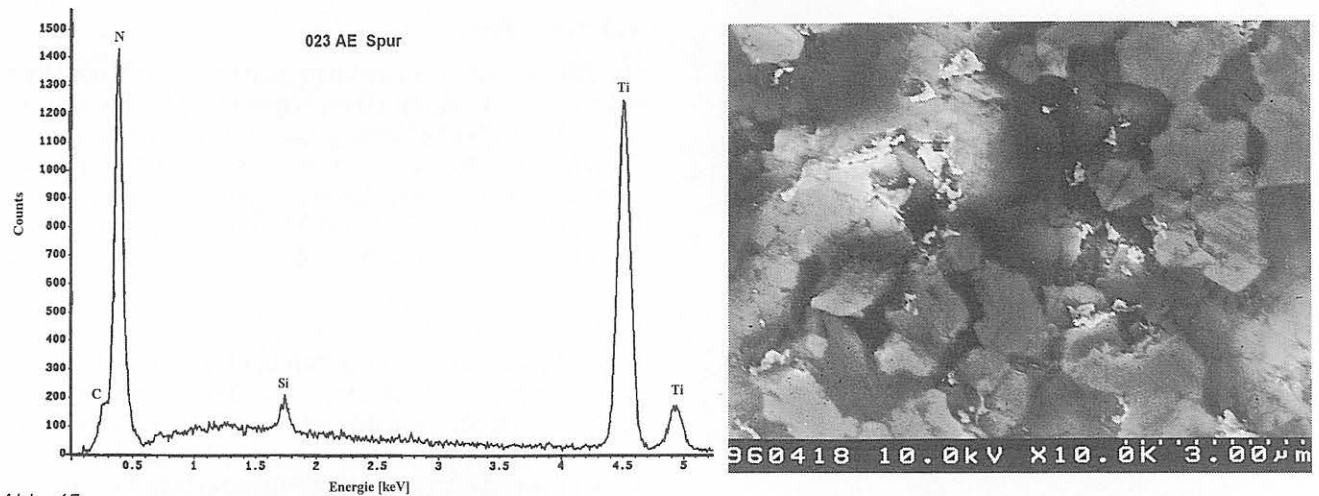


Abb. 45
EDX-Spektrum (links) des erhöhten Anteils der Oberfläche (s. Abb. rechts) in der Verschleißspur einer grob polierten GPS- Si_3N_4 -TiN-
Probe nach dem Wälzverschleiß in Paraffinöl

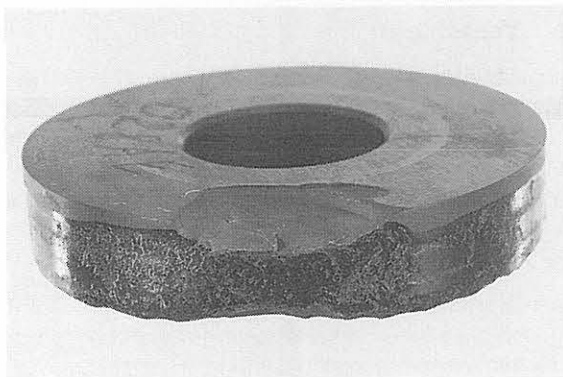


Abb. 46
Lichtmikroskopische Aufnahme einer grob geläppten Si_3N_4 -TiN-
Probe nach dem Wälzverschleiß unter Wasserschmierung nach
einer Überrollungszahl von $n \approx 1 \cdot 10^6$

zu Pitting, großflächigen Ausbrüchen und Materialversagen der Probe durch Bruch (vgl. Abb. 46). Somit eignet sich der Werkstoff Si_3N_4 -TiN nicht für Schmierung mit wässrigen Medien, unabhängig von der Endbearbeitung. Aus diesem Grund wurde diese Versuchsreihe nicht weiter fortgesetzt (s. Anhang).

Das Auflösen der TiN-Phase lässt sich auch mittels EDX nachweisen. Die Untersuchungen in der Wälzspur ergaben, dass sich der Siliziumnitrid-Anteil erhöht gegenüber der unbelasteten Probe, hingegen sinkt der TiN-Anteil (vgl. Abb. 47).

Aufgrund der Untersuchungen lässt sich feststellen, dass der Werkstoff GPS- Si_3N_4 -TiN ungeeignet für die Wälzreibung unter Wasser-Schmierung ist.

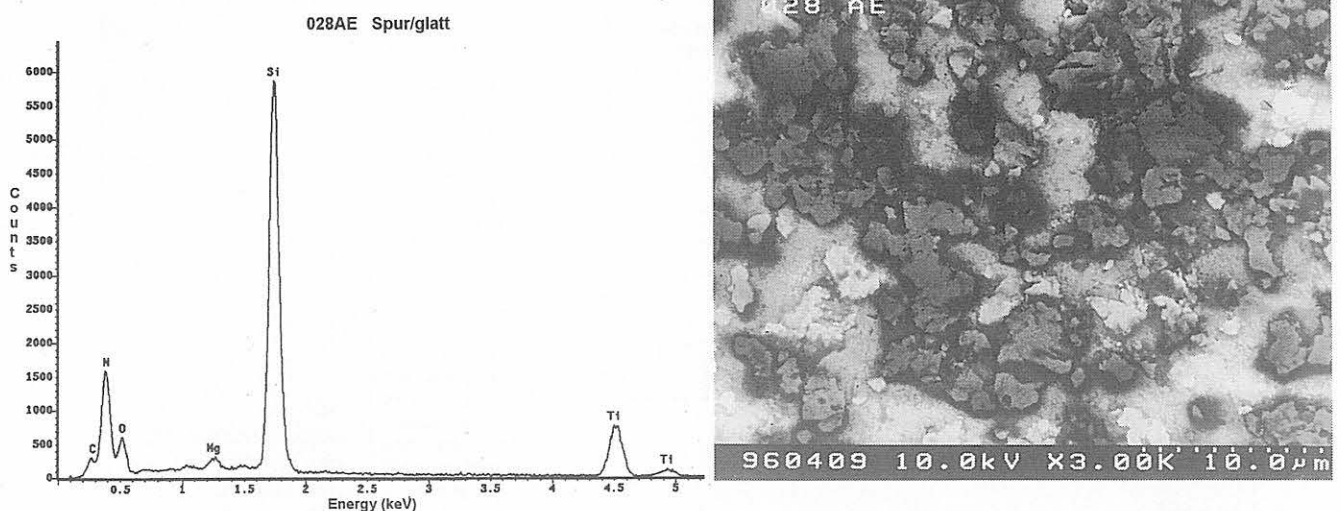


Abb. 47
EDX-Spektrum (links) in der Tribospur einer grob geläppten GPS- Si_3N_4 -TiN-Probe nach der Wälzbelastung in Wasser, REM-Aufnahme
rechts

7.2.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff GPS-Si₃N₄-TiN

Für den Wälzverschleiß mit Paraffinöl als Zwischenmedium zeigt sich der Werkstoff GPS-Si₃N₄-TiN als geeignet. Die Verschleißbeträge liegen im unteren 10⁻⁹ [mm³/Nm]-Bereich. Die Reibungszahl ändert sich über die Testdauer nur unerheblich.

Werden mittels der Endbearbeitung der Funktionsflächen Oberflächenrauheiten von R_z ≤ 0,2 µm und R_a ≤ 0,02 µm erreicht, ändert sich die Oberflächenrauheit der Funktionsfläche durch die tribologische Belastung nicht mehr oder nur noch unwesentlich. Das Einlaufverhalten kann als „kostenfreies“, zusätzliches Bearbeitungsverfahren genutzt werden.

Gute Ergebnisse werden auch für Endbearbeitungsverfahren wie Feinlappen oder Feinhonen erreicht. Somit kann auf eine kosten- und zeitintensive Bearbeitung der Funktionsfläche, z. B. mittels Feinpolieren, verzichtet werden.

Der Werkstoff Si₃N₄-TiN eignet sich nicht für Schmierung mit wässrigen Medien, unabhängig von der Endbearbeitung, da Wasser TiN über Titanhydroxid auflöst. Dieses Verhalten führt zu Pitting, großflächigen Ausbrüchen und Materialversagen der Probe durch Bruch.

7.3 SSiC (EKasic D)

Der für Gleitlager gut am Markt eingeführte Werkstoff SSiC (EKasic D) wurde unter Wälzbeanspruchung getestet. Zuerst wurden die gleichen Testbedingungen angewendet wie für HIP-Si₃N₄ in Wälzlagern.

7.3.1 Untersuchungen in Paraffinöl

Die Untersuchungen in Paraffinöl ergaben, dass eine anfängliche Belastung des Werkstoffs SSiC mit einer Hertzschen Flächenpressung von P₀ = 3 GPa zu hoch ist, deshalb wurde die Hertzsche Flächenpressung auf den halben Wert P₀ = 1,5 GPa herabgesetzt, was zu einer Normalkraft von F_N = 250 N führte (hierzu s. auch Kap. 3.4).

7.3.1.1 Reibung

Der Wert der Reibungszahl nimmt mit der Anzahl der Überrollungen ab. Fast alle Werte liegen in einem Bereich von 0,15 ≥ f ≥ 0,07. Eine grob geläppte Wälzpaarung und mit Polieren endbearbeitete Probekörper wiesen einen deutlich höheren Reibwert auf, der zu Beginn der tribologischen Belastung zwischen 0,17 und 0,23 liegt und auf Werte zwischen 0,17 und 0,14 während der Beanspruchung absinkt.

Die Reibwerte für die Probenpaarungen, die mit einer Hertzschen Pressung von P₀ = 1,5 GPa untersucht wurden, liegen in dem Bereich zwischen 0,15 und 0,09. Dies entspricht dem größten Teil der bei P₀ = 3 GPa erreichten Werte. Dieses Verhalten legt die Vermutung nahe, dass der Reibwert eher über das Einlaufverhalten des Werkstoffs bestimmt wird als über die angewendete Pressung bzw. Normalkraft.

Für den Werkstoff SSiC lässt sich kein Zusammenhang zwischen Reibwert und Oberflächenendbearbeitung ableiten.

7.3.1.2 Verschleiß

Der Verschleißbetrag des Werkstoffs SSiC zeigt ein Verhalten, was umgekehrt proportional ist zu dem, welches für die Werkstoffe Si₃N₄-TiN und Si₃N₄ beobachtet wurde. Der Verschleißbetrag steigt an mit der Feinheit des Endbearbeitungsverfahrens, wenn die anfängliche Hertzsche Pressung wie bei den übrigen untersuchten Werkstoffen P₀ = 3 GPa beträgt.

Bei einer anfänglichen Hertzschen Pressung von P₀ = 3 GPa erweisen sich die feinen Endbearbeitungsverfahren als ungünstig für die Wälzverschleißbelastung. Hier zeigen Verfahren wie Feinhonen oder Feinschleifen ein wesentlich besseres Verschleißverhalten (vgl. Abb. 49). Bei den feineren Verfahren wie Polieren und Feinlappen entstehen in der Verschleißspur konische Risse, wodurch es bei einer weiter fortgeführten Wälzbelastung zu Pitting kommt.

Aufgrund dieses Verschleißverhaltens des Werkstoffs SSiC wurde die anfängliche Hertzsche Pressung halbiert und auf P₀ = 1,5 GPa gesetzt, was nach Gleichung II (s. Kapitel 3.4) eine Normalkraft von F_N = 250 N ergab.

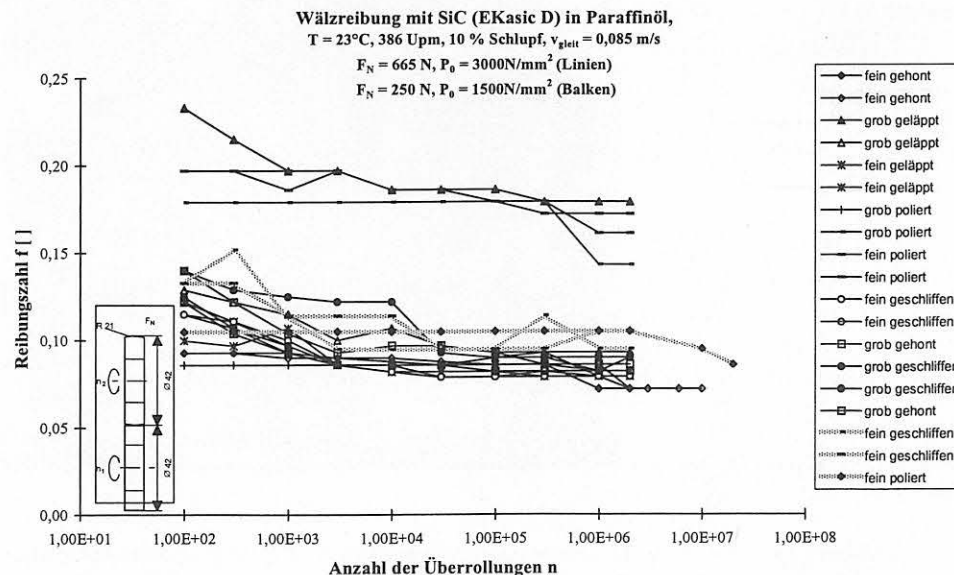


Abb. 48
 Reibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen für den Werkstoff SSiC unter Wälzreibung in Paraffinöl

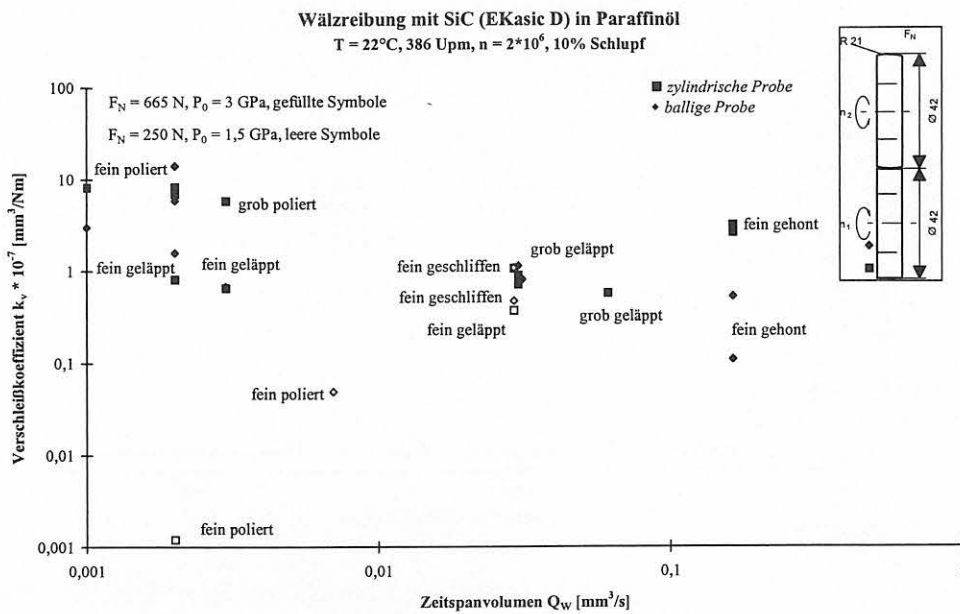


Abb. 49
 Wälzreibung von SSiC in Paraffinöl;
 Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen bei der Endbearbeitung der Funktionsflächen

Bei 1,5 GPa erweist sich der Werkstoff SSiC als „überrollfest“ unter der Wälzbeanspruchung. Die feingeschliffenen Probekörper weisen einen geringen Verschleißbetrag auf, der im Bereich von 37 bis 110*10⁻⁹ mm³/Nm liegt. Die polierten Funktionsflächen zeigen Verschleißbeträge von 0,12 bis 5*10⁻⁹ mm³/Nm, wenn die Anzahl der Überrollungen n = 30*10⁶ beträgt, nach n = 2*10⁶ Zyklen ist kein Verschleißbetrag bestimmbar, da er zu gering ist, um mit der profilometrischen Methode nachgewiesen zu werden (vgl. hierzu auch den Anhang).

Als Fazit für das Verschleißverhalten des Werkstoffs SSiC unter Wälzreibung in Paraffinöl lässt sich festhalten, dass bei einer anfänglichen Hertzschen Pressung von P₀ = 3 GPa der Werkstoff nur mit größeren Bearbeitungsverfahren wie Feinhonen oder Feinschleifen für die Wälzbelastung geeignet ist. Bei einer niedrigeren anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von P₀ = 1,5 GPa ist der Werkstoff generell für den Wälzverschleiß geeignet, hier empfiehlt es sich jedoch, die feinen Endbearbeitungsverfahren wie Polieren zu wählen, um ein mit Si₃N₄ vergleichbar gutes Verschleißverhalten im Bereich < 10⁻¹⁰ mm³/Nm zu erreichen.

7.3.1.3 Oberflächenrauheiten

Was für den Verschleißbetrag ermittelt wurde, zeigt sich durch die Untersuchungen der Oberflächenrauheiten bestätigt.

Wie in Abb. 50 zu sehen ist, steigen die Werte für die gemittelte Rauhtiefe und die Mittenrauhtiefe für die polierte Oberfläche nach der tribologischen Beanspruchung an. Dieses Verhalten in der Tribospur lässt auch einen höheren Verschleißbetrag erwarten.

An der reduzierten Reifentiefe R_{vk} ist deutlich zu erkennen (vgl. Abb. 51), dass, je kleiner dieser Oberflächenrauheitenkennwert wird, desto höher wird der Verschleißbetrag. Dies lässt die Aussage zu, dass sich für den Werkstoff SSiC bei einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von P₀ = 3 GPa eine geringe Oberflächenrauheit ungünstig für das Verschleißverhalten auswirkt. Es sollten mittels der Endbearbeitung keine Oberflächenrauheiten von R_{vk} ≤ 0,3 µm erzeugt werden, wenn das Bauteil aus SSiC für den Wälzverschleiß eingesetzt werden soll.

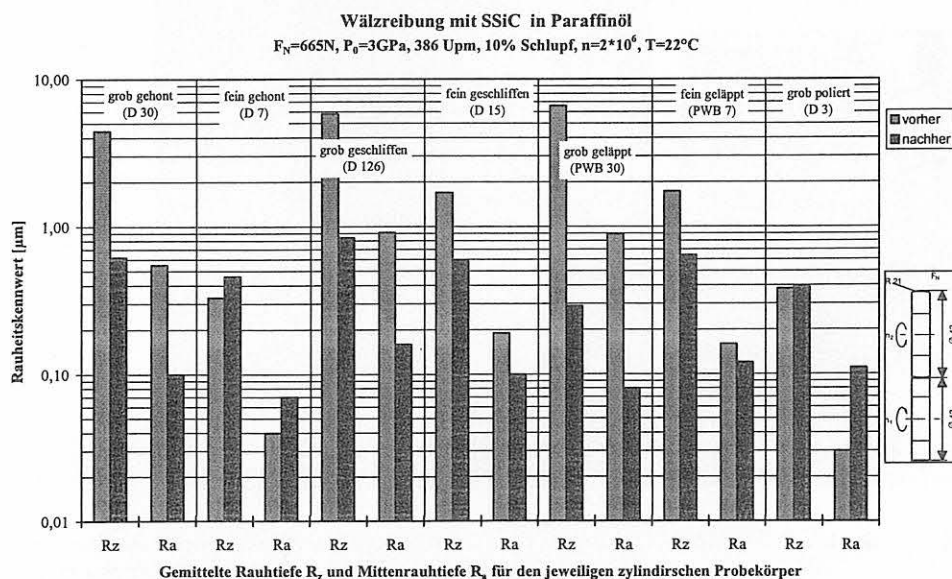


Abb. 50
 Rauheitskennwerte vor und nach der tribologischen Untersuchung für den Werkstoff SSiC in Paraffinöl

Wälzreibung mit SSiC (EKasic D) in Paraffinöl
 $F_N = 665 \text{ N}$, $P_0 = 3 \text{ GPa}$, 386 Upm , $n = 2 \cdot 10^6$, 10% Schlupf

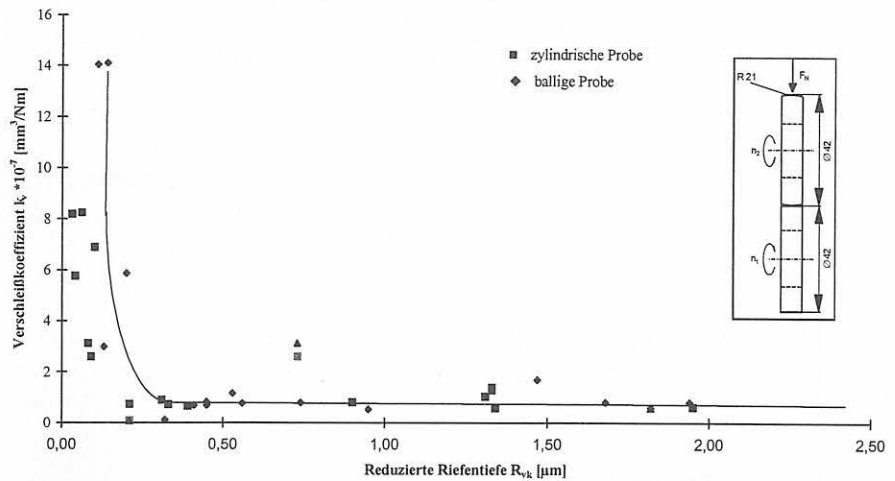


Abb. 51
 Verschleißkoeffizient k_v in Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe R_{vk} bei der Wälzbelastung des Werkstoffs SSiC in Paraffinöl

7.3.1.4 Oberflächenanalytik

Die Rissbildung des Werkstoffs lässt sich bereits mit dem Lichtmikroskop beobachten, weshalb auf empfindlichere Verfahren wie REM verzichtet werden konnte.

Deutlich ist in den lichtmikroskopischen Aufnahmen (s. Abb. 52) zu erkennen, dass die tribologisch belastete Wälzverschleißspur der grob gehonten Funktionsfläche keine Schädigung

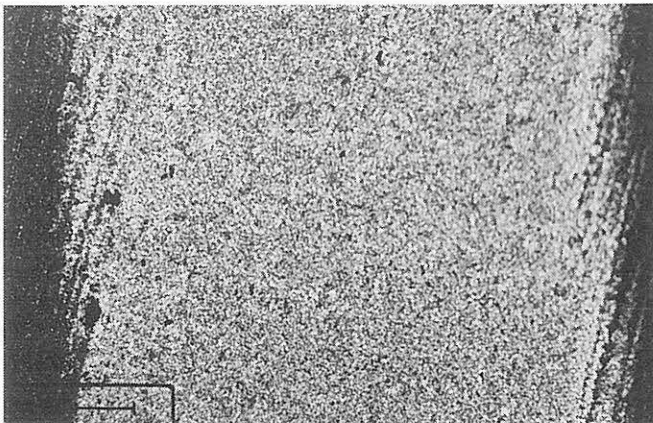


Abb. 52
 Lichtmikroskopische Aufnahme einer grob gehonten SSiC-Probe nach der Wälzbelastung in Paraffinöl

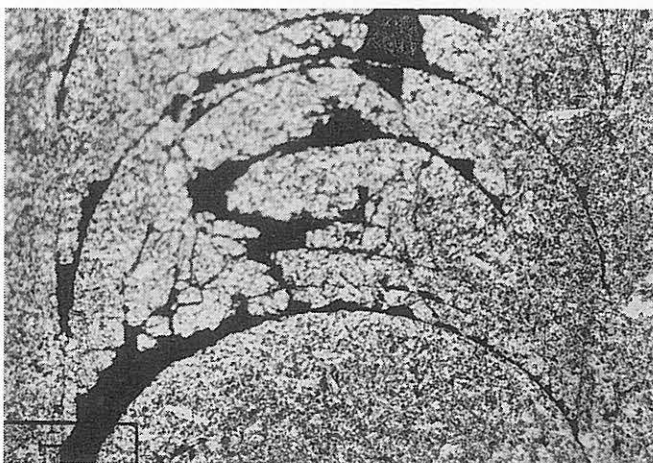


Abb. 53
 Lichtmikroskopische Aufnahme einer grob polierten SiC-Probe nach dem Wälzverschleiß in Paraffinöl

gen durch Rissbildung aufweist. Zum Teil sind hier noch die Riefen, die durch die Bearbeitung entstanden sind, sichtbar.

Im Gegensatz zur grob gehonten Oberfläche zeigt die grob polierte Funktionsfläche eine konische Rissbildung in „klassischer Form“ mit Ausplatzungen (s. Abb. 53). Dieser optische Beweis verdeutlicht das schlechte Verschleißverhalten der fein bearbeiteten SSiC-Probekörper und den Anstieg der Oberflächenrauheit während der Wälzbelastung.

Mittels der Akustomikroskopie sind Informationen aus dem Volumen des Werkstoffs unterhalb der Oberfläche erhältlich. Die Weiterentwicklung des mikroakustischen Messprinzips wurde auf die Belange der Charakterisierung von Wälzverschleiß-Probekörpern angewandt. Es lassen sich auch in großen Flächen Mikrofehler detektieren. Durch Integration einer Drehachse in den Messaufbau ist die Messung zylindrischer Oberflächen für Wälzbelastung möglich geworden, wobei die zu vermessende Funktionsfläche unter der Messlinse weggedreht wird.

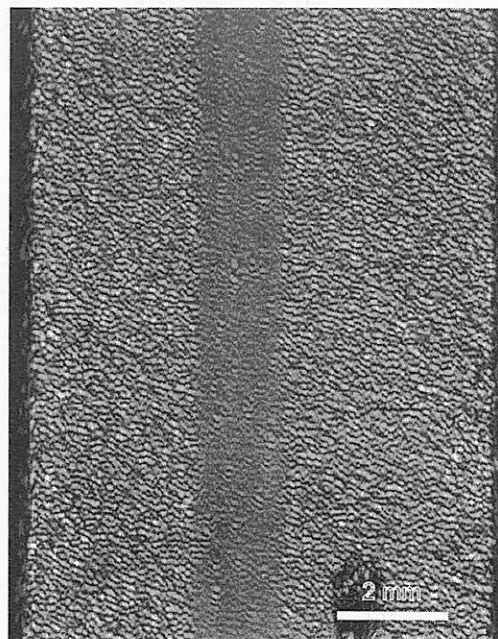


Abb. 54
 Streusignal bei $f = 5 \text{ mm}$, Ultraschallmikroskopie an einer grob geläppten SiC-Probefläche nach der Wälzbeanspruchung

In *Abb. 54* wird der Einfluss der Oberflächenrauigkeit bei einer grob geläpften Probe nicht ausgeschaltet. Diese Untersuchungen wurde mit einer kurzbreitigen ($f = 5 \text{ mm}$) Linse durchgeführt. Es sind deutlich die Bearbeitungsspuren durch das Lappen der Funktionsfläche sowie die Verschleißspur nach der Wälzbeanspruchung sichtbar. Die Wälzbelastung führt zu einer Glättung der Verschleißspur. Dadurch ist in der Verschleißspur das Untergrundsignal vermindert und es verbleibt eine materialbedingte Defektdichte von $1,7 \text{ cm}^{-2}$. Um einen größeren Bereich detektieren zu können, wurde der zylindrischen Außenmantel unter der Linse abgerollt.

Die *Abbildungen 55* und *56* zeigen akustomikroskopische Aufnahmen einer polierten Oberfläche nach der Wälzbelastung, es handelt sich um die gleiche Probe wie in *Abb. 53*.

Die Störungen in *Abb. 55* sind auch im lichtmikroskopischen Bild (s. *Abb. 53*) als Risse und Ausbrüche zu beobachten. Im Gegensatz zur Lichtmikroskopie sind bei der Ultraschalluntersuchung neben der Tribospur bereits gestörte Gebiete sichtbar. Diese Störungen weisen daraufhin, dass es auch hier bei einer weiteren tribologischen Belastung zur Rissbildung und zu Pitting kommen würde.

Die in *Abb. 56* enthaltenen horizontalen und vertikalen Rissstrukturen in der Wälzspur sind lichtmikroskopisch nicht nachweisbar. Der abgebildete Bereich weist lichtmikroskopisch noch kein Pitting auf. Die mit der Ultraschallmikroskopie bereits abbildbaren Störungen der Funktionsfläche zeigen auch deutlich die Stärken des Verfahrens.

Die Untersuchungen mit der Akustomikroskopie zeigen nochmals deutlich, dass die grober bearbeitete Funktionsfläche (grob geläpft) weniger Defekte in der Verschleißspur aufweist. Die polierte Wälzprobe zeigt deutliche Streusignale nach der Wälzbelastung. Selbst die beginnende Materialermüdung kann mit der Akustomikroskopie nachgewiesen werden.

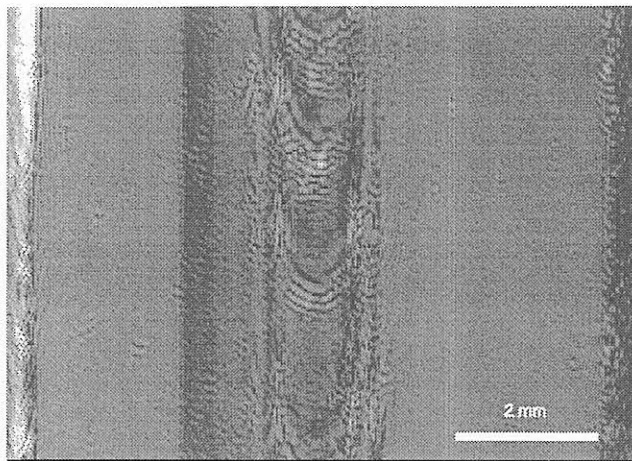


Abb. 55
Stark gestörter Bereich einer polierten SiC-Wälzprobe nach den tribologischen Wälzverschleißuntersuchungen, Ultraschallmikroskopie, 40 MHz

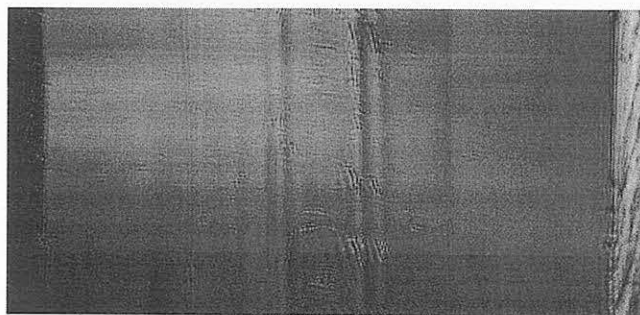


Abb. 56
Bereiche beginnender Materialermüdung an einer polierten SiC-Wälzprobe nach den tribologischen Untersuchungen, Ultraschallmikroskopie, 40 MHz

Versuchsreihe nach einigen wenigen Versuchen abgebrochen wurde.

7.3.2 Untersuchungen in Wasser

Nach den Untersuchungen in Paraffinöl waren ebenfalls schlechte Ergebnisse für die Untersuchungen in Wasser zu erwarten, was sich auch bestätigte und weshalb diese

7.3.2.1 Reibung

Die Untersuchungen wurden an fein gehonten Proben durchgeführt, die in Paraffinöl einen akzeptablen Verschleißbetrag aufwiesen.

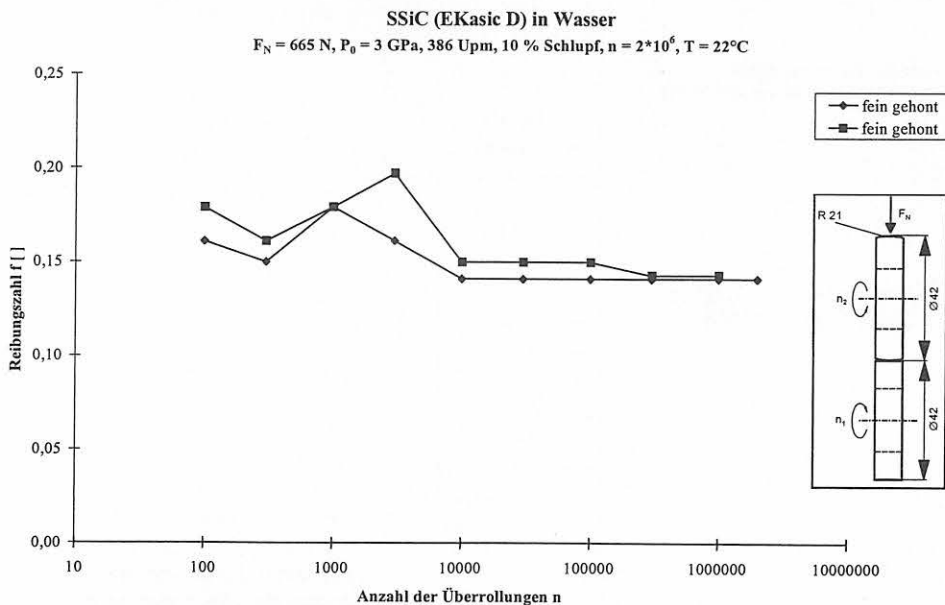


Abb. 57
Reibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen für den Werkstoff SSiC unter Wälzreibung in Wasser

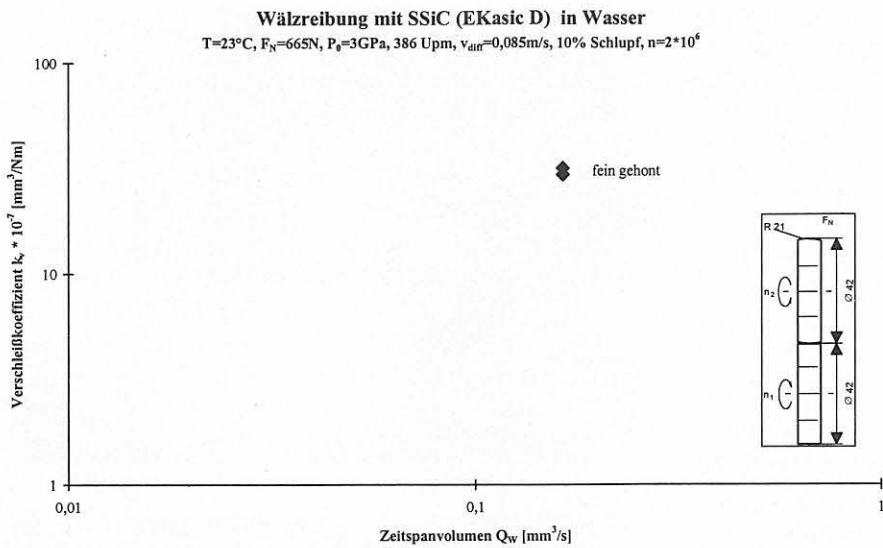


Abb. 58
 Wälzreibung von SSiC in Wasser;
 Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen

Die Reibungszahl f liegt bei der Wälzreibung in Wasser mit $0,2 \geq f \geq 0,14$ i. d. R. höher als in Paraffinöl. Nach dem Einlauf und der Absenkung der Reibwerte kommt es zu einem Anstieg und zu einer nochmaligen Absenkung mit einer Annäherung an einen konstanten Wert.

7.3.2.2 Verschleiß

Bei den Untersuchungen in Wasser war aufgrund von Pitting der Verschleiß für die balligen Probenoberflächen nicht bestimmbar, es konnten nur Verschleißwerte für die zylindrischen Probekörper angegeben werden (vgl. Abb. 58).

Da dieser Werkstoff ein ungünstiges Wälzverschleißverhalten unter Wasserschmierung aufwies, wurden nur zwei Versuche mit fein gehonten Probepaarungen durchgeführt.

Die Verschleißwerte liegen höher als die für die polierten Probekörper unter Wälzreibung in Paraffinöl. Somit ist der Werkstoff SSiC mit einer anfänglichen Hertzsch Pressung von $P_0 = 3\text{ GPa}$ für die Wälzbelastung nicht geeignet. In der tribologischen Verschleißspur kommt es zur Bildung von konischen Rissen, zu Ausplatzungen und zum Materialversagen.

Aufgrund dieser ersten Ergebnisse der Wälzverschleißuntersuchungen von SSiC in Wasser wurde die Versuchsreihe nicht weiter fortgeführt.

7.3.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff SSiC (EKasic D).

Der Werkstoff SSiC ist prinzipiell für den Wälzverschleiß einsetzbar, wenn die anfängliche Hertzsch Flächenpressung angepasst bei $P_0 \leq 1,5\text{ GPa}$ gewählt wird.

Bei einer höheren Belastung der Wälzkörper erweist sich eine Bearbeitung „so gut wie möglich“ als nicht sinnvoll, da die polierten Funktionsflächen ein schlechteres Verschleißverhalten zeigen als z. B. geschliffene Probekörper. Je feiner die Endbearbeitung bzw. je kleiner die Rauheitskennwerte (z. B. die reduzierte Riefentiefe R_{vk}), desto größer ist der Verschleißbetrag durch die Wälzbeanspruchung.

Die fein bearbeiteten Funktionsflächen zeigen genau wie die Probekörper in Wasserschmierung ein Materialversagen durch Bildung konischer Risse und Pitting.

Der Werkstoff SSiC kann für den Wälzverschleiß eingesetzt werden, wenn die Hertzsch Flächenpressung angepasst wird (z. B. $P_0 = 1,5\text{ GPa}$) und die Endbearbeitungsverfahren Oberflächenrauheiten von $R_{vk} \geq 0,3\text{ }\mu\text{m}$ erzeugen.

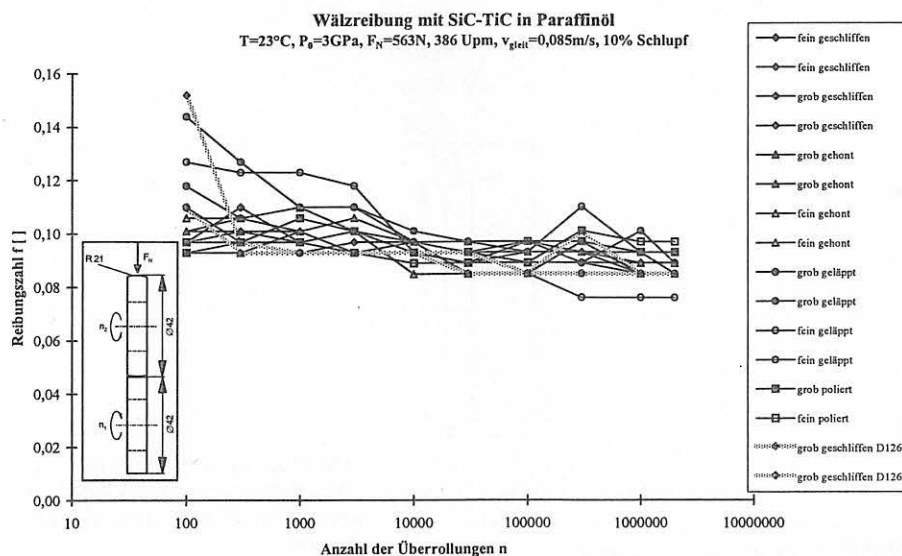


Abb. 59
 Wälzreibung mit SiC-TiC in Paraffinöl; die Reibungszahl f in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen n

7.4 GPS-SiC-TiC

Die SiC-TiC-Wälzproben wurden an der BAM hergestellt und charakterisiert (s. Kapitel 2.4).

7.4.1 Untersuchungen in Paraffinöl

Mit dem Werkstoff GPS-SiC-TiC konnte eine umfassende Meßreihe durchgeführt werden (s. Anhang). Die apparativen Einstellungen sind in Kapitel 3.1 nachzulesen.

7.4.1.1 Reibung

Die Reibungszahl bei den Untersuchungen in Paraffinöl weist nur geringe Schwankungen über die gesamte Testdauer auf, ebenfalls sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Endbearbeitungsverfahren nicht signifikant (vgl. Abb. 59). Sämtliche Reibwerte bewegen sich zu Beginn der tribologischen Belastung in dem Bereich von $f = 0,16$ bis $0,09$ und nähern sich am Ende des Wälzverschleißversuchs dem Wert $f = 0,08$ an.

Nach einer Einlaufphase pendeln sich alle Reibwerte, unabhängig von der jeweiligen Endbearbeitung der Funktionsfläche, auf einen nahezu konstanten Wert ein. Somit liegen nach ca. 10.000 Überrollungen fast alle Reibwerte im Bereich von $f = 0,10$ bis $f = 0,09$ (s. Abb. 59).

7.4.1.2 Verschleiß

Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, erhöht der TiC-Anteil die Verschleißbeständigkeit dieses in der BAM entwickelten Werkstoffs gegenüber reinem SiC. Aufgrund der zusätzlich höheren Zähigkeit und geringeren Porosität erscheint diese Werkstoffkombination günstiger für die Wälzbeanspruchung.

Der Verschleißbetrag für den Werkstoff GPS-SiC-TiC liegt höher als für die Siliziumnitrid-Werkstoffe, im Bereich von $1 \cdot 10^{-9}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ [mm³/Nm]. Für die Wälzbeanspruchung sind die geläppten Proben weniger geeignet. Neben den polierten Funktionsflächen weisen die fein geschliffenen Probekörper ein günstiges Verschleißverhalten auf. Somit kann auch bei diesem Werkstoff davon ausgegangen werden, dass die Devise „best-as-possible“ nicht immer zweckmäßig ist.

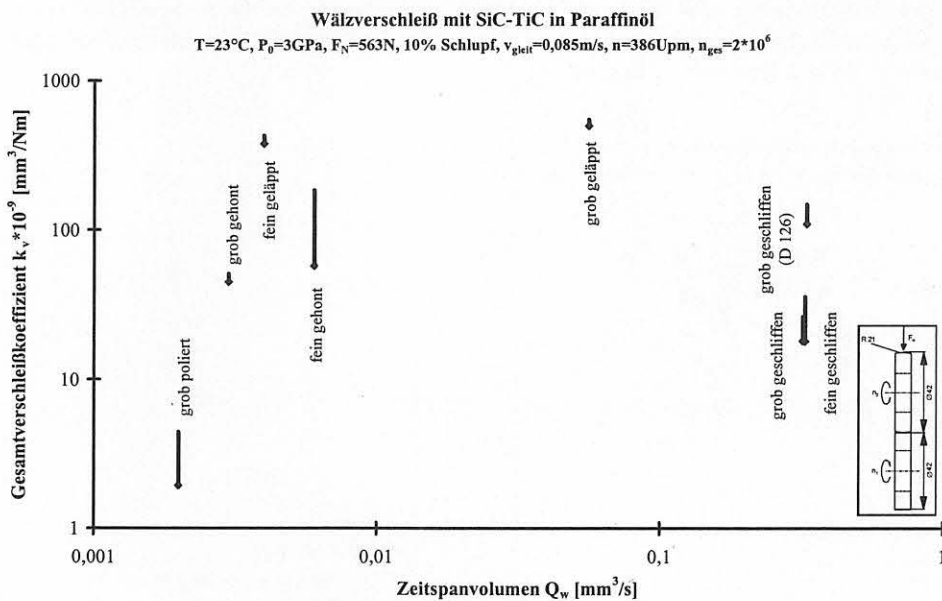


Abb. 60 Verschleißkoeffizient k_v in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen bei der Endbearbeitung für den Werkstoff SiC-TiC

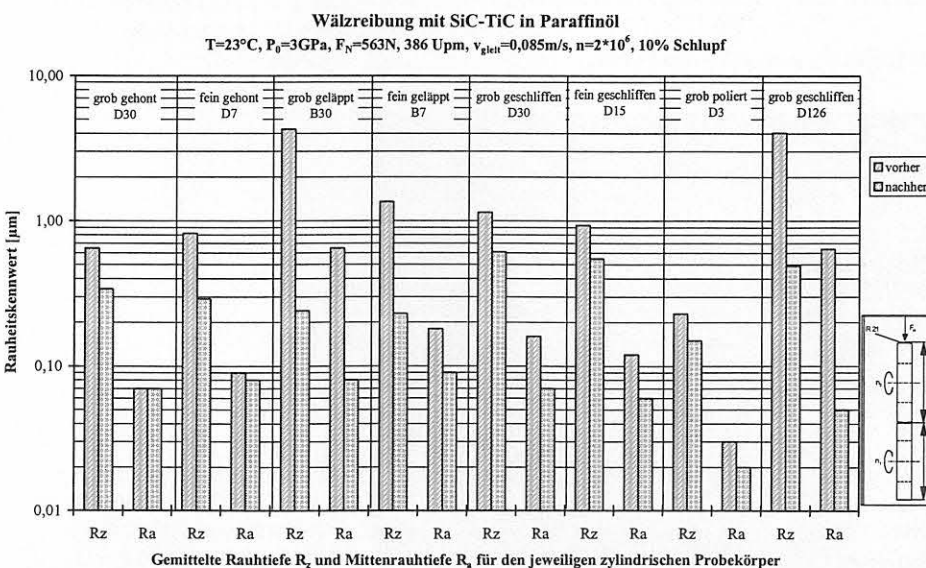


Abb. 61 Rauheitskennwerte vor und nach der tribologischen Beanspruchung für den Werkstoff GPS-SiC-TiC in Paraffinöl

7.4.1.3 Oberflächenrauheiten

Der Werkstoff GPS-SiC-TiC zeigt nicht so deutlich wie andere Werkstoffe das Verhalten, dass sich die Oberflächenrauheit der Funktionsfläche auf einen Wert einpendelt. Zwar nehmen die gemittelten Rauhtiefen R_z nur auf Werte von ca. $0,15 \leq R_z \leq 0,6 \mu\text{m}$ ab (vgl. Abb. 61), aber ein signifikanter Endwert für die gemittelte Rauhtiefe ist nicht zu erkennen. Ähnlich verhält es sich mit der Mittenrauhtiefe R_a der Funktionsflächen, die sich auf Werte von ca. $0,06 \leq R_a \leq 0,09 \mu\text{m}$ einstellt (vgl. Abb. 61).

In Abb. 61 ist gut zu erkennen, dass es den größten Abrieb beim Einlaufverhalten bei den geläpften Funktionsflächen gibt. Die geschliffenen Oberflächen zeigen dagegen eine geringere Änderung der Rauheitskennwertbeträge. Somit können die geschliffenen Funktionsflächen, da sie auch einen geringen Verschleißbetrag aufweisen, als geeignet für die Wälzbelastung angesehen werden. Das Endbearbeitungsverfahren Schleifen – vor allem Feinschleifen – scheint das günstigste Verfahren für die Endbearbeitung der SiC-TiC-Oberflächen zu sein.

Wird die reduzierte Riefentiefe R_{vk} der GPS-SiC-TiC-Funktionsfläche betrachtet, so ist festzustellen, dass es für die zylindrischen Probekörper eine Verschleißhochlage für eine reduzierte Riefentiefe von $R_{vk} \geq 0,3 \mu\text{m}$ gibt, für die balligen Probekörper zeigt sich ein komplexerer Verlauf des Ver-

schleißbetrages. Zum einen gibt es einen höheren Verschleißbetrag für $R_{vk} \geq 1,2 \mu\text{m}$ und zum anderen ist der Verschleißbetrag für Werte um $R_{vk} \approx 0,4 \mu\text{m}$ erhöht. Diese R_{vk} -Werte weisen bei den balligen Proben auf mit Läppen bearbeitete Probenoberflächen hin.

7.4.1.4 Oberflächenanalytik

Die Tribospur einer grob geschliffenen Probe zeigt in der REM-Aufnahme, dass die Rauheitsspitzen durch die Wälzbelastung geglättet wurden (s. Abb. 63, links). Einzelne Gefügekörner wurden aus dem Material gebrochen. Die Ausbrüche von Gefügekörnern ist verstärkt bei der geläpften Probe festzustellen (vgl. Abb. 63, rechts), was den höheren Verschleißbetrag sowie die höheren Rauheitskennwerte nach der tribologischen Belastung erklärt.

Die Zwei-Phasigkeit des Werkstoffs ist auch nach der tribologischen Wälzbelastung noch gut erkennbar.

7.4.2 Untersuchungen in Wasser

Der Werkstoff GPS-SiC-TiC lässt sich auch für die Wälzbeanspruchung unter Wasserschmierung einsetzen. Im Gegensatz zu der TiN-Phase des Werkstoffs GPS-Si₃N₄-TiN ist die TiC-Phase hydrostabiler, so dass es bei einer angepassten Wälzbelastung nicht zu einem Materialversagen kommt.

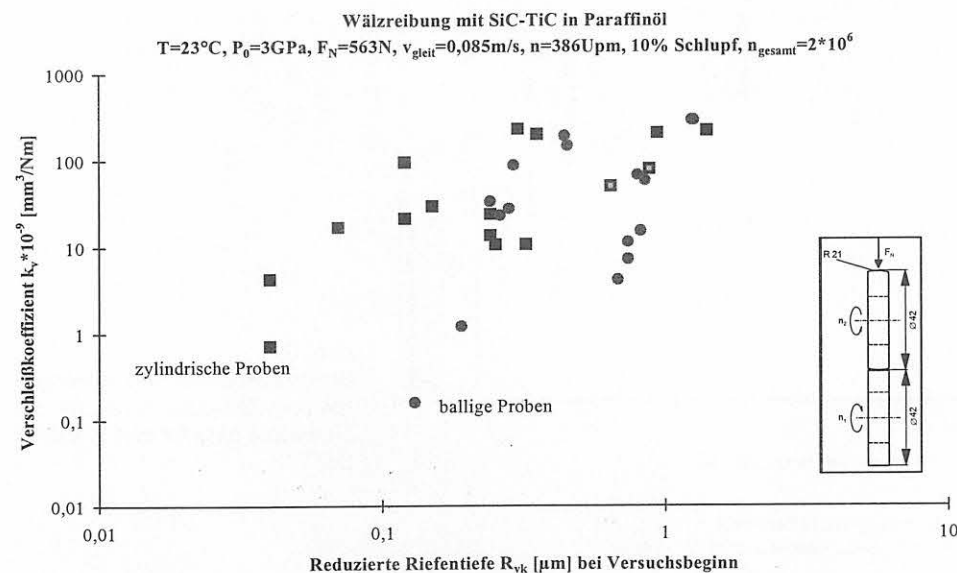


Abb. 62 Verschleißbetrag k_v beider Probengeometrien in Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe R_{vk} für den Werkstoff GPS-SiC-TiC

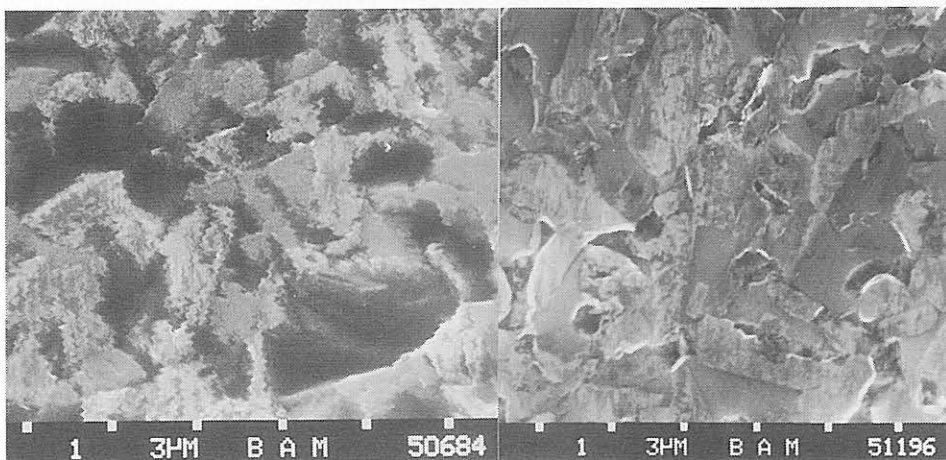


Abb. 63 REM-Aufnahmen der Tribospur von GPS-SiC-TiC-Probekörpern; links: grob geschliffen; rechts: grob geläpft

7.4.2.1 Reibung

Der Werkstoff SiC-TiC zeigt unter Wälzreibung in Wasser einen Anstieg der Reibungszahlen durch das Einlaufen. Ab einer Überrollungszahl von ca. $n \approx 10.000$ bleibt die Reibungszahl annähernd konstant bei einem Wert von $f \approx 0,17$. Der Endwert der Reibungszahl bei den Wälzverschleißuntersuchungen ist unabhängig von der Endbearbeitung der Funktionsflächen der Probekörper.

Die anfänglichen Reibwerte variieren je nach Art der Endbearbeitung der Wälzkörper, die polierten Probekörper weisen einen Anfangswert von ca. $f \approx 0,1$ auf, die grob bearbeiteten Proben einen Wert von $f \approx 0,13$. Die Anfangs- und Endwerte zeigen keinen markanten Unterschied bezüglich der Bearbeitung der Funktionsflächen.

Solch ein Unterschied ist nur im Verlauf der Reibwerte festzustellen. Die grob bearbeiteten Probekörper zeigen einen stetigen Anstieg der Reibungszahlen mit zunehmender Überrollungszahl. Dagegen ist die Zunahme der Reibungszahl bei den fein bearbeiteten Wälzkörpern größer bis auf Werte bei ca. $f \approx 0,2$, die dann zu größeren Überrollungszahlen hin wieder abnehmen und den gleichen Wert erreichen wie grob bearbeitete Funktionsflächen.

7.4.2.2 Verschleiß

Der Verschleißkoeffizient k_v liegt für den Werkstoff SiC-TiC unter Wälzreibung in Wasser im Bereich von $k_v = 2 \cdot 10^{-7}$ bis $k_v = 12 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ und ist proportional zum Zeitspanvolumen Q_w bei der Oberflächenendbearbeitung der Funktionsfläche. Für den Werkstoff SiC-TiC gilt: Je feiner das Endbearbeitungsverfahren, desto geringer ist auch der Verschleißbetrag. Jedoch ist hierbei auch zu beachten, dass zwischen den grob polierten Wälzkörpern und den grob geschliffenen nur ein geringer Unterschied des Verschleißbetrages zu verzeichnen ist.

Aufgrund des Verschleißverhaltens von SiC-TiC unter Wälzreibung in Wasser kann auch hier die Vorgabe gemacht werden, dass eine sehr feine Endbearbeitung kaum ein Gewinn für das Verschleißverhalten bringt. Somit kann das Bauteil auch mit gröberen Verfahren bearbeitet werden, ohne dass es zu erheblichen Einbußen in der Zuverlässigkeit des Bauteils kommt.

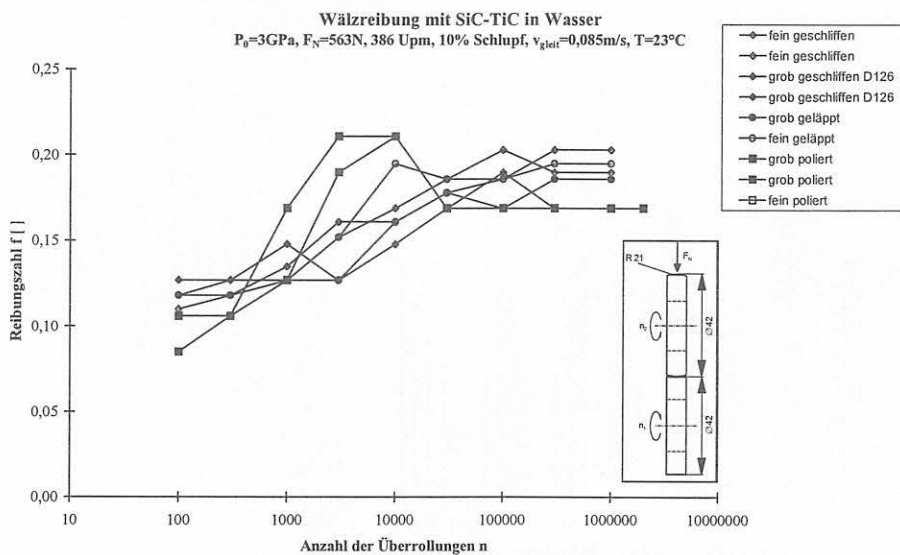


Abb. 64
Reibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen für den Werkstoff SiC-TiC in Wasser

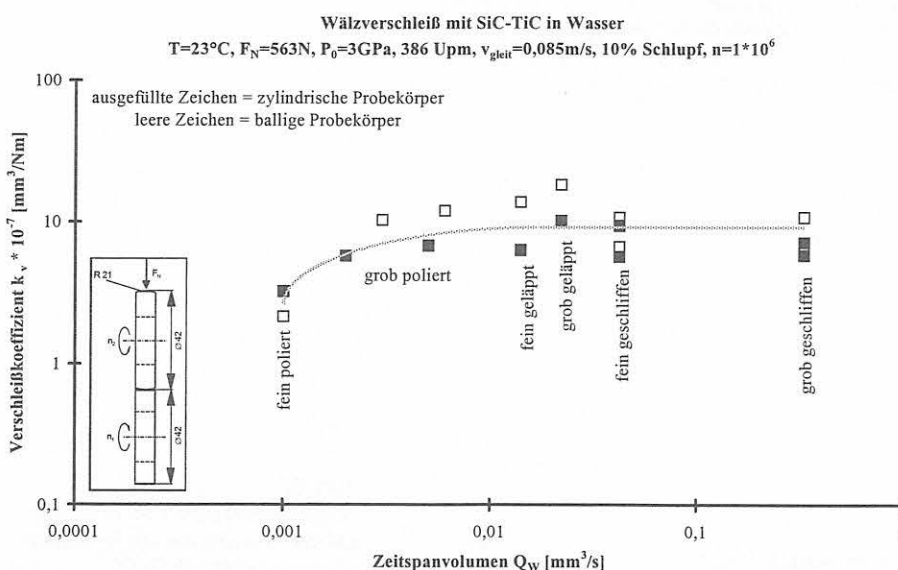


Abb. 65
Verschleißkoeffizient k_v in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen Q_w bei der Oberflächenendbearbeitung für den Werkstoff SiC-TiC unter Wälzverschleiß

7.4.2.3 Oberflächenrauheiten

Die gemittelte Rauhtiefe R_z und die Mittenrauhtiefe R_a vor und nach der tribologischen Wälzbeanspruchung zeigen, dass die fein bearbeiteten Oberflächen nach einer Million Überrollungen eine Zunahme der Oberflächenrauheiten in der Verschleißspur aufweisen.

Die grob bearbeiteten Funktionsflächen nehmen in ihrer Oberflächenrauheit unter der Wälzbelastung ab. Eine leichte Abnahme der Rauheiten ist bei der grob polierten Probe zu beobachten, wenn diese eine Überrollungszahl von zwei Millionen erreicht. Alle Bearbeitungen zeigen die gleichen Werte für die Rauheitskennwerte nach der tribologischen Wälzbelastung, d. h. es stellt sich eine Prozessrauheit unter der tribologischen Belastung ein.

Der Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe R_{vk} vor der tribologischen Wälzbelastung zeigt deutlich, dass eine Abhängigkeit von der Endbearbeitung für den Wälzverschleiß in Wasser nur eine untergeordnete Rolle spielt.

7.4.2.4 Oberflächenanalytik

Die Oberflächenanalytik ermöglicht eine Untersuchung der Ursachen für das Verschleißverhalten.

Die REM-Aufnahmen zeigen deutlich eine Veränderung der Bauteiloberfläche durch die tribologische Wälzbelastung in Wasser (vgl. Abb. 68 a). In Abb. 68 a) ist links im Bild die Tribospur zu sehen und rechts im Bild die unbelastete Probenoberfläche, auf der noch Strukturen sichtbar sind, die von der Schleifbearbeitung herkommen. Diese Glättung der Spur ist auch aus der Analyse der Oberflächenrauheiten vor und nach der Wälzbelastung bekannt (vgl. Abb. 66). Wird die Spur bei einer hohen Auflösung ($V = 1 : 5.000$) betrachtet, so ist zu erkennen, dass die scheinbar glatte Spur mit Rissen durchsetzt ist. Diese Risse bewirken, dass sich das Material an der Oberfläche schollenförmig ablöst. Das sich in Abb. 68 b) hell darstellende Material ist oxidisch. Im REM erscheinen Oxide hell durch die Aufladung.

Im EDX-Spektrum der unbelasteten SiC-TiC-Probe ist deutlich die reine TiC-Phase zu erkennen (s. Abb. 69). Das noch

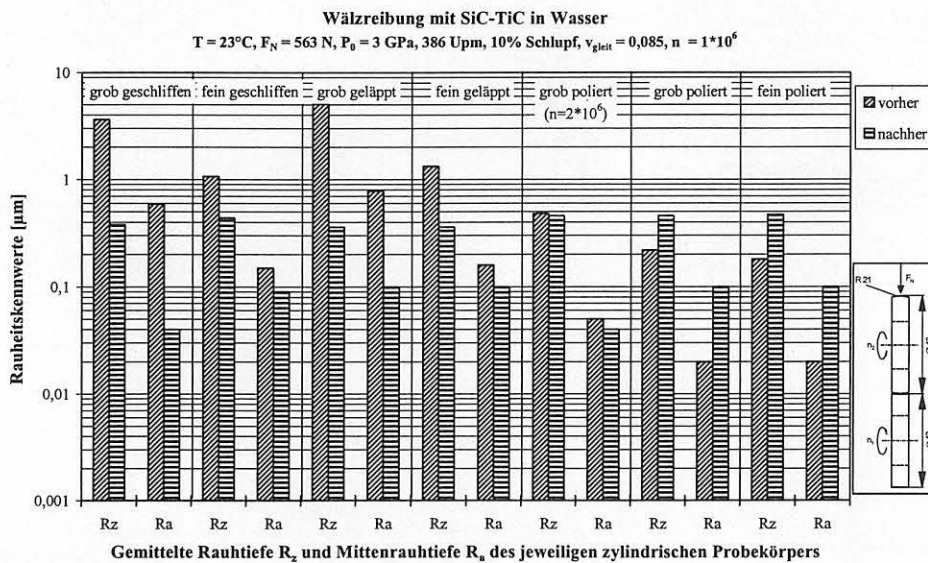


Abb. 66
 Rauheitskennwerte R_a und R_z vor und nach der tribologischen Wälzbelastung in Wasser für den Werkstoff SiC-TiC

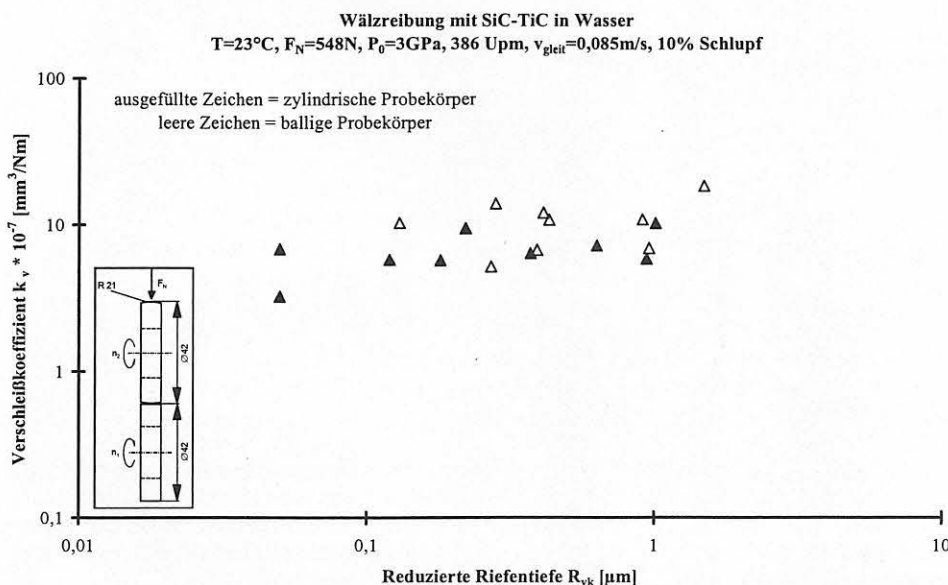


Abb. 67
 Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe für den Werkstoff SiC-TiC

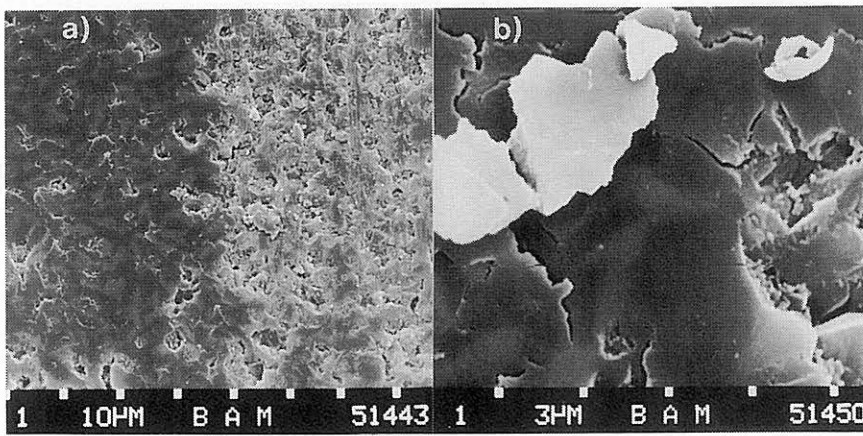


Abb. 68
REM-Aufnahmen einer grob geschliffenen Probe nach der Wälzbelastung in Wasser;
a) links: $V = 1 : 1.000$,
b) rechts: $V = 1 : 5.000$

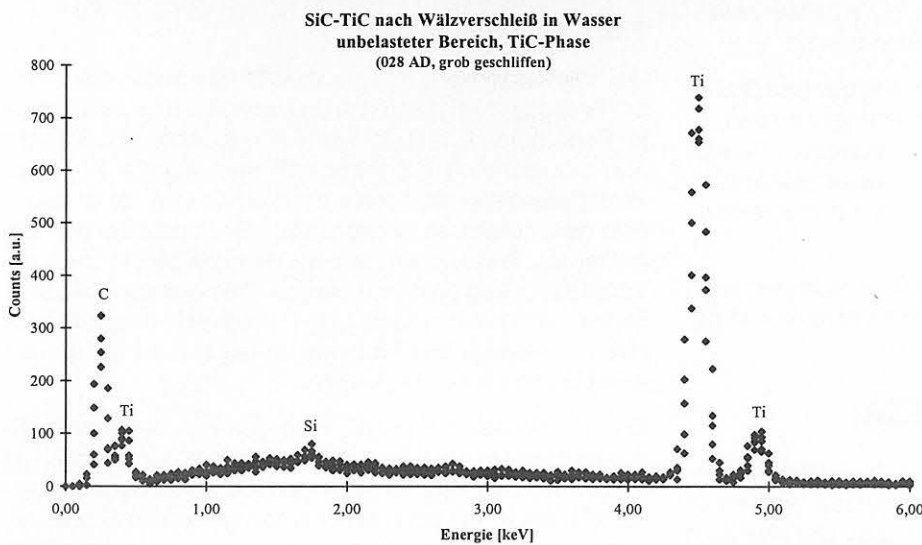


Abb. 69
EDX-Spektrum der TiC-Phase des unbelasteten grob geschliffenen SiC-TiC-Wälzkörpers

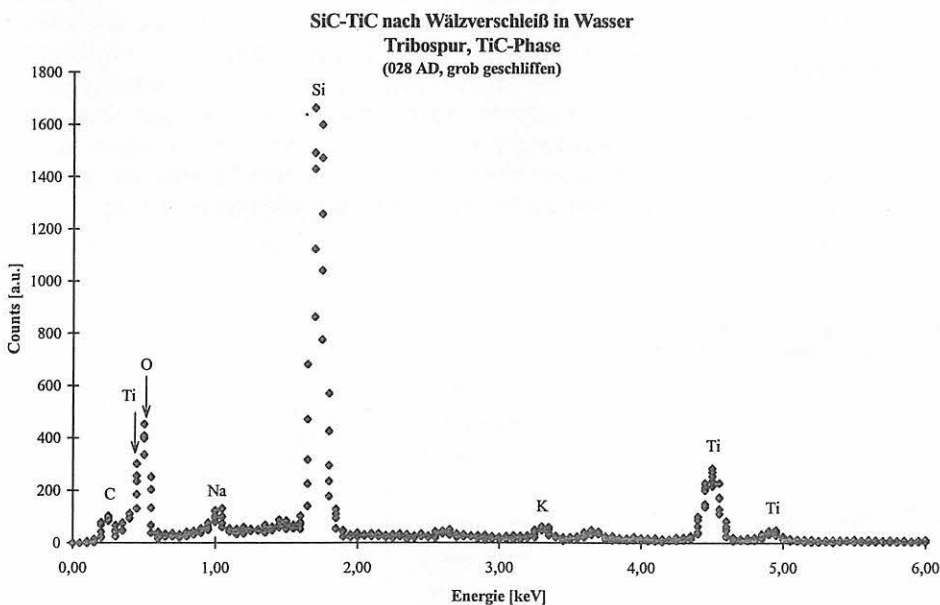


Abb. 70
EDX-Spektrum der TiC-Phase in der Spur des grob geschliffenen SiC-TiC-Wälzkörpers

schwach nachweisbare Si-Signal ist auf Streustrahlung zurückzuführen. Das Spektrum zeigt eine Verteilung der Elemente, wie sie zu erwarten ist.

In Abb. 70 ist deutlich die Veränderung der Verteilung der Elemente in der Spur gegenüber der unbelasteten Oberfläche (Abb. 69) zu erkennen. Obwohl hier die TiC-Phase detektiert wurde, ist gegenüber der unbelasteten Probe das

Ti-Signal erheblich kleiner. Der deutlich erkennbare Sauerstoff-Peak lässt auf eine oxidische Verbindung schließen.

Die Bildung einer TiO_xC_y -Phase wirkt sich insofern günstig auf den Verschleiß aus, als sich die Ti-Phase nicht so stark hydrolysiert, dass es zu einem Versagen durch Bruch kommt wie z.B. bei dem Werkstoff GPS-Si₃N₄-TiN.

7.4.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff GPS-SiC-TiC

Generell ist der Werkstoff GPS-SiC-TiC für die Wälzbelastung geeignet, sowohl mit Paraffinöl als auch mit Wasser als Zwischenmedium.

Die Untersuchungen in Paraffinöl zeigen ein besseres Wälzverschleißverhalten als der reine SiC-Werkstoff. Eine einheitliche Glättung der Funktionsfläche durch das Einlaufverhalten des Werkstoffs ist nicht festzustellen.

Geläppte Funktionsflächen zeigen ein schlechteres Verschleißverhalten als z. B. geschliffene. Das Schleifen, vor allem das Feinschleifen, scheint für diesen Werkstoff die Methode der Endbearbeitung zu sein, die gute Verschleißbeträge und ein positives Einlaufverhalten bewirkt.

Bei den Untersuchungen in Wasser ist eine gewisse Stabilität gegenüber der Wasser-Schmierung hervorzuheben, es kommt zwar zu einer Hydrolyse des TiC in Wasser, die sich jedoch nicht derart negativ auf das Wälzverschleißverhalten auswirkt, dass es zu einem Versagen durch Materialausbrüche kommt.

Somit zeigt sich der Werkstoff SiC-TiC auch im Vergleich mit anderen Werkstoffen als ein für den Wälzverschleiß geeignetes Material.

7.5 HIP-ZrO₂ (htc-PSZA)

Der neu auf dem Markt eingeführte HIP-ZrO₂-Werkstoff besitzt eine hohe Festigkeit und keine Glasphase, was ihn für die Wälzbelastung günstig erscheinen lässt. Der Werkstoff und seine mechanischen Eigenschaften sind eingehender in Kapitel 2.5 dargestellt.

7.5.1 Untersuchungen in Paraffinöl

Mit Paraffinöl als Zwischenstoff erweist sich der Werkstoff HIP-ZrO₂ günstig für die Wälzreibung. Dadurch konnte ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durchgeführt wer-

den (s. Anhang), dies bedeutet auch immer, dass viele verschiedenen Endbearbeitungsarten untersucht werden konnten.

7.5.1.1 Reibung

Die Reibungszahl liegt für alle Endbearbeitungsarten im Bereich von $f = 0,105$ bis $f = 0,065$. Nach einem anfänglichen Absinken der Reibungszahl nähert sie sich einem konstanten Wert bei zunehmender Anzahl der Überrollungen. Bei dem Reibwert konnte keine Abhängigkeit von der Art der Endbearbeitung der Funktionsfläche beobachtet werden (vgl. Abb. 71). Die meisten Wälzproben wiesen am Ende der tribologischen Belastung einen Reibungskoeffizienten im Bereich von $f = 0,08$ auf.

7.5.1.2 Verschleiß

Der Werkstoff HIP-ZrO₂ erwies sich als sehr verschleißbeständig und zeigt somit auch niedrige Verschleißbeträge im Bereich von $k_v \leq 10 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ (s. Abb. 72). Bei sehr fein bearbeiteten Probenoberflächen konnte z. T. der Verschleißbetrag nicht mehr ermittelt werden, da er unterhalb des messbaren Bereiches lag. So könnte bei den fein geläpften Wälzkörpern nur an den balligen Proben ein Verschleißbetrag bestimmt werden. Die polierten Funktionsflächen wiesen einen so geringen Verschleißbetrag auf, dass dieser an keinem der Probekörper (auch nicht mittels des AFM) bestimmt werden konnte.

Bei dem Werkstoff HIP-ZrO₂ verringert sich der Verschleißbetrag zwar mit der Feinheit der Endbearbeitung, jedoch ist für den Konstrukteur zu überlegen, ob ein so geringer Verschleiß, wie er mit polierten oder fein geläpften Proben erreicht werden kann, notwendig für die Anwendung des Bauteils ist. Selbst grob bearbeitete Funktionsflächen (wie z. B. grob geschliffene oder grob gehonte Oberflächen) zeigen einen geringen Verschleißwert. Sehr gute Verschleißergebnisse können auch mit den Endbearbeitungsverfahren Feinschleifen oder Feinhonen erzielt werden. Diese Endbearbeitungsverfahren weisen ein höheres Zeitspannvolumen als feinere Verfahren, wie z. B. das Polieren auf, was die Kosten bei der Bauteilfertigung minimieren könnte.

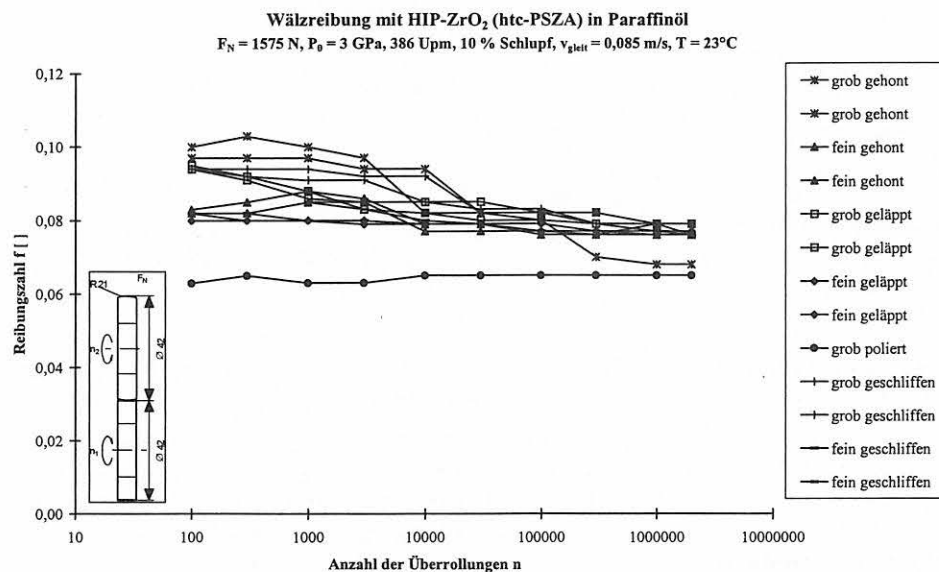


Abb. 71
 Reibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen für den Werkstoff HIP-ZrO₂ unter Wälzreibung in Paraffinöl

Wälzreibung mit ZrO_2 (htc-PSZA) in Paraffinöl bei $T=22^\circ C$
 $F_N=1575N, P_0=3\text{ GPa}, 386\text{ Upm}, n=2 \cdot 10^6, 10\% \text{ Schlupf}$

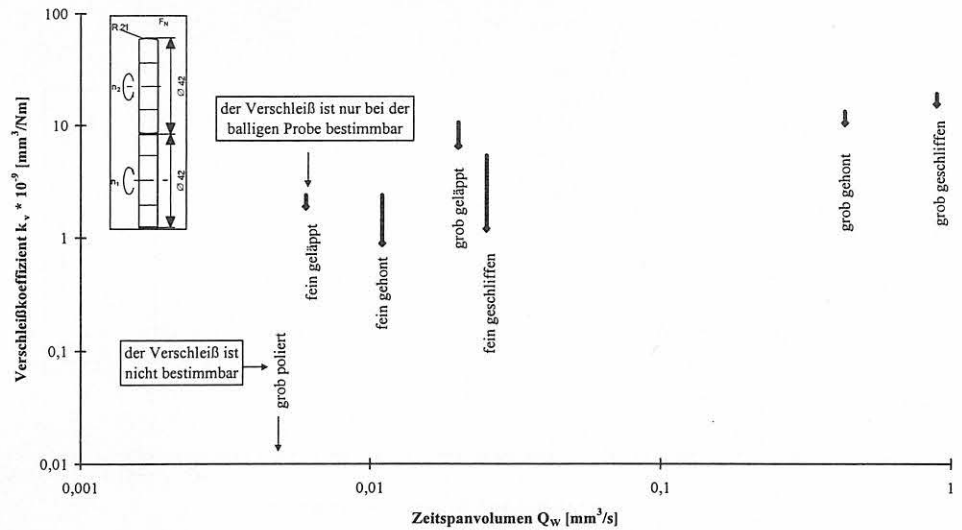


Abb. 72
 Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen bei der Bearbeitung für den Werkstoff HIP- ZrO_2

Aufgrund des günstigen Verschleißverhaltens der HIP- ZrO_2 -Wälzkörper ist dieser Werkstoff eine gute Alternative zu dem gut am Markt eingeführten HIP- Si_3N_4 . Zumal bei ZrO_2 die Verschleißkoeffizienten Werte kleiner $10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ annehmen können.

7.5.1.3 Oberflächenrauheiten

Während des Einlaufs beim Wälzverschleiß kommt es zu einer Glättung der Oberflächenrauheit. Vor allem werden die Rauheitsspitzen abgetragen, was die gemittelte Rauhtiefe R_z und der Mittenrauhwert R_a vor und nach der tribologischen Beanspruchung in Abb. 73 verdeutlichen. Für Anwendungen, die eine geringe Spielzunahme zulassen, wie z. B. Zahnflanken oder Nocken, besteht somit die Möglichkeit, auf eine bestmögliche Endbearbeitung der Funktionsfläche des Bauteils zu verzichten. In den anderen Fällen müssen polierte Flächen verwendet werden. Bei den grob polierten Proben konnte auch nach einer Überrollungszahl von $n = 2 \cdot 10^7$ kein Verschleißbetrag profilometrisch bestimmt werden. Für dieses Endbearbeitungsverfahren konnte auch keine Änderung der Oberflächenrauheiten mittels des Hommel-Testers oder AFMs nachgewiesen werden. Für die anderen Verfahren für

die Endbearbeitung der Funktionsflächen zeigt sich eine Reduzierung der Oberflächenrauheiten durch die Wälzbelastung.

Die Abnahme der Rauheitskennwerte ist für den Werkstoff HIP- ZrO_2 unabhängig von der Oberflächenendbearbeitung. Selbst bei niedrigen Werten für R_z und R_a vor der tribologischen Beanspruchung vermindern sich die Beträge noch unter der Wälzbelastung. Eine Abnahme der Oberflächenrauheit ist zu verzeichnen, wenn die gemittelte Rauhtiefe $R_z \geq 0,2 \mu\text{m}$ und der Mittenrauhwert $R_a \geq 0,02 \mu\text{m}$ sind.

Wird der Verschleißkoeffizient k_v in Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe R_{vk} betrachtet, so ist festzustellen, dass es zu einer Verminderung des Verschleißbetrags kommt für Werte von $R_{vk} \leq 0,2 \mu\text{m}$. Bei der Oberflächenendbearbeitung können mit folgenden Verfahren Werte der reduzierten Riefentiefe von $R_{vk} \leq 0,2 \mu\text{m}$ erreicht werden: Feinhonen, Feinschleifen, Feinlappen sowie Polieren.

Auch bei dem Werkstoff HIP- ZrO_2 können gute Ergebnisse des Verschleißbetrages erreicht werden, wenn Bearbeitungsverfahren der Funktionsfläche verwendet werden, die nicht dem Wahlspruch „best-as-possible“ entsprechen.

Wälzreibung mit ZrO_2 (htc-PSZA) in Paraffinöl bei $T=22^\circ C$
 $F_N=1575N, P_0=3000N/mm^2, 386\text{ Upm}, n=2 \cdot 10^6, 10\% \text{ Schlupf}$

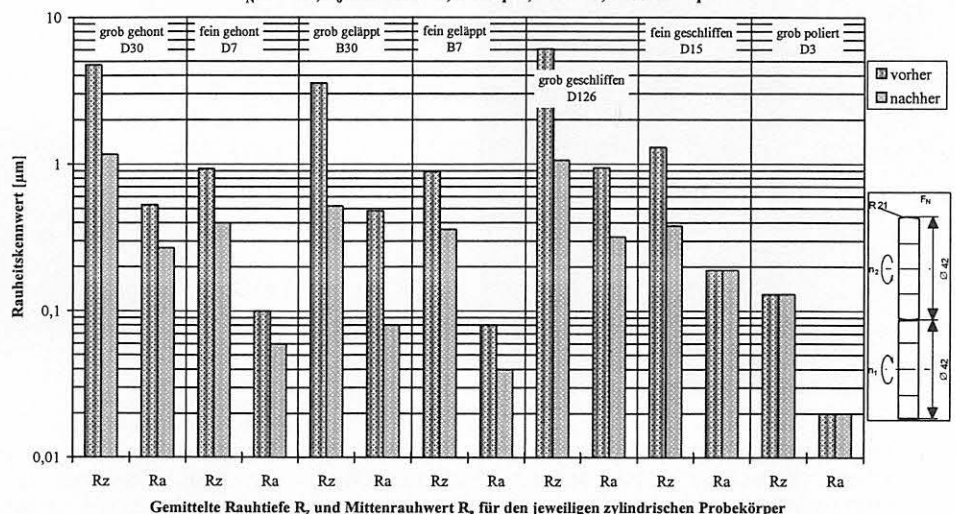


Abb. 73
 Rauheiten der zylindrischen HIP- ZrO_2 -Proben vor und nach der tribologischen Wälzbelastung in Paraffinöl

Wälzreibung mit HIP-ZrO₂ in Paraffinöl

F_N=1575N, P₀=3GPa, 386 U_{pm}, 10% Schlupf, n=2*10⁶, T=22°C

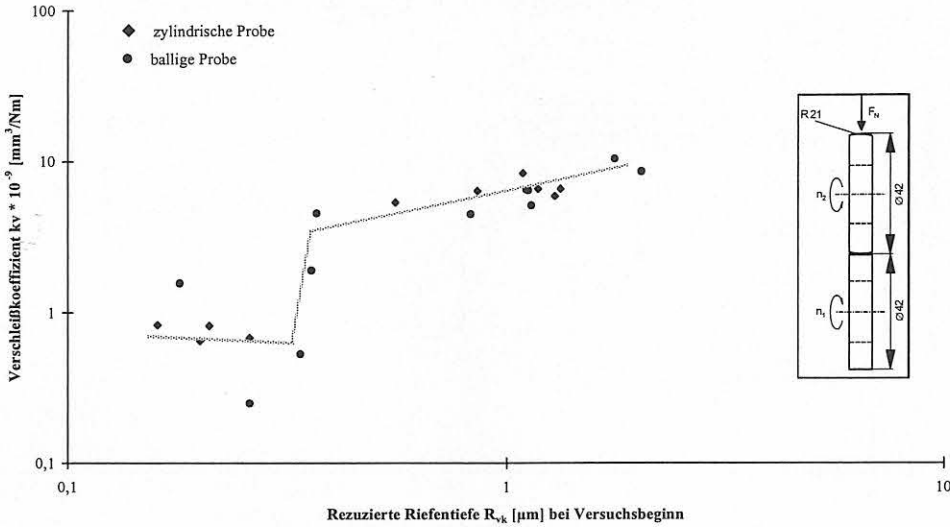


Abb. 74 Verschleißkoeffizient k_v in Abhängigkeit von der reduzierten Riefentiefe R_{vk} vor Versuchsbeginn für den Werkstoff HIP-ZrO₂ unter Wälzbeanspruchung in Paraffinöl

7.5.1.4 Oberflächenanalytik

Die standardmäßig durchgeführten ultraschallmikroskopischen Untersuchungen wurden auf Bereiche konzentriert, in denen mit der Lichtmikroskopie noch keine Schädigung der beanspruchten Funktionsfläche diagnostiziert werden konnte.

In Abb. 75 ist eine grob geschliffene HIP-ZrO₂-Probenoberfläche abgebildet. In der Bildmitte ist die durch die Wälzbelastung entstandene Verschleißspur sichtbar. In der Spur ist durch die tribologische Beanspruchung eine Oberflächen-glättung eingetreten. Die Glättung der Oberfläche zeigt sich bei der Ultraschallmikroskopie durch den geringeren Streupegel der Ultraschallwellen in der Tribospur gegenüber der grob geschliffenen unbelasteten Umgebung.

Die Glättung deutet ebenfalls auf einen geringen Verschleißbetrag hin und zeigt auch „optisch“ das Ergebnis der Unter-

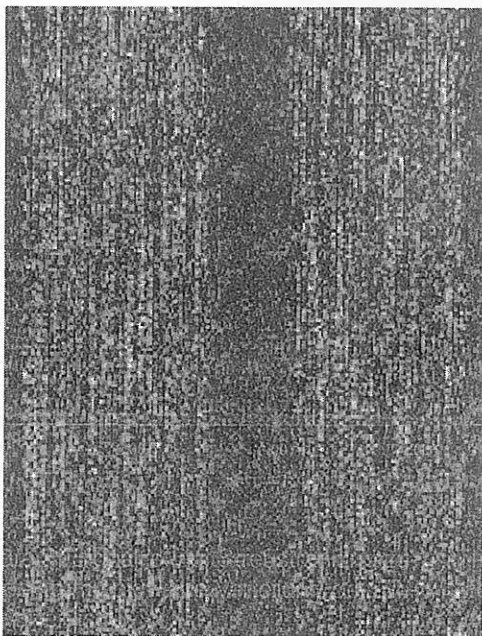


Abb. 75 Ultraschallmikroskopie an einer grob geschliffenen HIP-ZrO₂-Probenoberfläche nach der Wälzbelastung mit 2 Millionen Überrollungen in Paraffinöl

suchung der Rauheitskennwerte R_a und R_z vor und nach der tribologischen Wälzbelastung.

Die Glättung der polierten Funktionsfläche durch die Wälzbelastung in Paraffinöl ist so gering, dass sie mit den herkömmlichen Methoden nicht nachweisbar ist. Die grob po-

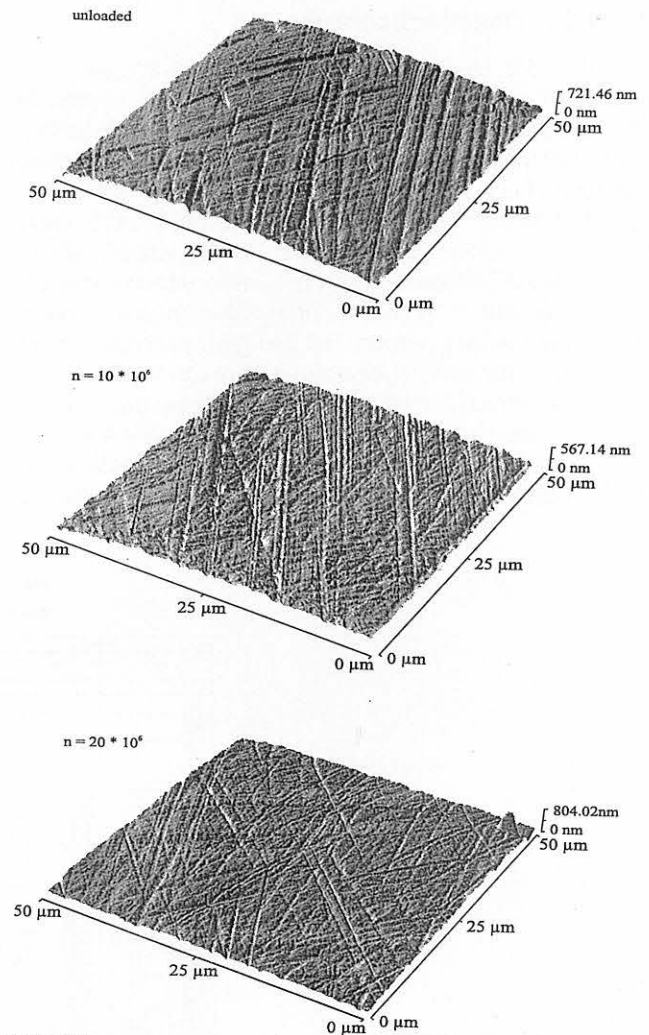


Abb. 76 AFM-Aufnahmen der grob polierten ZrO₂-Probe nach dem Wälzverschleiß in Paraffinöl, von oben nach unten: unbelastete Oberfläche und nach n = 10 * 10⁶ bzw. n = 20 * 10⁶ Überrollungen

lierte ZrO_2 -Oberfläche in Paraffinöl weist einen profilometrisch nicht mehr bestimmbar Verschleißbetrag auf, da dieser unterhalb der Messgenauigkeit liegt. Erst Untersuchungen mit dem AFM (Rasterkraftmikroskop) ermöglichen eine Aussage über die Veränderung der Oberfläche in der Tribospur unter der Wälzbeanspruchung. In den AFM-Aufnahmen lässt sich eine schwache Glättung der belasteten Oberfläche erkennen (s. Abb. 76), selbst die Bearbeitungsspuren durch das Polieren sind sichtbar geblieben. Somit lässt sich dieser Werkstoff auch für Langzeitanwendungen in Paraffinöl einsetzen.

7.5.2 Untersuchungen in Wasser

Der Werkstoff HIP- ZrO_2 hat sich als ungeeignet für den Einsatz in Wasser erwiesen. Aus diesem Grund wurden nur zwei tribologische Tests durchgeführt (s. Anhang). Für diese Versuche wurde eine grob bearbeitete Wälzpaarung (grob gehont) und eine fein bearbeitete Probenpaarung (grob poliert) gewählt.

7.5.2.1 Reibung

Bei der Wälzbeanspruchung in Wasser steigt die Reibungszahl mit zunehmender Überrollungszahl stetig an, so dass nur geringe Überrollungszahlen von 10 000 bzw. 30 000 erreicht werden konnten (vgl. Abb. 77). Hier ist zu unterscheiden, wie die Probe endbearbeitet wurde. Die fein bearbeitete Probenpaarung erreicht eine höhere Überrollungszahl. Die erreichten Überrollungszahlen sind abhängig von dem Reibwert, der für das Amsler-Tribometer noch technisch möglich ist. Bei einem Reibwert von $f = 0,4$ schaltete die Apparatur automatisch ab, damit es nicht zu einer Schädigung der apparativen Komponenten kommt.

Der stetige Anstieg des Reibwertes ist durch das zunehmende Pitting erklärbar. Bei dem Werkstoff HIP- ZrO_2 treten hohe Schubspannungen durch die ansteigende Reibungszahl auf. Zusätzlich ist die hydrothermale Beständigkeit von ZrO_2 unzureichend, da das Y_2O_3 in Wasser als Hydroxid herausgelöst wird [43].

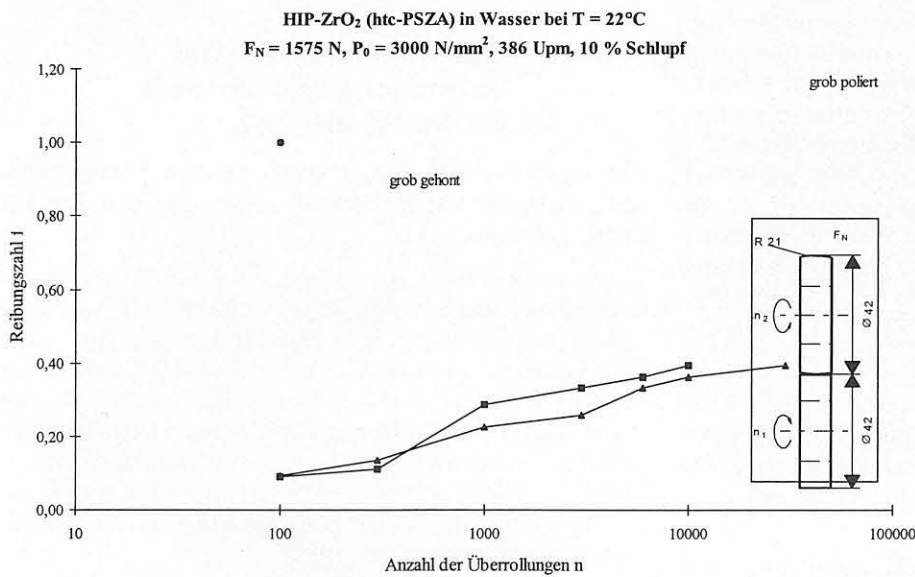


Abb. 77 Verlauf der Reibwerte f mit der Anzahl der Überrollungen n für den Werkstoff HIP- ZrO_2 in Wasser

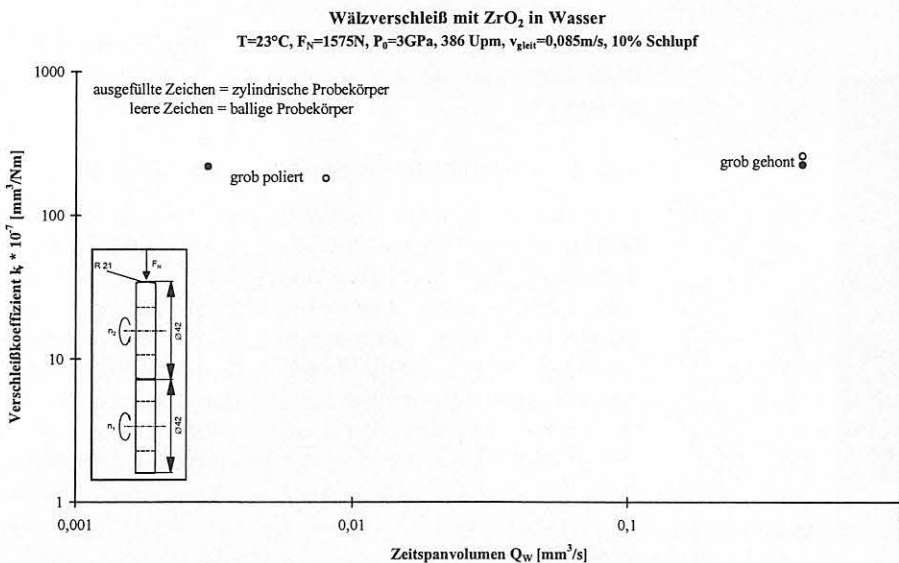


Abb. 78 Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen bei der Oberflächenendbearbeitung für den Werkstoff HIP- ZrO_2 in Wasser

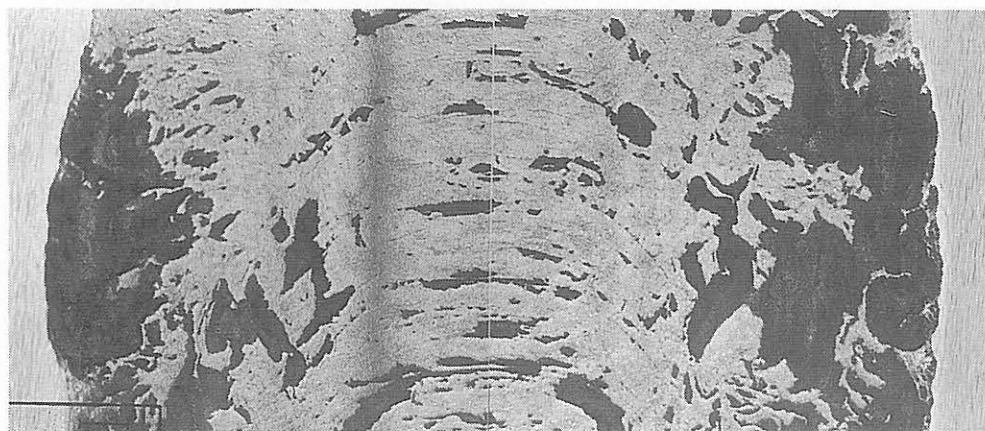


Abb. 79
Lichtmikroskopische Aufnahme einer grob polierten ZrO_2 -Probe nach der Wälzbeanspruchung in Wasser

7.5.2.2 Verschleiß

Wie schon die Reibwerte andeuten, zeigt sich der Werkstoff HIP- ZrO_2 für die Wälzreibung in Wasser als verschleißunbeständig.

Der Verschleißkoeffizient k_v liegt bei den untersuchten Probekörpern bei $k_v \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die erreichten Überrollungszahlen unterschiedlich sind für die verschiedenen Endbearbeitungsverfahren. Die grob gehonte Wälzpaarung erreicht den gleichen Verschleißbetrag wie die grob polierte, jedoch mit 20 000 Überrollungen weniger. Dies zeigt auch, dass hier eine feine Endbearbeitung der Funktionsfläche vorteilhafter ist, obwohl sich der Werkstoff als solcher nicht für die Wälzreibung in Wasser eignet.

7.5.2.3 Oberflächenanalytik

Bei der Wälzbeanspruchung von HIP- ZrO_2 in Wasser treten hohen Schubspannungen mit ansteigender Reibungszahl auf, was zu Pitting führt. Bewirkt wird dies aufgrund der unzureichenden hydrothermalen Beständigkeit des Y_2O_3 -stabilisierten ZrO_2 -Werkstoffs.

In Abb. 79 ist deutlich sichtbar, dass es zu Pitting kommt. Die Verschleißspur ist gekennzeichnet durch konische Risse und Materialausbrüche, wobei die Risse in der Mitte der Tribospur zu finden sind, die großflächigen Ausbrüche dagegen eher am Rand der Spur.

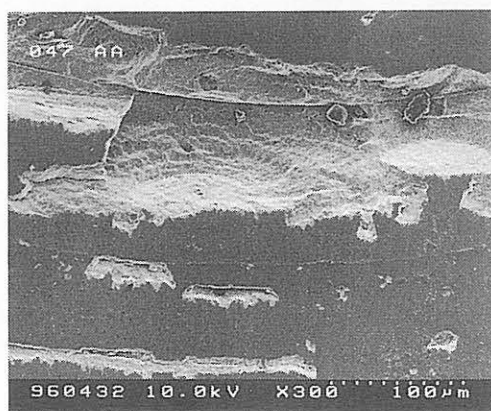


Abb. 80
REM-Aufnahme einer grob polierten ZrO_2 -Probe nach der Wälzbeanspruchung in Wasser

In der REM-Aufnahme ist zu erkennen, dass es zu Materialausbrüchen entlang der konischen Risslinien kommt, es treten schollenförmige Abplatzungen auf. Somit eignet sich der Werkstoff HIP- ZrO_2 nicht für eine Wälzanwendung mit Wasser als Zwischenstoff.

7.5.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff HIP- ZrO_2

Die Wälzverschleißuntersuchungen an dem Werkstoff HIP- ZrO_2 in Paraffinöl und in Wasser zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse.

In Paraffinöl erweist sich der Werkstoff HIP- ZrO_2 als tribologisch sehr stabil und gut geeignet für die Wälzbeanspruchung. Die ermittelten Verschleißbeträge sind sehr gering und liegen im unteren 10^{-9} bis in den 10^{-10} -Bereich für k_v [mm^3/Nm]. Bei sehr fein bearbeiteten Funktionsflächen kann auch nach 20 Millionen Überrollungen kaum eine Veränderung in der Verschleißspur ermittelt werden. In Wasser dagegen erweist sich der Werkstoff HIP- ZrO_2 aufgrund seiner mangelnden hydrothermalen Beständigkeit für den Wälzverschleiß als ungeeignet.

7.6 LPS-SiC (SiC-B)

Mit dem Flüssigphasen gesinterten (LPS) SiC wurden erste Untersuchungen unter Wälzbelastung in Paraffinöl durchgeführt.

7.6.1 Untersuchungen in Paraffinöl

Nach den ersten Wälzverschleißuntersuchungen mit einer anfänglichen Hertzschen Pressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ stellte sich heraus, dass auch der Werkstoff LPS-SiC für die Wälzbelastung mit solch einer hohen Flächenpressung wenig geeignet erscheint. Ein Versuch bei der hohen Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ wurde nach einer Überrollungszahl von einer Million beendet. Bei den folgenden Versuchen wurde deshalb analog zu den Untersuchungen an dem Werkstoff SSiC eine anfängliche Hertzsche Flächenpressung von $P_0 = 1,5 \text{ GPa}$ gewählt, was gemäß der Hertzschen Formel eine Normalkraft von $F_N = 205 \text{ N}$ ergab (vgl. Tabelle 7).

7.6.1.1 Reibung

Die Reibungszahl ändert sich für die grob bearbeiteten Funktionsflächen stärker als für die feiner bearbeiteten. Jedoch ist auch anzumerken, dass die grob geschliffenen Wälzkörper bei der doppelt so hohen anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ untersucht wurden. Zwischen den grob und fein geläpten Oberflächen ist nach dem Einlauf jedoch kein Unterschied mehr bzgl. der Reibungszahl erkennbar (s. Abb. 81). Die grob polierten Probekörper weisen ein von den anderen Wälzkörpern verschiedenes Reibverhalten auf.

Das Absinken der Reibungszahl mit zunehmender Anzahl der Überrollungen ist bei den Probekörpern mit der größeren anfänglichen Hertzschen Pressung ausgeprägter, sie weisen einen um $\Delta f \approx 0,05$ geringeren Endwert der Reibungszahl auf.

Einzig bei den polierten Wälzkörpern ist ein Anstieg der Reibungszahl mit zunehmender Überrollungszahl zu verzeichnen.

7.6.1.2 Verschleiß

Der Verschleißbetrag zeigt eine starke Abhängigkeit von dem Zeitspanvolumen, d. h. von der Art der gewählten Endbearbeitung und damit auch von der Oberflächenrauheit der Probekörper (vgl. Abb. 82). Für den Werkstoff LPS-SiC ist der Unterschied zwischen den feinen Endbearbeitungsverfahren (polieren) und den gröberen Verfahren (schleifen, läppen) frappant, der Verschleißbetrag liegt um einen Faktor 100 höher für die gröberen Verfahren. Die gröberen Verfahren wie Schleifen, Honen und Läppen zeigen unter der Wälzbeanspruchung ähnliche Verschleißbeträge mit $k_v \approx 1 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Die polierten Wälzproben zeigen einen Verschleißbetrag von $k_v \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, was im Bereich für Werkstoffe liegt, die üblich für den Wälzverschleiß eingesetzt werden, wie z. B. HIP-Si₃N₄.

Die grob geschliffenen Probekörper sind mit einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ untersucht worden. Bei dieser Belastung unterscheidet sich der ermittelte Verschleißkoeffizient nur geringfügig für die ver-

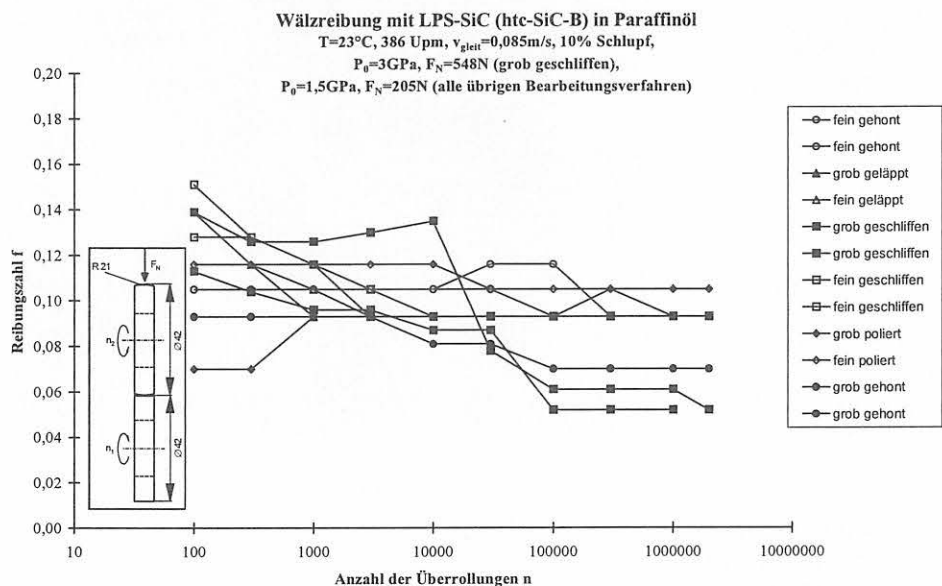


Abb. 81
Reibungszahl f in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen n für den Werkstoff LPS-SiC unter Wälzbeanspruchung in Paraffinöl

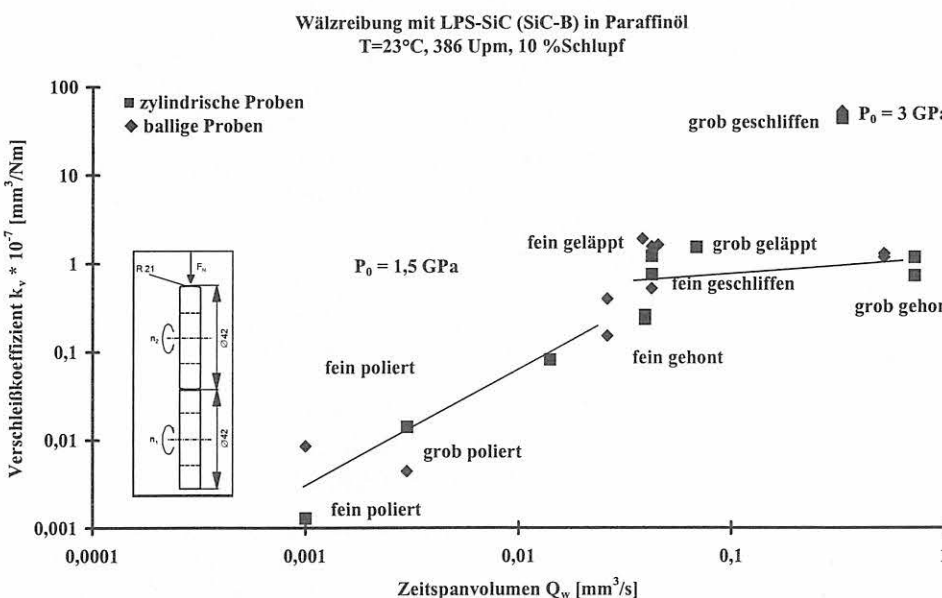


Abb. 82
Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit vom Zeitspanvolumen bei der Oberflächenendbearbeitung des Werkstoffs LPS-SiC

Wälzreibung mit SiC-B in Paraffinöl
 $P_0=1,5\text{GPa}$, $F_N=205\text{N}$, $T=23^\circ\text{C}$, 386 Upm , $v_{\text{glit}}=0,085\text{m/s}$, $n=2 \cdot 10^6$, 10% Schlupf
 (grob geschliffene Probekörper: $F_N=548\text{N}$, $P_0=3\text{GPa}$)

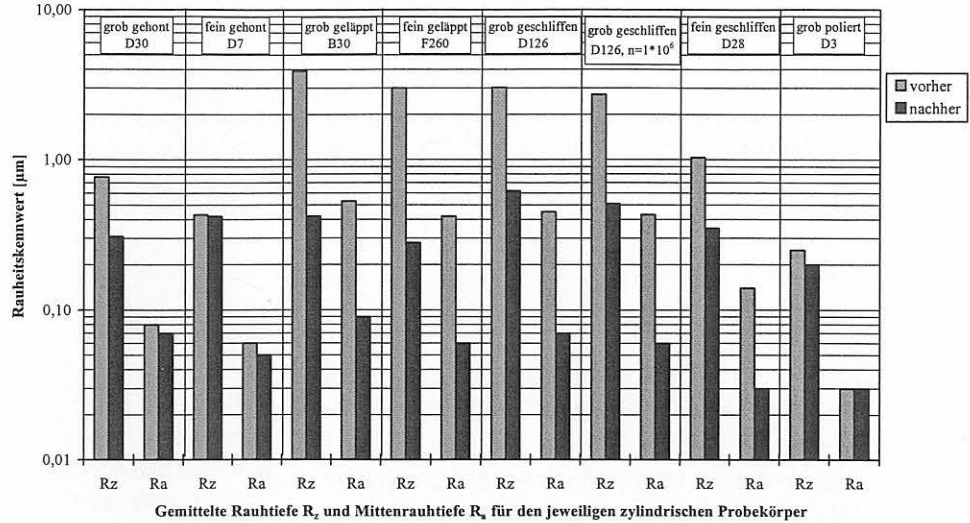


Abb. 83
 Änderung der gemittelten Rauhtiefe R_z und der Mittenrauhtiefe R_a durch die Wälzbelastung für den Werkstoff LPS-SiC in Paraffinöl

schiedenen Überrollungszahlen von 1 bzw. 2 Millionen. Im Vergleich mit dem gesinterten SiC-Werkstoff (EKasic D) weisen die grob geschliffenen LPS-SiC-Probekörper einen höheren Verschleißwert auf. Die geläpften Probekörper erreichen bei gleicher anfänglicher Hertzscher Flächenpressung von $P_0 = 1,5\text{ GPa}$ einen vergleichbaren Verschleißwert. Die polierten Probekörper weisen bei einer Flächenpressung von $P_0 = 1,5\text{ GPa}$ ebenfalls einen sehr geringen Verschleißbetrag auf.

7.6.1.3 Oberflächenrauheiten

Werden die gemittelte Rauhtiefe R_z und die Mittenrauhtiefe R_a vor und nach der Wälzbelastung betrachtet, so ist ein geringer Unterschied der Rauheiten bei den grob bzw. fein geläpften Funktionsflächen zu beobachten. Da die Rauheiten der fein geläpften und der grob geschliffenen Probekörper nach der Endbearbeitung der Oberflächen nahezu gleich sind, lässt sich an diesen Probekörpern auch der Einfluss der unterschiedlichen anfänglichen Hertzschen Flächenpressung beobachten. Trotz der geringeren Flächenpressung im Falle der fein geläpften Wälzkörper ist eine stärkere Abnahme der Rauheiten zu beobachten als bei den grob geschliffenen. Die grob polierten Funktionsflächen weisen kaum noch eine Änderung der gemittelten Rauhtiefe R_z und der Mittenrauhtiefe R_a durch die tribologische Belastung auf. Je niedriger die anfänglichen Oberflächenrauheiten sind, desto weniger ändern sich diese unter der tribologischen Beanspruchung, was bereits bei den fein gehonten Probenoberflächen sichtbar wird.

Auch für diesen Werkstoff können Rauheitskennwerte angegeben werden, für die nur noch eine geringe Änderung durch das Einlaufverhalten erreicht wird. Für eine gemittelte Rauhtiefe ist der Wert $R_z \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$ und für die Mittenrauhtiefe $R_a \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

7.6.1.4 Oberflächenanalytik

Im Vergleich zu den gesinterten SSiC-Proben nimmt die Rauheit bei den LPS-SiC-Proben für alle Bearbeitungsarten durch die Wälzbelastung ab bzw. bleibt konstant für die sehr fein bearbeiteten Oberflächen. Der Verschleißbetrag der geschliffenen LPS-SiC-Proben bei einer anfänglichen

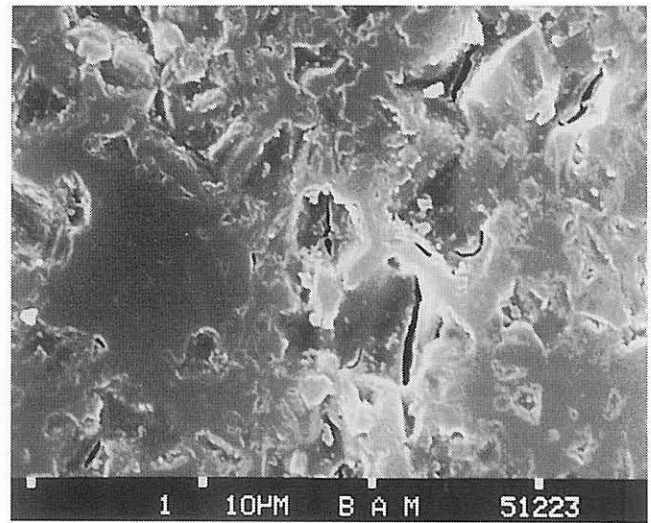


Abb. 84
 REM-Aufnahme der Tribospur der grob geschliffene, zylindrischen Probe nach dem Wälzverschleiß ($P_0 = 3\text{ GPa}$, $F_N = 548\text{ N}$, $n = 2 \cdot 10^6$ Überrollungen)

Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 3\text{ GPa}$ liegt um zwei Größenordnungen über dem der gesinterten SSiC-Proben. Bei der reduzierten Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 1,5\text{ GPa}$ sind die Verschleißbeträge für die Werkstoffe SSiC und LPS-SiC vergleichbar bei $k_v \approx 1 \cdot 2 \cdot 10^{-7}\text{ mm}^3/\text{Nm}$.

In der REM-Aufnahme (Abb. 84) ist deutlich zu erkennen, dass es durch die Wälzbelastung zur Rissbildung kommt. Zum Teil kommt es zur Glättung der Oberfläche wie links in Abb. 84 zu sehen ist. Die Risse führen in einigen Bereichen der Tribospur zum Ausplatzen des Materials, dadurch würde es bei einer weiter fortgesetzten Wälzbelastung evtl. zu Materialversagen und Pitting kommen.

7.6.2 Zusammenfassung der Untersuchungen an dem Werkstoff LPS-SiC

Der Werkstoff LPS-SiC ist ebenfalls wie auch der Werkstoff SSiC nur mit einer modifizierten anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 1,5\text{ GPa}$ für den Wälzverschleiß

geeignet. Für diese geringere Flächenpressung zeigen die fein bearbeiteten (polierten) Funktionsflächen ein gutes Verschleißverhalten, die Verschleißbeträge liegen dann bei $k_v \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

Für gröber bearbeitete Funktionsflächen ist kein signifikanter Unterschied in den Verschleißbeträgen erkennbar, hier kann dann die wirtschaftlichere Variante der Bearbeitung mit dem größeren Zeitspanvolumen gewählt werden.

Unter der Wälzbelastung zeigen die fein gehonten Oberflächen ein gutes Verschleißverhalten und eine nur geringe Abnahme der Oberflächenrauheiten und damit auch im Anwendungsfalle nur eine geringe Spielzunahme. Dieses Verhalten der fein gehonten Oberflächen erweist sich als günstig, wenn Verschleißbetrag und Ökonomie ins Verhältnis gesetzt werden.

8 Vergleich und Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Die gewonnen Erkenntnisse über das Wälzverschleißverhalten der verschiedenen keramischen Werkstoffe sollen nun miteinander in Beziehung gesetzt werden. Zusätzlich wurden Untersuchungen mit dem als Wälzstahl gut eingeführten und untersuchten Werkstoff 100Cr6 durchgeführt, um eine Vergleichsmöglichkeit gegenüber einem bekannten Werkstoff zu bekommen.

geringe Zunahme des Spiels durch Einlauf bei rauen Oberflächen für die jeweilige Anwendung akzeptabel oder feiner endzubearbeiten ist.

8.1 Vergleich der Untersuchungsergebnisse in Paraffinöl

Die Ingenieurkeramiken HIP-Si₃N₄, GPS-Si₃N₄-TiN und HIP-ZrO₂ sind für den Wälzverschleiß in Paraffinöl gut geeignet (vgl. Abb. 85). Der Werkstoff ZrO₂ zeigt den geringsten Verschleißbetrag im Vergleich zu den anderen Materialien. Bei all diesen Werkstoffen kann auf eine Bearbeitung „best-as-possible“ verzichtet werden, wenn eine geringe Spielzunahme durch das Einlaufverhalten akzeptabel ist.

Die Keramiken neigen im Gegensatz zu den Stahlproben weniger zu adhäsivem Verschleiß und Pitting. Die verbesserte Verschleißbeständigkeit der keramischen Werkstoffe ermöglicht den Einsatz von Zwischenmedien ohne Additive, wie das bei den hier vorgestellten Versuchen eingesetzte Paraffinöl.

Die auf SiC basierenden Werkstoffe zeigen im Vergleich zu den oben genannten Materialien einen höheren Verschleißbetrag. Der Werkstoff GPS-SiC-TiC zeigt ein Verschleißverhalten, das stark abhängig von der Bearbeitungsart ist. Es ergibt sich ein Übergang von einer Verschleißhochlage vom Läppen zu einer Verschleißtieflage beim Polieren (kleine Zeitspanvolumina) und Schleifen (größere Zeitspanvolumina). Somit ist der Werkstoff SiC-TiC ebenfalls gut für die Wälzbeanspruchung geeignet, wobei eine Endbearbeitung der Funktionsfläche mittels Läppen ausgeschlossen werden sollte.

Der Verschleißbetrag der Ingenieurkeramiken hängt entscheidend von der Endbearbeitung und der damit verbundenen erzielten Oberflächenrauheit ab. Für alle untersuchten keramischen Werkstoffe – mit Ausnahme von SSiC bei der anfänglichen Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ – ist der Verschleißbetrag bei kleinen reduzierten Spitzenhöhen R_{pk} so gering, dass der Konstrukteur entscheiden kann, ob eine

Sowohl SSiC als auch LPS-SiC sind unter Wälzbelastung nur für eine geringere anfängliche Hertzsche Flächenpressung von $P_0 = 1,5 \text{ GPa}$ geeignet. Das Verschleißverhalten des Flüssigphasen gesinterten Werkstoffs ist ver-

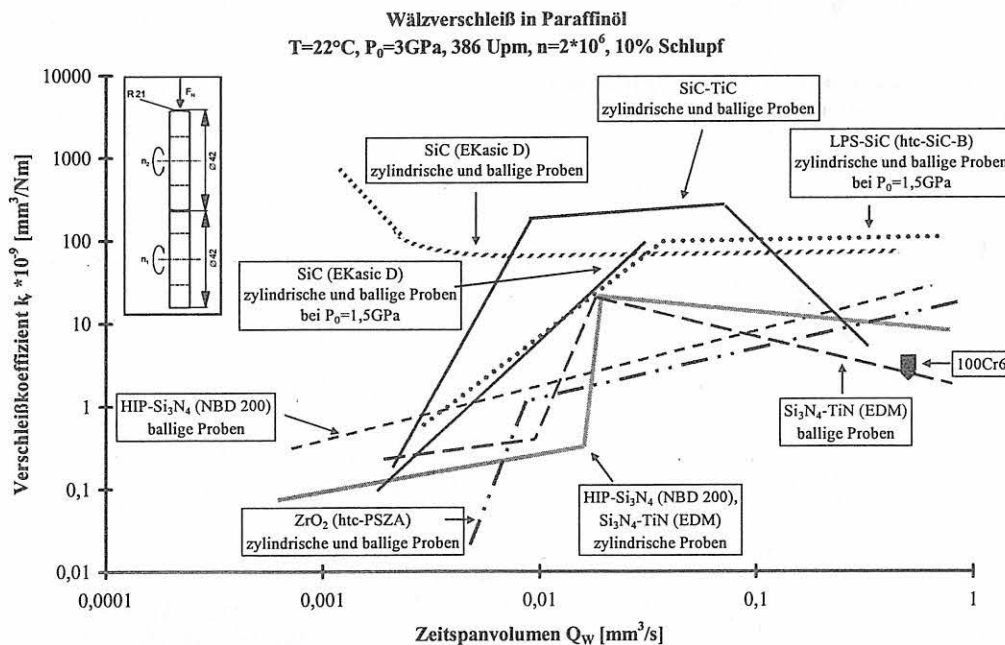


Abb. 85 Wälzreibung in Paraffinöl mit verschiedenen keramischen Werkstoffen

gleichbar mit dem des einfach gesinterten SiC, obwohl das LPS-SiC über eine höhere Bruchzähigkeit K_{IC} und Biegebruchfestigkeit σ_{4Bb} verfügt. Beide Werkstoffe zeigen bei einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 1,5 \text{ GPa}$ eine Abnahme des Verschleißbetrages proportional zu kleiner werdenden Zeitspanvolumina, was auch eine feinere Endbearbeitung bedeutet. Für polierte Funktionsflächen liegen die Verschleißbeträge im Bereich von $k_v < 1 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, was vergleichbar ist mit Werten für die Werkstoffe HIP-Si₃N₄ oder GPS-Si₃N₄-TiN.

Für eine anfängliche Hertzsche Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ zeigt SSiC einen Anstieg des Verschleißbetrages für kleiner werdende Zeitspanvolumina, d. h. für feinere Endbearbeitungen. Polierte Oberflächen zeigen hierbei das ungünstigste Verschleißverhalten. Der Anstieg des Verschleißbetrags wird begleitet von dem Anstieg der Oberflächenrauheiten durch die tribologische Beanspruchung (vgl. Kapitel 7.3.1.3).

Die Untersuchungen in Paraffinöl zeigen, dass die meisten der keramischen Werkstoffe vorteilhaft gegenüber 100Cr6 unter Wälzbelastung eingesetzt werden können. Nur die SiC-

Werkstoffe weisen einen höheren Verschleißbetrag auf. Werkstoffe wie HIP-ZrO₂, HIP-Si₃N₄ oder GPS-Si₃N₄-TiN sind dem Wälzstahl im Verschleißverhalten überlegen, zumal hierbei zu beachten ist, dass aus apparativen Gründen der Wälzstahl 100Cr6 nur mit einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 2 \text{ GPa}$ belastet werden konnte.

Mit Paraffinöl als Zwischenmedium zeigen die SiC-Werkstoffe und die Si₃N₄-Werkstoffe incl. ZrO₂ jeweils Gemeinsamkeiten, so dass diese Werkstoffgruppen jeweils getrennt betrachtet wurden. Da die Oberflächenrauheiten ein Maß für das Endbearbeitungsverfahren sind, wurde der Verschleißbetrag in Abhängigkeit von der reduzierten Spitzenhöhen R_{pk} analysiert.

Bei den für den Wälzverschleiß gut geeigneten Werkstoffen Si₃N₄, Si₃N₄-TiN und ZrO₂ ist ein ähnliches Verschleißverhalten in Abhängigkeit von der reduzierten Spitzenhöhen R_{pk} zu verzeichnen. Je geringer die Oberflächenrauheit, desto geringer ist auch der Verschleißbetrag. In Abb. 86 erweist sich der Verlauf der Verschleißbeträge als diagonal verlaufendes Band mit einer Streubreite, in der die Werte für alle Werkstoffe liegen. Jedoch ist zu bemerken, dass für den

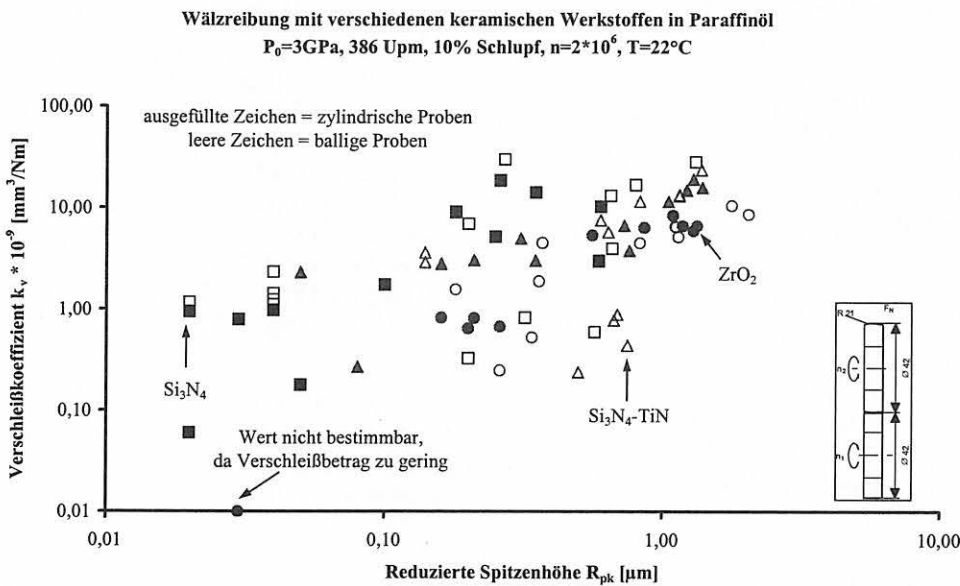


Abb. 86
 Wälzreibung mit den keramischen Werkstoffen Si₃N₄, Si₃N₄-TiN und ZrO₂

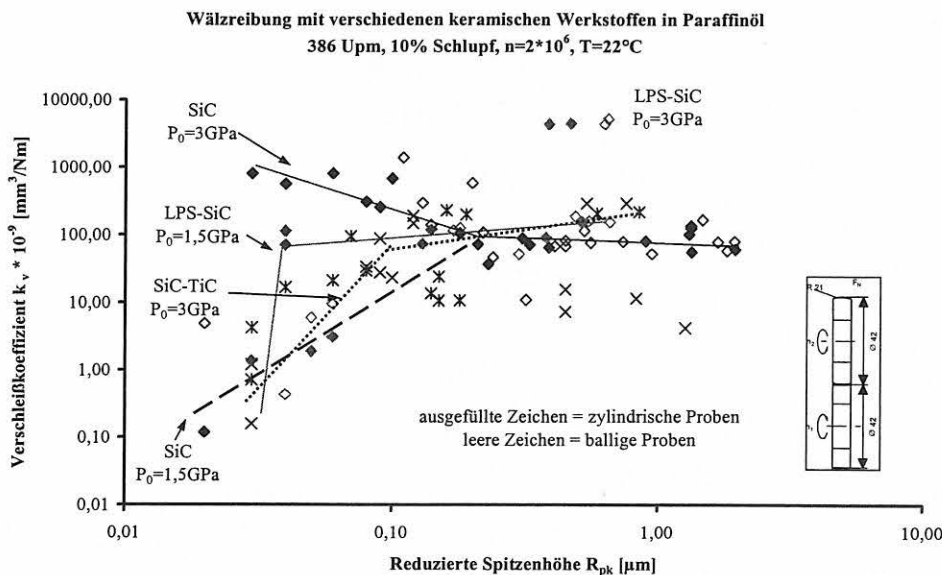


Abb. 87
 Wälzverschleiß in Paraffinöl mit SSiC, LPS-SiC und SiC-TiC

Werkstoff ZrO_2 für sehr fein bearbeitete (polierte) Oberflächen keine Verschleißbeträge ermittelt werden konnten (s. auch Abb. 76).

Solch ein einheitliches Bild der Verschleißbeträge in Abhängigkeit von der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} zeigen die SiC-Werkstoffe nicht.

Die Werkstoffe SSiC und LPS-SiC zeigen eine Abnahme des Verschleißbetrages für Spitzenhöhen $R_{pk} < 0,1 \mu m$ bei einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 1,5 \text{ GPa}$. Bei $P_0 = 3 \text{ GPa}$ zeigt SSiC einen Anstieg des Verschleißbetrags für kleiner werdende Spitzenhöhen, dagegen zeigt SiC-TiC wie die anderen Werkstoffe bei $P_0 = 1,5 \text{ GPa}$ eine Abnahme des Verschleißbetrags. In Abb. 87 ist erkennbar, dass unabhängig von der anfänglichen Hertzschen Flächenpressung die auf SiC basierenden Werkstoffe ähnliche Verschleißbeträge im Bereich von $k_v = 1 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ für $R_{pk} > 0,1 \mu m$ aufweisen.

Für die Untersuchungen in Paraffinöl lässt sich zusammenfassen, dass es nicht immer notwendig sein wird, die feinste Bearbeitungsmethode anzuwenden. In der Regel lassen sich auch mit Bearbeitungsverfahren wie Feinschleifen günstige Verschleißbeträge erzielen. Da solch ein Endbearbeitungsverfahren ein höheres Zeitspanvolumen aufweist, ist es ökonomisch vorteilhafter als Polieren, wenn eine geringe Spielzunahme des Bauteils für die Anwendung akzeptabel ist.

In früheren Untersuchungen konnte eine Abhängigkeit des Verschleißes von der Bruchzähigkeit K_{IC} festgestellt werden [42, 44]. Da sich für alle Werkstoffe das Endbearbeitungsverfahren Feinschleifen als vorteilhaft herausstellte, wurde für dieses Verfahren exemplarisch die erwähnte Abhängigkeit von der Bruchzähigkeit K_{IC} überprüft. Die Bruchzähigkeit K_{IC} für die einzelnen Werkstoffe ist Tabelle 2 zu entnehmen. Um eine Aussage treffen zu können, wurden nur Ergebnisse der Untersuchungen in Paraffinöl bei einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ verwendet.

In Abb. 88 lässt sich eine Abhängigkeit der Verschleißbeträge von der Bruchzähigkeit erkennen. Der Verschleißbetrag k_v nimmt umgekehrt proportional zur Bruchzähigkeit K_{IC} ab.

8.2 Vergleich der Untersuchungsergebnisse in Wasser

Das Reibungsverhalten der keramischen Werkstoffe unter Wasserschmierung ist anders als bei Schmierung mit Paraffinöl [45]. Die Reibungszahl bei Wasserschmierung liegt in der Regel höher.

Bei dem Werkstoff HIP- Si_3N_4 findet eine Glättung der in Kontakt befindlichen Funktionsfläche statt, somit ergibt sich eine Verringerung der Reibungszahl mit zunehmender Anzahl der Überrollungen bis nach ca. $n = 50\,000$ Überrollungen ein stationärer Zustand erreicht ist und sich die Reibungszahl nur noch geringfügig ändert. Dies ist auch aus Abb. 89 ersichtlich.

Der Werkstoff SiC weist eine nahezu konstante Reibungszahl auf, welche sich im Bereich zwischen $f = 0,18$ und $f = 0,14$ bewegt (s. Abb. 89). Die entstehenden Risse bei SiC sind auf die Sprödigkeit des Werkstoffs bei der gewählten Pressung zurückzuführen.

Wasser ist für die Schmierung von ZrO_2 ungeeignet. Mit zunehmender Überrollungszahl steigt die Reibungszahl stetig an, so dass nur geringe Überrollungszahlen von 10000 bzw. 30000 erreicht werden konnten (vgl. Abb. 89). Dies ist durch das zunehmende Pitting erklärbar, welches wiederum durch die hohen auftretenden Schubspannungen bei ansteigender Reibungszahl zu erklären ist. Ebenfalls ist die hydrothermale Beständigkeit von ZrO_2 unzureichend.

Si_3N_4 -TiN kann ebenfalls nicht unter Wasserschmierung eingesetzt werden. Die TiN-Phase löst sich in Wasser unter der Bildung von Titanhydroxid. Dadurch kommt es z. T. schon nach wenigen Überrollungen zu Ausbrüchen und dem Versagen des Materials durch Bruch. Je größer die Funktionsflächen bearbeitet wurden, desto schneller ist mit einem Materialversagen zu rechnen.

Für den Werkstoff SiC-TiC zeigt sich ein Anstieg der Reibungszahl bis ca. 10000 Überrollungen, anschließend bleibt

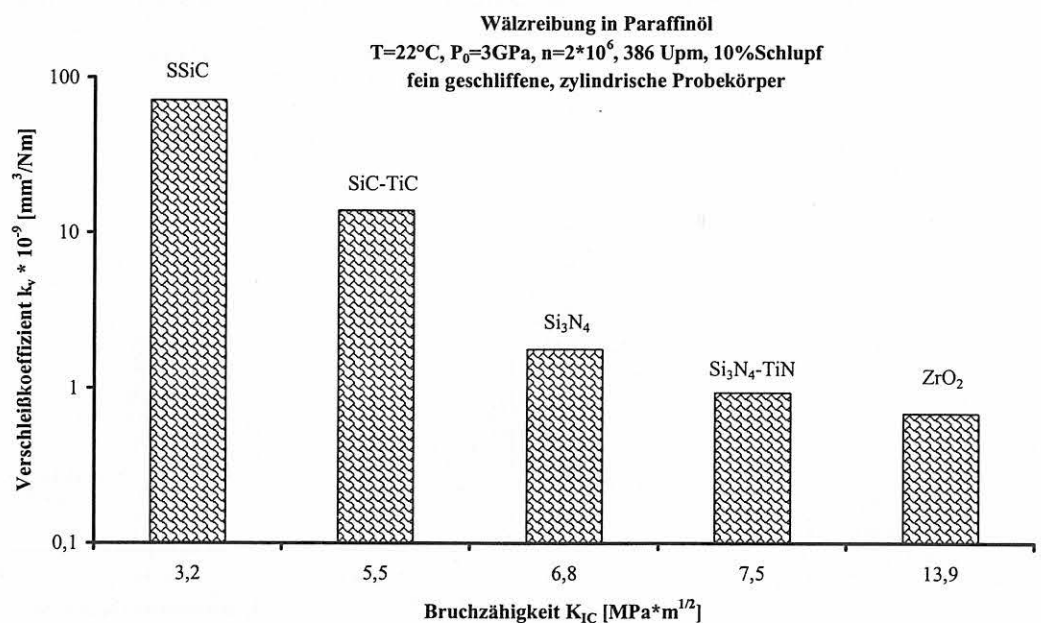


Abb. 88
 Wälzreibung in Paraffinöl mit verschiedenen keramischen Werkstoffen, Verschleißbeträge für die fein geschliffenen zylindrischen Probekörper

Wälzreibung mit verschiedenen keramischen Werkstoffen in Wasser
 $T=23^{\circ}\text{C}$, $P_0=3\text{GPa}$, 386 Upm, $v_{\text{gleit}}=0,085\text{m/s}$, 10% Schlupf

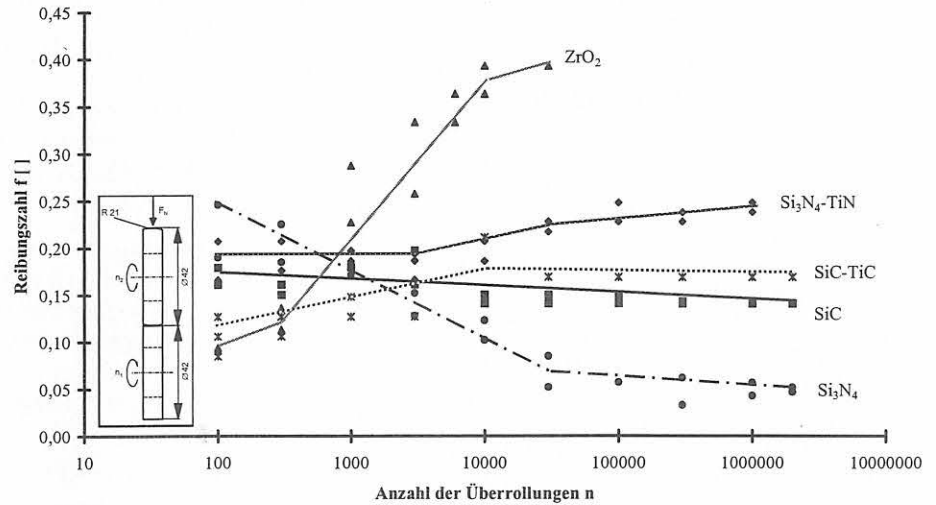


Abb. 89
 Ausgewählte und typische Verläufe der Reibungszahlen für die verschiedenen Keramiken unter Wasserschmierung

die Reibungszahl in etwa konstant. Der Wert für die Reibungszahl bleibt immer unterhalb von $f = 0,2$.

Als einziges Material ist HIP-Si₃N₄ in Wasser einsetzbar und es kommt weder zu Pitting noch zu Versagen durch Bruch. Allerdings ist hierbei auch zu beachten, dass unter der Schmierung mit demineralisiertem Wasser der Verschleißbetrag um zwei Größenordnungen über dem mit Paraffinölschmierung liegt [45].

Bei dem Werkstoff Si₃N₄-TiN konnte der Verschleißbetrag nicht ermittelt werden, da es zum Versagen durch Bruch der Probe kam. Nach der Wälzbelastung sind die Ausbrüche gut mit dem bloßen Auge zu erkennen.

Auch bei dem Werkstoff SiC ist unter Wasserschmierung bei einer anfänglichen Hertzschen Pressung von 3 GPa eine starke Pittingbildung nach zwei Millionen Überrollungen festzustellen, so dass für den balligen Probekörper kein Verschleißbetrag angegeben werden kann. Der zylindrische Probekörper weist einen Verschleißbetrag im Bereich von $30 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ auf und ist mit dem von SiC in Paraffinöl vergleichbar [46].

Aufgrund der hohen Reibungszahlen (s. o.) bei dem Werkstoff ZrO₂ mussten die tribologischen Tests bei Überrollungs-

zahlen von 10000 bzw. 30000 abgebrochen werden. Völlig konträr zum sehr guten Verschleißverhalten in Paraffinöl [16] lag der Verschleißbetrag für alle Probekörper bei $2 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ und damit um bis zu fünf Zehnerpotenzen höher. Das beginnende Pitting machte eine Fortführung der tribologischen Beanspruchung unmöglich. Bei ZrO₂ war eine Abhängigkeit von der Bearbeitung der Funktionsflächen insofern zu erkennen, als der Test um so früher beendet werden musste, je grober die Oberflächenrauheit und somit das gewählte Bearbeitungsverfahren waren. Die balligen Probekörper wiesen zu starkes Pitting auf, so dass eine profilometrische Auswertung nicht möglich war.

Die auswertbaren Verschleißbeträge sind in Abb. 90 zusammengefasst. Gut ersichtlich ist, dass die Werkstoffe, bei denen es zu Pitting kommt (SiC und ZrO₂), einen hohen Verschleißbetrag unter der Wälzbeanspruchung aufweisen. Bei SiC konnte nur an den zylindrischen Probekörpern planimetrisch der Verschleißbetrag bestimmt werden.

Der Werkstoff HIP-Si₃N₄ zeigt in Wasser beim Verschleißbetrag eine Abhängigkeit von der Probengeometrie und der Endbearbeitung der Funktionsfläche. Die feiner bearbeiteten Oberflächen zeigen nach zwei Millionen Überrollungen einen um etwa eine Größenordnung geringeren Verschleiß-

Wälzverschleiß verschiedener keramischer Werkstoffe in Wasser
 $T=23^{\circ}\text{C}$, $P_0=3\text{GPa}$, 386 Upm, $v_{\text{gleit}}=0,085\text{m/s}$, 10% Schlupf
 Zum Vergleich ein Eintrag von 100Cr6

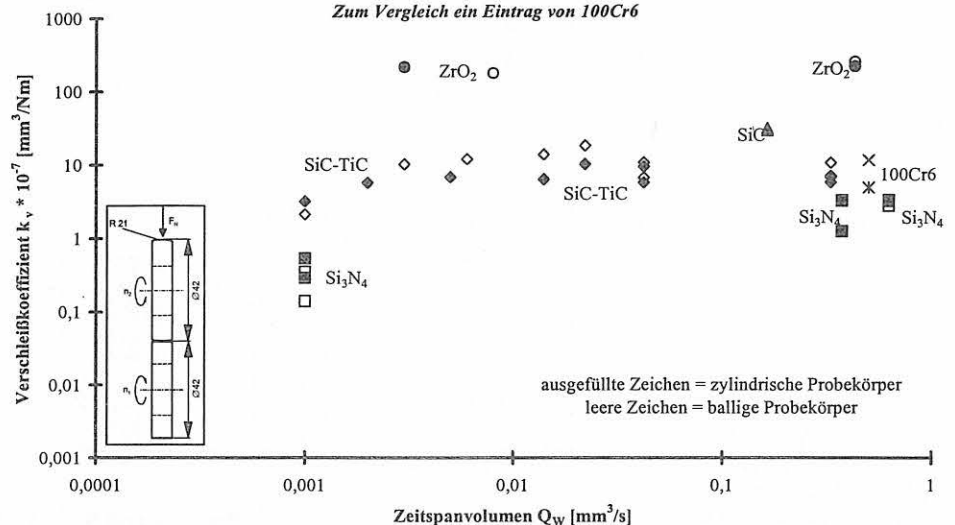


Abb. 90
 Wälzbeanspruchung von verschiedenen keramischen Probekörpern. Unterscheidung in Werkstoffe und Geometrie der Probekörper

betrag als die grob bearbeiteten Probekörper. Innerhalb der groben Endbearbeitung ergaben sich keine signifikanten Unterschiede im Verschleißverhalten. Die Abhängigkeit von der Endbearbeitung der Funktionsfläche konnte bereits bei Untersuchungen in Paraffinöl nachgewiesen werden³². Allerdings sind die Unterschiede bzgl. der verschiedenen Probengeometrien im Verschleißverhalten bei Wälzbeanspruchung in Wasser nicht so ausgeprägt wie in Paraffinöl.

Der Werkstoff SiC-TiC zeigt ähnlich wie HIP-Si₃N₄ ein gutes Verschleißverhalten unter Wälzbeanspruchung in Wasser. Zwar liegen die Verschleißbeträge um ca. eine Zehnerpotenz höher als bei HIP-Si₃N₄, jedoch kann eine Überrollungszahl von $n \geq 1 \cdot 10^6$ Überrollungen bei einer anfänglichen Hertzschen Flächenpressung von $P_0 = 3 \text{ GPa}$ erreicht werden. In der Verschleißspur von SiC-TiC zeigen sich nach höheren Überrollungszahlen ebenfalls konische Risse, die jedoch vorerst nicht zu Pitting führen, da sich durch die Wälzbeanspruchung eine verschleißmindernde TiO_xC_y-Phase ausbildet.

Wenn eine starke Bildung von konischen Rissen und Pitting eingesetzt hat, wird die Abhängigkeit des Verschleißbetrages von der Probengeometrie ebenfalls nihilisiert, wie dies bei ZrO₂ in Abb. 90 zu erkennen ist.

Im Vergleich zu den keramischen Werkstoffen wurde auch der Wälzlagerstahl 100Cr6 in Wasser bei 2 GPa untersucht. Die fein oder grob geschliffenen Probekörper wiesen einen Verschleißbetrag für den zylindrischen Probekörper von $4,94 \cdot 10^{-7} \text{ [mm}^3/\text{Nm]}$ und von $11,70 \cdot 10^{-7} \text{ [mm}^3/\text{Nm]}$ für den balligen Probekörper auf. Damit liegt der Verschleißbetrag des Wälzlagerstahls bei einer ähnlicher Bearbeitung wie die von HIP-Si₃N₄ in der gleichen Größenordnung, wobei die Verschleißbeträge von HIP-Si₃N₄ bei 3 GPa etwas geringer sind. Die etwas geringeren Verschleißbeträge von HIP-Si₃N₄ sprechen für eine gute Einsetzbarkeit der Keramik in einer ähnlichen Anwendung, die bisher mit Wälzlagerstählen durchgeführt wurde.

Die bei der Endbearbeitung der Funktionsflächen erzielten Rauheiten sind eng mit dem Zeitspanvolumen bei der Endbearbeitung gekoppelt, je gröber die Funktionsfläche, desto größer ist auch in der Regel das Zeitspanvolumen. Die

Oberflächenrauheit der Funktionsfläche beeinflusst das Verschleißverhalten des Bauteils, was mit Paraffinöl als Zwischenmedium bereits nachgewiesen werden konnte [32].

Bei HIP-Si₃N₄ ergibt sich ein Einfluss der erzeugten Oberflächenrauheit auf die Verschleißbeträge. Größere reduzierte Spitzenhöhen bewirken auch einen höheren Verschleißbetrag und korrelieren mit Bearbeitungsverfahren, die eine größere Oberflächenrauheit produzieren, wie Schleifen und Honen. Die polierten Oberflächen mit geringeren reduzierten Spitzenhöhen zeigen auch einen geringeren Verschleißbetrag.

In Wasser ist bei dem Werkstoff HIP-Si₃N₄ eine feinere Endbearbeitung der Funktionsfläche für die Wälzbeanspruchung auch von Vorteil (vgl. Abb. 91).

Bei HIP-Si₃N₄ kommt es zu einer Glättung der Funktionsfläche unter der tribologischen Belastung in Wasser. Je gröber die Funktionsfläche bearbeitet wurde, desto stärker ist die Glättung. Hierbei kann der Einlauf als zusätzliche „Bearbeitung“ der Bauteiloberfläche genutzt werden, falls eine Zunahme des Spiels akzeptabel ist. Bei den fein bearbeiteten Funktionsflächen (grob poliert) ist die Abnahme der Oberflächenrauheiten nur gering.

In Abb. 91 ist deutlich zu erkennen, dass es keinen Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleißbetrag bei ZrO₂ und SiC gibt, da es zu Pitting kommt.

Obwohl sich bei dem Werkstoff SiC-TiC nach einer Million Überrollungen kein Pitting gebildet hat, zeigt auch dieser Werkstoff eine Konstanz des Verschleißkoeffizienten gegenüber der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} , wie dies auch bei den Werkstoffen SiC und ZrO₂ zu beobachten ist. Dies kann zur Ursache haben, dass sich bei dem Werkstoff SiC-TiC unter der Wälzbelastung eine Prozessrauheit ausbildet, die unabhängig von der Bearbeitung ist und das Verschleißverhalten beeinflusst.

Somit ist der mit einem feinen Endbearbeitungsverfahren (wie z. B. Polieren) bearbeitete Werkstoff HIP-Si₃N₄ die einzige der untersuchten Ingenieurkeramiken, die auch unter Wälzreibung bei Wassersmierung eingesetzt werden kann, ohne dass es zu einem Versagen des Bauteils kommt.

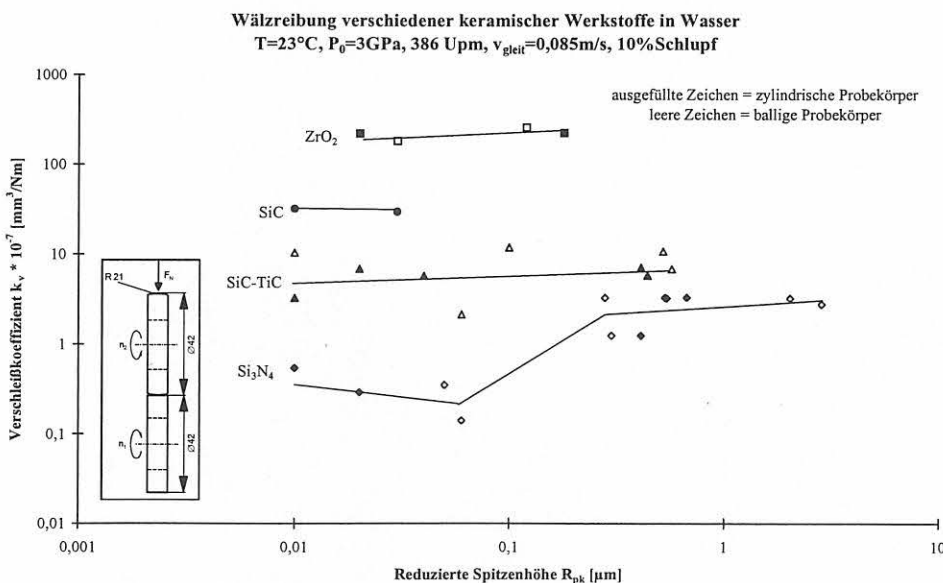


Abb. 91 Verschleißbetrag in Abhängigkeit von der reduzierten Spitzenhöhe vor dem Versuch für die untersuchten Keramiken unter Wälzbeanspruchung in Wasser

Wälzreibung mit verschiedenen keramischen Werkstoffen in Wasser
 T = 23°C, P₀ = 3 GPa, 386 Upm, 10% Schlupf, v_{gleit} = 0,085

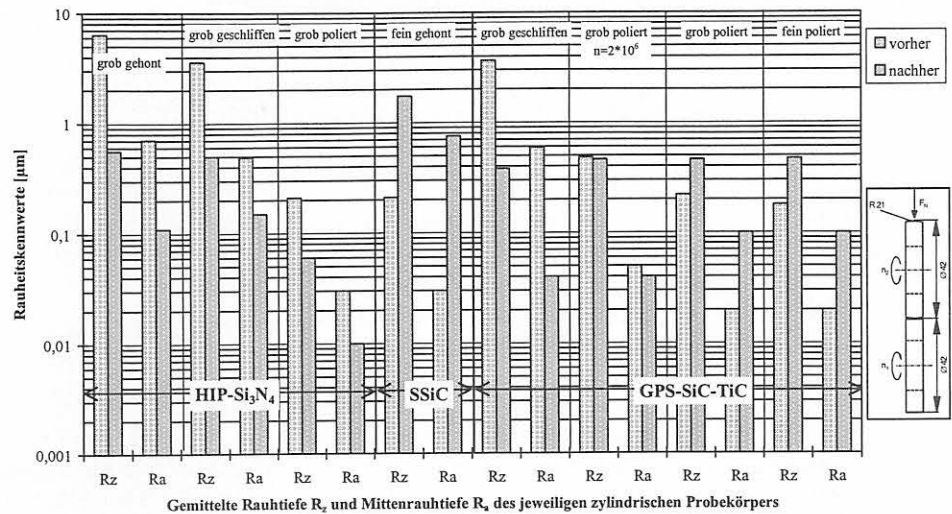


Abb. 92
 Rauheitskennwerte vor und nach der tribologischen Beanspruchung in Wasser für die verschiedenen keramischen Werkstoffe

Werden die gemittelte Rauhtiefe R_z und die Mittenrauhtiefe R_a vor und nach der Wälzbeanspruchung für den jeweiligen zylindrischen Probekörper betrachtet, so zeigt sich deutlich der Unterschied für den Werkstoff ohne Pitting (HIP-Si₃N₄) und den mit Pitting (SiC).

In Abb. 92 zeigt der Werkstoff SiC, bei dem es zu Pitting und konischen Rissen unter der tribologischen Beanspruchung in Wasser kommt, einen Anstieg der Oberflächenrauheit um eine Größenordnung.

Für den Werkstoff SiC-TiC zeigt sich kein einheitliches Verhalten der Oberflächenrauheiten durch den Einlauf. Die gröber bearbeiteten Funktionsflächen weisen nach dem Einlauf eine Glättung der Oberfläche auf, die fein bearbeiteten Oberflächen dagegen eine Zunahme der Rauheiten. Dies ist vergleichbar mit dem Werkstoff SSiC: je feiner er endbearbeitet wurde, desto verschleißbeständiger zeigte er sich unter der Wälzbelastung: Zwar bildet die TiC-Phase eine verschleißmindernde Schicht heraus, die jedoch nicht so stabil ist, dass ein für den Wälzverschleiß geeigneter Werkstoff entstanden ist.

Von den untersuchten Werkstoffen, HIP-Si₃N₄, GPS-Si₃N₄-TiN, GPS-SiC-TiC, HIP-ZrO₂ und SSiC, kann nur HIP-Si₃N₄

für die Wälzbeanspruchung unter Wasserschmierung vorteilhaft gegenüber 100Cr6 bei einer anfänglichen Pressung von 3 GPa eingesetzt werden.

Bei Si₃N₄-TiN löst sich die TiN-Phase in Wasser über Titanhydroxid auf, es kommt zu Rissen, Ausbrüchen und somit zum Materialversagen. Die Werkstoffe SiC und ZrO₂ zeigen bei der Wälzbeanspruchung in Wasser konische Risse und Pitting, so dass ein Einsatz unter Wasserschmierung die Bauteilzuverlässigkeit mindert. SiC-TiC ist zwar verschleißbeständiger als das reine SSiC, zeigt jedoch ebenfalls eine Rissbildung (vgl. Abb. 68), was bei einer länger andauernden Wälzbelastung zu einem Materialversagen führen würde.

Nur Si₃N₄ zeigt ein stabiles tribologisches Verhalten ohne adhäsive Verschleißerscheinungsformen. Zwar liegt der Verschleißbetrag um zwei Größenordnungen über dem bei Paraffinöl-Schmierung, jedoch tritt kein Materialversagen durch Bruch oder Pitting auf. Die tribologisch beanspruchten Oberflächen von HIP-Si₃N₄ erfahren eine Glättung unter Wasserschmierung durch den Einlauf bei der Wälzbelastung.

9 Anhang

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s]	Grundkörper R _Z [μm] R _a [μm]	Grundkörper R _{vk} [μm] R _{pk} [μm]	Gegenkörper R _Z [μm] R _a [μm]	Gegenkörper R _{vk} [μm] R _{pk} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _v bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., planer Körper	k _v bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., runder Körper	k _v bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr. Gesamt	Grundkörper R _a [μm] R _a [μm] In Spur
ZO 002 ZO 021	grob gehont D 30	0,373	3,87 0,47	1,30 0,26	5,43 0,74	2,19 0,27	0,054	0,064	18,70 * 10 ⁻⁹	30,20 * 10 ⁻⁹	48,90 * 10 ⁻⁹	1,58 0,47
ZO 065 ZO 035	grob gehont D 30	0,373	3,26 0,40	0,95 0,35	6,09 0,82	1,99 0,65	0,128	0,066	14,20 * 10 ⁻⁹	13,20 * 10 ⁻⁹	27,40 * 10 ⁻⁹	
ZO 008 ZO 070	fein gehont D 7	0,018	0,36 0,05	0,08 0,04	0,42 0,05	0,11 0,04	0,052	0,043	0,98 * 10 ⁻⁹	2,33 * 10 ⁻⁹	3,31 * 10 ⁻⁹	
ZO 007 ZO 075	fein gehont D 7	0,018	0,37 0,05	0,09 0,04	0,48 0,05	0,17 0,04	0,024	0,024	0,99 * 10 ⁻⁹	1,24 * 10 ⁻⁹	2,23 * 10 ⁻⁹	
ZO 024 ZO 028	grob geschliffen D 64	0,623	2,03 0,27	0,40 0,25	9,41 1,41	2,14 1,31	0,116	0,109	5,20 * 10 ⁻⁹	28,50 * 10 ⁻⁹	33,70 * 10 ⁻⁹	0,61 0,11
ZO 051 ZO 022	grob geschliffen D 64	0,623	1,67 0,22	0,35 0,18	7,68 1,20	1,69 0,80	0,147	0,121	9,12 * 10 ⁻⁹	16,87 * 10 ⁻⁹	25,99 * 10 ⁻⁹	
ZO 096 ZO 079	fein geschliffen D 15	0,005	0,44 0,06	0,09 0,05	0,48 0,08	0,11 0,04	0,085	0,081	0,18 * 10 ⁻⁹	1,43 * 10 ⁻⁹	1,61 * 10 ⁻⁹	
ZO 053 ZO 095	fein geschliffen D 15	0,005	0,96 0,14	0,20 0,10	2,37 0,40	0,49 0,32	0,083	0,081	1,76 * 10 ⁻⁹	0,83 * 10 ⁻⁹	2,59 * 10 ⁻⁹	0,29 0,04
ZO 010 ZO 057	grob geläppt F 240	0,036 0,037	4,54 0,71	0,94 0,73	5,66 0,87	1,24 0,89	0,100	0,085	13,13 * 10 ⁻⁹	4,46 * 10 ⁻⁹	17,59 * 10 ⁻⁹	0,94 0,14
ZO 029 ZO 048	grob geläppt PWB 30	0,032	4,52 0,70	0,93 0,59	5,11 0,78	1,26 0,66	0,097	0,085	3,00 * 10 ⁻⁹	4,00 * 10 ⁻⁹	9,00 * 10 ⁻⁹	
ZO 032 ZO 018	grob geläppt PWB 30	0,032	4,26 0,63	0,91 0,60	4,21 0,61	0,89 0,57	0,095	0,085	10,30 * 10 ⁻⁹	0,60 * 10 ⁻⁹	10,90 * 10 ⁻⁹	0,96 0,19
ZO 050 ZO 054	fein geläppt PWB 7	0,004	0,37 0,05	0,12 0,03	2,03 0,28	0,51 0,20	0,090	0,083	0,79 * 10 ⁻⁹	7,00 * 10 ⁻⁹	7,79 * 10 ⁻⁹	0,34 0,05
ZO 061 ZO 057	fein geläppt PWB 7	0,004	0,41 0,06	0,14 0,02	1,59 0,22	0,32 0,20	0,090	0,081	0,95 * 10 ⁻⁹	0,33 * 10 ⁻⁹	1,28 * 10 ⁻⁹	
ZO 007 ZO 075	grob poliert D 3	0,0007	0,18 0,03	0,04 0,02	0,40 0,05	0,15 0,02	0,090	0,081	0,06 * 10 ⁻⁹	1,17 * 10 ⁻⁹	1,23 * 10 ⁻⁹	0,18 0,02
ZO 065 ZO 021	grob poliert D 3	0,0007	0,23 0,03	0,05 0,02	0,48 0,06	0,18 0,04	0,083	0,081	nicht auswertbar	nicht auswertbar	nicht auswertbar	

Wälzreibung in Paraffinöl mit HIP-Si₃N₄ (NBD 200)

$F_N = 1005 \text{ N}$, $P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2$, $v_{\text{diff}} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 Prozent
 $n_{\text{ges}} = 2 * 10^6$, $s_{\text{gleit}} = 26.390 \text{ m}$, $r.h. = 30\text{-}39 \text{ Prozent}$

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbel- -tung	Zeitpa- nungs- volumen [mm ³ /s]	Grund- körper R _Z [μm] R _c [μm]	Grund- körper R _{rk} [μm] R _{pk} [μm]	Gegen- körper R _Z [μm] R _c [μm]	Gegen- körper R _{rk} [μm] R _{pk} [μm]	f bei Be- ginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] plani- metrisch, Gesamt	Grund- körper R _c [μm] R _c [μm] in Spur
ZO 023 ZO 019	grob gehont D 30	0,373	6,40 0,71	2,81 0,54	5,49 0,72	2,30 0,28	0,246	0,047	3,27 * 10 ⁻⁷	3,31 * 10 ⁻⁷	6,58 * 10 ⁻⁷	0,56 0,11
ZO 005 ZO 043	grob gehont D 30	0,373	3,62 0,40	0,97 0,41	4,48 0,58	1,52 0,30	0,235	0,052	1,26 * 10 ⁻⁷	1,26 * 10 ⁻⁷	2,52 * 10 ⁻⁷	
ZO 071 ZO 037	grob ge- schliffen D 64	0,623	3,59 0,49	1,02 0,67	12,33 2,21	3,94 2,03	0,194	0,057	3,34 * 10 ⁻⁷	3,26 * 10 ⁻⁷	6,60 * 10 ⁻⁷	0,50 0,15
ZO 047 ZO 038	grob ge- schliffen D 64	0,623	3,06 0,55	0,61 0,53	12,20 2,18	2,48 2,85	0,190	0,052	3,33 * 10 ⁻⁷	2,78 * 10 ⁻⁷	6,11 * 10 ⁻⁷	
ZO 015 ZO 016	grob poliert D 3	0,0007	0,21 0,03	0,04 0,02	0,44 0,06	0,13 0,06	0,071	0,021	0,29 * 10 ⁻⁷	0,14 * 10 ⁻⁷	0,43 * 10 ⁻⁷	0,06 0,01
ZO 068 ZO 070	grob poliert D 3	0,0007	0,15 0,02	0,04 0,01	0,39 0,05	0,11 0,05	0,095	0,005	0,54 * 10 ⁻⁷	0,35 * 10 ⁻⁷	0,89 * 10 ⁻⁷	0,06 0,01

Wälzreibung in Wasser mit HIP-Si₃N₄ (NBD 200)

$F_N = 1005 \text{ N}$, $P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2$, $v_{diff} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 Prozent
 $n_{ges} = 2 * 10^6$, $s_{gleit} = 26.390 \text{ m}$, $r.h. = 30 - 39 \text{ Prozent}$

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s]	Grundkörper R _Z [μm] R _a [μm]	Grundkörper R _a [μm] R _{pm} [μm]	Gegenkörper R _Z [μm] R _a [μm]	Gegenkörper R _a [μm] R _{pm} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., Gesamt	Grundkörper R _a [μm] R _a [μm] in Spur
021 AE 020 AE	grob gehont D 46	0,438	3,09 0,37	1,05 0,19	3,26 0,42	0,83 0,47	0,112	0,083	11,25 * 10 ⁻⁹	11,53 * 10 ⁻⁹	22,78 * 10 ⁻⁹	0,59 0,15
022 AE 019 AE	grob gehont D 46	0,438	3,94 0,44	1,22 0,20	3,61 0,38	1,15 0,22	0,112	0,091	15,03 * 10 ⁻⁹	13,07 * 10 ⁻⁹	28,10 * 10 ⁻⁹	0,52 0,13
014 AE 004 AE	fein gehont D 7	0,011	0,30 0,03	0,07 0,03	0,78 0,08	0,20 0,04	0,091	0,095	n.b.	n.b.	n.b.	0,14 0,02
012 AE 003 AE	fein gehont D 7	0,011	0,34 0,04	0,08 0,03	0,62 0,06	0,14 0,04	0,091	0,095	0,27 * 10 ⁻⁹	3,62 * 10 ⁻⁹	3,88 * 10 ⁻⁹	0,15 0,02
AE 021 AE 019	grob geschliffen D 126	0,85	3,13 0,42	0,76 0,28	3,62 0,55	0,67 0,71	0,095	0,087	3,78 * 10 ⁻⁹	0,78 * 10 ⁻⁹	4,57 * 10 ⁻⁹	0,58 0,13
AE 022 AE 020	grob geschliffen D 126	0,85	2,97 0,40	0,73 0,24	3,10 0,50	0,64 0,54	0,095	0,087	6,69 * 10 ⁻⁹	5,76 * 10 ⁻⁹	12,45 * 10 ⁻⁹	
033 AE 006 AE	fein geschliffen D 15	0,025	1,76 0,25	0,35 0,24	3,24 0,58	0,60 0,50	0,093	0,085	3,03 * 10 ⁻⁹	7,58 * 10 ⁻⁹	10,61 * 10 ⁻⁹	
010 AE 018 AE	fein geschliffen D 15	0,025	1,74 0,27	0,31 0,20	2,93 0,52	0,69 0,41	0,093	0,085	5,00 * 10 ⁻⁹	0,89 * 10 ⁻⁹	5,89 * 10 ⁻⁹	0,42 0,07
024 AE(2) ¹ 031 AE(2)	fein geschliffen ² D 15	0,010 0,008	0,83 0,11	0,14 0,10	1,19 0,17	0,27 0,16	0,093	0,087	0,93 * 10 ⁻⁹	n.b.	n.b.	
032 AE (2) 009 AE	grob geläppt F 240	0,072 0,059	5,97 0,93	1,09 0,88	7,43 1,19	1,58 1,05	0,099	0,081	25,56 * 10 ⁻⁹	31,49 * 10 ⁻⁹	57,05 * 10 ⁻⁹	0,58 0,10
007 AE 009 AE F _N =1005N	grob geläppt PWB 30	0,020	6,23 0,93	1,29 0,96	5,41 0,87	1,38 0,79	0,104	0,085	19,23 * 10 ⁻⁹	23,64 * 10 ⁻⁹	42,87 * 10 ⁻⁹	0,71 0,09
029 AE 027 AE	grob geläppt PWB 30	0,046 0,047	5,71 0,88	1,39 0,58	5,40 0,81	1,15 0,83	0,095	0,089	15,83 * 10 ⁻⁹	13,46 * 10 ⁻⁹	29,29 * 10 ⁻⁹	0,36 0,07
008 AE 006 AE F _N =1005N	fein geläppt PWB 7	0,010	1,17 0,15	0,21 0,17	1,62 0,48	0,75 0,23	0,104	0,085	3,06 * 10 ⁻⁹	0,44 * 10 ⁻⁹	3,50 * 10 ⁻⁹	0,31 0,04
032 AEX ¹ 015 AEX	fein geläppt PWB 7	0,004 0,002	0,84 0,09	0,16 0,13	1,36 0,17	0,50 0,25	0,091	0,093	2,82 * 10 ⁻⁹	0,24 * 10 ⁻⁹	3,06 * 10 ⁻⁹	
023 AE 030 AE	grob poliert D 3	0,029 0,034	0,17 0,02	0,03 0,02	0,39 0,05	0,10 0,03	0,091	0,081	n.b.	n.b.	n.b.	0,13 0,02
023 AE(2) 030 AE(2)	grob poliert D 3	0,002 0,006	0,24 0,03	0,05 0,03	0,45 0,21	0,14 0,07	0,089	0,087	2,31 * 10 ⁻⁹	0,58 * 10 ⁻⁹	2,90 * 10 ⁻⁹	
024 AE 031 AE	fein poliert D 1	0,019 0,058	0,19 0,02	0,03 0,02	0,32 0,04	0,09 0,03	0,095	0,091	0,08 * 10 ⁻⁹	n.b.	n.b.	0,15 0,02

n.b.: nicht bestimmbar

Wälzreibung in Paraffinöl mit Si₃N₄-TiN (EDM):

$F_N = 1150 \text{ N}$, $P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2$, $v_{diff} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 Prozent
 $n_{ges} = 2 * 10^6$, $s_{gleit} = 26.390 \text{ m}$, $r.h. = 30\text{-}39 \text{ Prozent}$

¹ Funktionsfläche zum zweiten Mal bearbeitet

² geschliffen mit Läppgeschwindigkeit

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s]	Grundkörper R _Z [μm] R _a [μm]	Grundkörper R _{vk} [μm] R _{pk} [μm]	Gegenkörper R _Z [μm] R _a [μm]	Gegenkörper R _{vk} [μm] R _{pk} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., Gesamt	Grundkörper R _a [μm] R _a [μm] in Spur
016 AE 017 AE	grob gehont D 46	0,435	3,67 0,50	0,84 0,47	2,38 0,31	0,65 0,20	0,207					Pumpe defekt; Abbruch
011 AE 005 AE F _N = 480N	fein gehont D 7	0,011	0,29 0,03	0,06 0,03	0,63 0,06	0,15 0,04	0,149	0,099	13,51 * 10 ⁻⁷	63,86 * 10 ⁻⁷	77,37 * 10 ⁻⁷	
028 AE 025 AE	grob geläppt PWB 30	0,040 0,052	5,68 0,83	1,20 0,79	5,67 0,79	1,13 0,80	0,207	n.b. 1 * 10 ⁶ , 0,238	n.b., Ermüdung	n.b., Ermüdung		n.b., Ermüdung
008 AE 026 AE	fein geläppt PWB 7	0,008 0,009	0,88 0,28	0,20 0,15	1,00 0,12	0,33 0,12	0,166	n.b. 1 * 10 ⁶ , 0,248	n.b., Ermüdung	n.b., Ermüdung		n.b., Ermüdung

Wälzreibung in Wasser mit Si₃N₄-TiN (EDM)

$F_N = 1150 \text{ N}$, $P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2$, $v_{diff} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 Prozent
 $n_{ges} = 2 * 10^6$, $s_{gleit} = 26.390 \text{ m}$, $r.h. = 30\text{-}39 \text{ Prozent}$
 n.b. = nicht bestimmbar

Wälzreibung in Paraffinöl mit SiC (EKasic D)

$$F_N = 665 \text{ N}, P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2, v_{\text{diff}} = 0,085 \text{ m/s}, n = 386 \text{ Upm}, \text{Schlupf} = 10 \%, n_{\text{ges}} = 2 * 10^6, \\ S_{\text{gleit}} = 26.390 \text{ m}, r.h. = 30 - 39 \%$$

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s] (zyl./ba.)	Grundkörper R _Z [μm] R _o [μm]	Grundkörper R _o [μm] R _{pk} [μm]	Gegenkörper R _Z [μm] R _o [μm]	Gegenkörper R _o [μm] R _{pk} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _z bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, runder Körper	k _g bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, Gesamt	Grundkörper R _z [μm] R _o [μm] in Spur
AR 097 AR 092	grob gehont D 30	0,48	4,44 0,55	1,31 0,34	3,30 0,40	0,74 0,31	0,122	0,082	102,76 * 10 ⁹	79,17 * 10 ⁹	181,93 * 10 ⁹	0,62 0,10
AR 095 AR 094	grob gehont D 30	0,48	1,14 0,09	0,21 0,07	1,58 0,14	0,41 0,08	0,140	0,086	72,95 * 10 ⁹	68,00 * 10 ⁹	140,96 * 10 ⁹	
AR 095 AR 094	fein gehont D 7	0,164	0,41 0,06	0,09 0,05	1,03 0,10	0,32 0,08	0,093	0,072	260,00 * 10 ⁹	11,00 * 10 ⁹	271,00 * 10 ⁹	0,83 0,20
AR 096 AR 091	fein gehont D 7	0,164	0,33 0,04	0,08 0,02	0,95 0,10	0,19 0,06	0,093	0,072	312,00 * 10 ⁹	53,00 * 10 ⁹	365,00 * 10 ⁹	0,46 0,07
bm 015 bm 029	grob ge- schliffen D 126	0,74	5,80 0,91	1,33 0,52	6,58 1,06	1,47 0,93	0,125	0,090	138,47 * 10 ⁹	169,24 * 10 ⁹	307,71 * 10 ⁹	0,84 0,16
bm 020 bm 026	grob ge- schliffen D 126	0,74	6,27 0,87	1,33 0,57	8,18 1,47	1,68 1,26	0,140	0,090	128,08 * 10 ⁹	79,92 * 10 ⁹	208,00 * 10 ⁹	
bm 012 bm 014	fein ge- schliffen D 15	0,03	1,70 0,19	0,31 0,19	2,10 0,25	0,45 0,22	0,115	0,079	89,36 * 10 ⁹	82,64 * 10 ⁹	172,00 * 10 ⁹	0,59 0,10
bm 021 bm 024	fein ge- schliffen D 15	0,03	1,84 0,17	0,33 0,18	2,26 0,31	0,53 0,26	0,115	0,079	71,31 * 10 ⁹	114,75 * 10 ⁹	186,06 * 10 ⁹	
bm 03 AR 026	grob geläppt PWB 30	0,061 0,031	6,59 0,89	1,34 0,88	7,43 1,06	1,94 0,62	0,233	0,179	57,43 * 10 ⁹	81,07 * 10 ⁹	138,50 * 10 ⁹	0,29 0,08
bm 010 bm 016	grob geläppt PWB 30	0,019 0,028	7,20 0,98	1,95 0,76	5,70 0,68	1,82 0,30	0,129	0,093	62,21 * 10 ⁹	59,10 * 10 ⁹	121,31 * 10 ⁹	
bm 01 bm 02	fein geläppt PWB 7	0,003	1,73 0,16	0,39 0,10	1,70 0,18	0,45 0,12	0,100	0,079	64,79 * 10 ⁹	67,81 * 10 ⁹	133,00 * 10 ⁹	0,64 0,12
bm 011 bm 025	fein geläppt PWB 7	0,002	2,74 0,29	0,90 0,11	2,17 0,19	0,56 0,07	0,122	0,082	81,20 * 10 ⁹	76,33 * 10 ⁹	157,53 * 10 ⁹	
bm 07 bm 09	grob poliert D 3	0,002	0,38 0,03	0,10 0,02	0,49 0,05	0,14 0,03	0,086	0,072	688,95 * 10 ⁹	1409,74 * 10 ⁹	2098,69 * 10 ⁹	0,39 0,11
AR 095 AR 019	grob poliert D 3	0,002	0,35 0,05	0,06 0,04	0,85 0,08	0,20 0,04	0,179	0,143	824,65 * 10 ⁹	587,29 * 10 ⁹	1411,9 * 10 ⁹	0,43 0,06
bm 05 AR 087	fein poliert D 1	0,003 0,001	0,15 0,02	0,04 0,01	0,42 0,03	0,13 0,01	0,197	0,172	576,80 * 10 ⁹	299,15 * 10 ⁹	875,95 * 10 ⁹	n.b., da Pitting zu stark
bm 04 AR 074	fein poliert D 1	0,001 0,002	0,12 0,01	0,03 0,01	0,52 0,10	0,11 0,09	0,197	0,161	818,93 * 10 ⁹	1403,50 * 10 ⁹	2232,43 * 10 ⁹	n.b., da Pitting zu stark
bm 011 [§] AR 094 [§]	grob geläppt PWB 30/ grob poliert D 3	0,02 0,002	6,39 0,87	1,33 0,88		0,48 0,14 0,02	0,143	0,072	476,44 * 10 ⁹	590,67 * 10 ⁹	1067,11 * 10 ⁹	0,61 0,10

n.b.: nicht bestimmbar

§ ein zweites Mal bearbeitet

anhang05

Wälzreibung in Paraffinöl mit SiC (EKasic D)

$F_N = 250 \text{ N}$, $P_0 = 1500 \text{ N/mm}^2$, $v_{diff} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 %, $n_{ges} = 2 \cdot 10^6$,
 $s_{gleit} = 26.390 \text{ m}$, r.h. = 30 - 39 %

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s]	Grundkörper R _Z [µm] R _a [µm]	Grundkörper R _{vk} [µm] R _{pk} [µm]	Gegenkörper R _Z [µm] R _a [µm]	Gegenkörper R _{vk} [µm] R _{pk} [µm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, Gesamt	Grundkörper R _Z [µm] R _a [µm] in Spur
bm 018 bm 019	fein geschliffen D 15	0,03	1,29 0,14	0,22 0,18	2,31 0,34	0,52 0,22	0,133	0,095	105,96 * 10 ⁻⁹	108,18 * 10 ⁻⁹	214,14 * 10 ⁻⁹	0,33 0,09
bm 017 bm 027	fein geschliffen D 15	0,03	1,53 0,16	0,25 0,23	2,13 0,28	0,45 0,24	0,133	0,105	37,02 * 10 ⁻⁹	46,91 * 10 ⁻⁹	83,93 * 10 ⁻⁹	0,44 0,07
bm 06 AR 083	fein poliert D 1	0,002 0,007	0,26 0,03	0,07 0,02	0,52 0,05	0,17 0,02	0,105	0,105	nicht auswertbar	nicht auswertbar	nicht bestimmbar	
bm 06 AR 083*	fein poliert D 1	0,002 0,007	0,26 0,03	0,07 0,02	0,52 0,05	0,17 0,02	0,095	0,086	0,12 * 10 ⁻⁹	4,90 * 10 ⁻⁹	5,02 * 10 ⁻⁹	

* n_{ges} = 20*10⁶

sicp03.doc

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s]	Grundkörper R _Z [µm] R _a [µm]	Grundkörper R _{vk} [µm] R _{pk} [µm]	Gegenkörper R _Z [µm] R _a [µm]	Gegenkörper R _{vk} [µm] R _{pk} [µm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., Gesamt	Grundkörper R _Z [µm] R _a [µm] in Spur
AR 097 AR 092	fein gehont D 7	0,164	0,31 0,04	0,07 0,03	0,91 0,09	0,18 0,06	0,161	0,143	29,61 * 10 ⁻⁷	nicht auswertbar	nicht bestimmbar	
AR 098 AR 093	fein gehont D 7	0,164	0,21 0,03	0,05 0,01	0,88 0,09	0,19 0,08	0,179	0,143	31,81 * 10 ⁻⁷	nicht auswertbar	nicht bestimmbar	1,74 0,75

Wälzreibung in Wasser mit SiC (EKasic D)

$F_N = 665 \text{ N}$, $P_0 = 3 \text{ GPa}$, $v_{diff} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 Prozent,
 $n_{ges} = 2 \cdot 10^6$, $s_{gleit} = 26.390 \text{ m}$, r.h. = 30-39 Prozent
 n.b. = nicht bestimmbar

Wälzreibung in Paraffinöl mit SiC-TiC

$$F_N = 563 \text{ N}, P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2, v_{\text{diff}} = 0,085 \text{ m/s}, n = 386 \text{ Upm}, \text{Schlupf} = 10 \%, n_{\text{Ges}} = 2 \cdot 10^6, \\ S_{\text{gleit}} = 26.390 \text{ m}, r.h. = 30 - 39 \%$$

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitpaun- gungsvolumen [mm ³ /s] (zyl./ba.)	Grund- körper R _Z [μm] R _a [μm]	Grund- körper R _{cs} [μm] R _{ps} [μm]	Gegen- körper R _Z [μm] R _a [μm]	Gegen- körper R _{cs} [μm] R _{ps} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _s bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planmetrisch, planer Körper	k _s bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planmetrisch, runder Körper	k _s bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planmetrisch, Gesamt	Grund- körper R _a [μm] R _s [μm] ln Spur
024 AD [§] 018 AD [§]	grob gehont D 15	0,003 0,002	0,34 0,04	0,07 0,04	1,15 0,15	0,24 0,08	0,093	0,085	17,07 * 10 ⁹	34,07 * 10 ⁹	51,13 * 10 ⁹	0,36 0,07
026 AD [§] 020 AD [§]	grob gehont D 15	0,006 0,002	0,65 0,07	0,12 0,06	1,17 0,16	0,26 0,10	0,101	0,093	21,56 * 10 ⁹	23,52 * 10 ⁹	45,08 * 10 ⁹	0,34 0,07
027 AD [§] 025 AD [§]	fein gehont D 7	0,007 0,003	0,82 0,09	0,15 0,08	1,17 0,13	0,28 0,09	0,101	0,089	29,89 * 10 ⁹	28,01 * 10 ⁹	57,90 * 10 ⁹	0,29 0,08
028 AD [§] 029 AD [§]	fein gehont D 7	0,010 0,0003	0,66 0,22	0,12 0,07	1,25 0,14	0,29 0,09	0,106	0,085	96,43 * 10 ⁹	89,01 * 10 ⁹	185,43 * 10 ⁹	0,24 0,03
027 AD [§] 018 AD [§]	grob ge- schliffen D 126	0,33	4,04 0,64	0,64 0,57	4,56 0,86	0,85 0,64	0,152	0,085	50,83 * 10 ⁹	59,28 * 10 ⁹	110,11 * 10 ⁹	0,49 0,05
024 AD [§] 025 AD [§]	grob ge- schliffen D 126	0,33	4,08 0,64	0,88 0,73	4,52 0,84	0,80 0,82	0,110	0,085	79,86 * 10 ⁹	68,15 * 10 ⁹	148,00 * 10 ⁹	0,51 0,05
026 AD 020 AD*	grob ge- schliffen D 30	0,32	1,19 0,19	0,32 0,18	3,23 0,76	0,74 0,45	0,097	0,085	10,81 * 10 ⁹	7,31 * 10 ⁹	18,12 * 10 ⁹	0,69 0,10
024 AD 018 AD	grob ge- schliffen D 30	0,32	1,14 0,16	0,25 0,15	3,66 0,83	0,82 0,45	0,097	0,085	10,80 * 10 ⁹	15,50 * 10 ⁹	26,30 * 10 ⁹	0,61 0,07
028 AD 025 AD	fein ge- schliffen D 15	0,33	0,93 0,12	0,24 0,15	4,30 1,03	0,74 0,83	0,093	0,085	24,29 * 10 ⁹	11,52 * 10 ⁹	35,82 * 10 ⁹	0,55 0,06
027 AD 029 AD	fein ge- schliffen D 15	0,33	1,04 0,15	0,24 0,14	4,84 1,01	0,68 1,27	0,093	0,089	13,79 * 10 ⁹	4,24 * 10 ⁹	18,03 * 10 ⁹	
016 AD 015 AD	grob geläppt PWB 30	0,044 0,042	4,27 0,65	0,94 0,59	5,07 0,73	1,25 0,54	0,144	0,089	207,46 * 10 ⁹	291,75 * 10 ⁹	499,21 * 10 ⁹	0,24 0,08
016 AD [§] 017 AD [§]	grob geläppt PWB 30	0,061 0,078	6,94 1,02	1,41 0,85	6,41 0,93	1,27 0,76	0,118	0,085	220,51 * 10 ⁹	293,49 * 10 ⁹	514,00 * 10 ⁹	0,90 0,12
019 AD 017 AD	fein geläppt PWB 7	0,005 0,004	1,35 0,18	0,35 0,19	1,68 0,22	0,44 0,12	0,110	0,085	201,28 * 10 ⁹	192,29 * 10 ⁹	393,57 * 10 ⁹	0,23 0,09
019 AD [§] 015 AD [§]	fein geläppt PWB 7	0,004	1,53 0,19	0,30 0,16	1,75 0,21	0,45 0,12	0,127	0,076	231,08 * 10 ⁹	149,10 * 10 ⁹	380,18 * 10 ⁹	0,69 0,14
022 AD 014 AD	grob poliert D 3	0,003	0,23 0,03	0,04 0,03	0,75 0,07	0,19 0,03	0,093	0,093	0,72 * 10 ⁹	1,22 * 10 ⁹	1,94 * 10 ⁹	0,15 0,02
023 AD 012 AD	fein poliert D 1	0,001 0,003	0,25 0,03	0,04 0,03	0,46 0,04	0,13 0,03	0,097	0,097	4,29 * 10 ⁹	0,16 * 10 ⁹	4,44 * 10 ⁹	0,16 0,02

* n = 3,5 · 10⁶

§ ein zweites Mal bearbeitet

SICTICP1.DOC

n.b.: nicht bestimmbar

Wälzreibung in Wasser mit SiC-TiC

$F_N = 563 \text{ N}$, $P_0 = 3 \text{ GPa}$, $v_{\text{diff}} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 %, $n_{\text{ges}} = 1 \cdot 10^6$,
 $s_{\text{gleit}} = 13.195 \text{ m}$, r.h. = 30 - 39 %

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspa- nungs- volumen [mm ³ /s] (zyl/ba.)	Grund- körper R _z [μm] R _a [μm]	Grund- körper R _z [μm] R _{ps} [μm]	Gegen- körper R _z [μm] R _a [μm]	Gegen- körper R _z [μm] R _{ps} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, Gesamt	Grund- körper R _z [μm] R _a [μm] in Spur
028 AD [§] 020 AD [§]	grob ge- schliffen D 126	0,33	3,64 0,59	0,63 0,41	4,27 0,78	0,96 0,57	0,127	0,169	7,16 * 10 ⁻⁷	6,90 * 10 ⁻⁷	14,06 * 10 ⁻⁷	0,38 0,04
026 AD 029 AD	grob ge- schliffen D 126	0,33	3,49 0,55	0,94 0,44	4,419 0,70	0,91 0,52	0,127	0,169	5,83 * 10 ⁻⁷	10,80 * 10 ⁻⁷	16,63 * 10 ⁻⁷	0,63 0,14
026 AD [§] 018 AD [§]	fein ge- schliffen D 28	0,042	0,98 0,17	0,18 0,10	2,53 0,43	0,39 0,38	0,118	0,190	5,70 * 10 ⁻⁷	6,69 * 10 ⁻⁷	12,39 * 10 ⁻⁷	0,22 0,03
024 AD [§] 020 AD [§]	fein ge- schliffen D 28	0,042	1,07 0,15	0,22 0,10	2,99 0,56	0,43 0,54	0,110	0,203	9,42 * 10 ⁻⁷	10,76 * 10 ⁻⁷	20,18 * 10 ⁻⁷	0,44 0,09
019 AD [§] 017 AD [§]	grob geläppt B 30	0,014 0,031	5,06 0,78	1,01 0,62	5,48 0,82	1,49 0,65	0,118	0,186	10,20 * 10 ⁻⁷	18,37 * 10 ⁻⁷	28,58 * 10 ⁻⁷	0,36 0,10
023 AD [§] 015 AD [§]	fein geläppt B 7	0,011 0,018	1,33 0,16	0,37 0,09	1,20 0,13	0,28 0,10	0,118	0,195	6,33 * 10 ⁻⁷	13,84 * 10 ⁻⁷	20,17 * 10 ⁻⁷	0,36 0,10
019 AD 015 AD*	grob poliert D 3	0,005 0,006	0,22 0,02	0,05 0,02	1,03 0,13	0,41 0,10	0,106	0,169	6,82 * 10 ⁻⁷	12,00 * 10 ⁻⁷	18,82 * 10 ⁻⁷	0,46 0,10
023 AD [§] 012 AD [§]	grob poliert D 3	0,002 0,001	0,48 0,05	0,12 0,04	0,89 0,12	0,27 0,06	0,085	0,169	5,77 * 10 ⁻⁷	2,15 * 10 ⁻⁷	7,93 * 10 ⁻⁷	0,46 0,04
016 AD 017 AD	fein poliert D 1	0,001 0,003	0,18 0,02	0,05 0,01	0,44 0,04	0,13 0,01	0,106	0,169	3,24 * 10 ⁻⁷	10,30 * 10 ⁻⁷	13,54 * 10 ⁻⁷	0,47 0,10

§ ein zweites Mal bearbeitet

n.b.: nicht bestimmbar

* n = 2 · 10⁶

SICTICW1.DOC

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s]	Grundkörper R _Z [μm] R _e [μm]	Grundkörper R _κ [μm] R _{κ*} [μm]	Gegenkörper R _Z [μm] R _e [μm]	Gegenkörper R _κ [μm] R _{κ*} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., Gesamt	Grundkörper R _Z [μm] R _e [μm] in Spur
082 AA 072 AA	grob gehont D 30	0,43	4,74 0,53	1,29 0,30	3,29 0,44	0,83 0,30	0,100	0,068	5,95 * 10 ⁻⁹	4,51 * 10 ⁻⁹	10,46 * 10 ⁻⁹	1,17 0,27
090 AA 069 AA	grob gehont D 30	0,43	4,57 0,51	1,33 0,27	2,98 0,43	1,12 0,18	0,097	0,079	6,63 * 10 ⁻⁹	6,50 * 10 ⁻⁹	13,13 * 10 ⁻⁹	
046 AA 035 AA	fein gehont D 7	0,011	0,93 0,10	0,16 0,10	0,98 0,10	0,18 0,07	0,082	0,076	0,83 * 10 ⁻⁹	1,57 * 10 ⁻⁹	2,40 * 10 ⁻⁹	0,40 0,06
092 AA 080 AA	fein gehont D 7	0,011	1,04 0,11	0,20 0,11	1,23 0,13	0,26 0,14	0,083	0,076	0,65 * 10 ⁻⁹	0,25 * 10 ⁻⁹	0,90 * 10 ⁻⁹	
044 AA 030 AA	grob geschliffen D 126	0,89	6,07 0,94	1,18 0,38	8,63 1,48	2,04 0,94	0,094	0,079	6,64 * 10 ⁻⁹	8,66 * 10 ⁻⁹	15,30 * 10 ⁻⁹	1,06 0,32
045 AA 029 AA	grob geschliffen D 126	0,89	5,38 0,81	1,09 0,66	8,10 1,28	1,77 1,21	0,094	0,079	8,42 * 10 ⁻⁹	10,53 * 10 ⁻⁹	18,95 * 10 ⁻⁹	1,25 0,29
050 AA 039 AA	fein geschliffen D 15	0,025	1,30 0,19	0,26 0,19	2,44 0,46	0,34 0,35	0,082	0,076	0,68 * 10 ⁻⁹	0,53 * 10 ⁻⁹	1,21 * 10 ⁻⁹	0,38 0,19
049 AA 031 AA	fein geschliffen D 15	0,025	1,10 0,14	0,21 0,13	2,23 0,41	0,37 0,39	0,082	0,076	0,82 * 10 ⁻⁹	4,53 * 10 ⁻⁹	5,35 * 10 ⁻⁹	
042 AA 071 AA	grob geläppt F 240	0,029	4,74 0,68	1,43 0,37	2,66 0,35	0,89 0,28	0,095	0,076	3,99 * 10 ⁻⁹	6,38 * 10 ⁻⁹	10,38 * 10 ⁻⁹	0,72 0,12
074 AA 079 AA	grob geläppt PWB 30	0,026 0,022	3,55 0,48	0,56 0,82	4,84 0,68	1,14 0,62	0,094	0,079	5,38 * 10 ⁻⁹	5,16 * 10 ⁻⁹	10,54 * 10 ⁻⁹	0,52 0,08
088 AA 037 AA	grob geläppt PWB 30	0,013 0,010	4,61 0,71	0,86 0,70	4,02 0,60	1,11 0,21	0,095	0,076	6,42 * 10 ⁻⁹	6,55 * 10 ⁻⁹	12,97 * 10 ⁻⁹	0,85 0,11
093 AA 077 AA	fein geläppt PWB 7	0,006 0,011	0,28 0,04	0,07 0,03	1,31 0,15	0,31 0,17	0,082	0,077	n.b.	n.b.	n.b.	0,24 0,03
084 AA 036 AA	fein geläppt PWB 7	0,001 0,006	0,89 0,08	0,25 0,04	1,08 0,13	0,36 0,04	0,080	0,076	n.b.	1,90 * 10 ⁻⁹	n.b.	0,36 0,04
087 AA 038 AA	grob poliert D 3	0,006 0,004	0,13 0,02	0,03 0,02	0,20 0,02	0,04 0,02	0,063	0,065	n.b. (auch nach n=10 ⁷)	n.b. (auch nach n=10 ⁷)	n.b. (auch nach n=10 ⁷)	0,13 0,02

n.b.: nicht bestimmbar

Wälzreibung in Paraffinöl mit ZrO₂ (htc-PSZA)

$F_N = 1575 \text{ N}$, $P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2$, $v_{\text{diff}} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 Prozent,
 $n_{\text{ges}} = 2 * 10^6$, $s_{\text{gleit}} = 26.390 \text{ m}$, r.h. = 30-39 Prozent

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s]	Grundkörper R _Z [μm] R _e [μm]	Grundkörper R _κ [μm] R _{κ*} [μm]	Gegenkörper R _Z [μm] R _e [μm]	Gegenkörper R _κ [μm] R _{κ*} [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., runder Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetr., Gesamt	Grundkörper R _Z [μm] R _e [μm] in Spur
089 AA 067 AA	grob gehont D 30	0,43	2,69 0,37	0,75 0,18	1,28 0,19	0,39 0,12	0,091	0,393	2,24 * 10 ⁻⁵	2,58 * 10 ⁻⁵	4,83 * 10 ⁻⁵	n.b.; Pitting
047 AA 078 AA	grob poliert D 3	0,003 0,008	0,17 0,02	0,03 0,02	0,33 0,03	0,08 0,03	0,094	0,393	2,19 * 10 ⁻⁵	1,81 * 10 ⁻⁵	4,00 * 10 ⁻⁵	n.b.; Pitting

n.b.: nicht bestimmbar

Wälzreibung in Wasser mit ZrO₂ (htc-PSZA)

$F_N = 1575 \text{ N}$, $P_0 = 3000 \text{ N/mm}^2$, $v_{\text{diff}} = 0,085 \text{ m/s}$, $n = 386 \text{ Upm}$, Schlupf = 10 Prozent, r.h. = 30-39 Prozent

§ $n_{\text{ges}} = 10.000$, $s_{\text{gleit}} = 131,95 \text{ m}$, eine Fortführung des Versuchs war aufgrund der hohen Reibungszahl und des beginnenden Pittings nicht möglich.

§ $n_{\text{ges}} = 30.000$, $s_{\text{gleit}} = 395,85 \text{ m}$, eine Fortführung des Versuchs war aufgrund der hohen Reibungszahl und des beginnenden Pittings nicht möglich.

Wälzreibung in Paraffinöl mit LPS[#]-SiC (SiC-B)

$$F_N = 205 \text{ N}, P_0 = 1,5 \text{ GPa}, v_{\text{diff}} = 0,085 \text{ m/s}, n = 386 \text{ Upm}, \text{Schlupf} = 10 \%, n_{\text{ges}} = 2 * 10^6,$$

$$s_{\text{gleit}} = 26.390 \text{ m}, r.h. = 30 - 39 \%$$

[#]: Liquid Phase Sintered (Flüssigphasen gesintert)

Proben Nr. Grundkörper (zylindrisch) Gegenkörper (ballig)	Bearbeitung	Zeitspannungsvolumen [mm ³ /s] (zyl./ba.)	Grundkörper R _z [μm] R _a [μm]	Grundkörper R _z [μm] R _a [μm]	Gegenkörper R _z [μm] R _a [μm]	Gegenkörper R _z [μm] R _a [μm]	f bei Beginn	f bei n _{ges}	k _p bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, planer Körper	k _r bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, runder Körper	k _g bei n _{ges} [mm ³ /Nm] planimetrisch, Gesamt	Grundkörper R _z [μm] R _a [μm] in Spur
02 BU [§] 07 BU [§]	grob gehont D 30	0,72 0,52	0,77 0,08	0,15 0,04	1,92 0,23	0,46 0,17	0,093	0,093	72,26 * 10 ⁻⁹	116,73 * 10 ⁻⁹	188,99 * 10 ⁻⁹	0,31 0,07
03 BU [§] 09 BU [§]	grob gehont D 30	0,72 0,52	0,72 0,08	0,15 0,04	1,75 0,20	0,37 0,18	0,093	0,070	115,88 * 10 ⁻⁹	127,67 * 10 ⁻⁹	243,55 * 10 ⁻⁹	0,34 0,08
03 BU [§] 07 BU [§]	fein gehont D 7	0,039 0,026	0,43 0,06	0,09 0,06	0,46 0,05	0,10 0,06	0,105	0,093	3,17 * 10 ⁻⁹	9,69 * 10 ⁻⁹	12,85 * 10 ⁻⁹	0,42 0,05
02 BU [§] 09 BU [§]	fein gehont D 7	0,039 0,026	0,35 0,04	0,08 0,05	0,42 0,05	0,10 0,05	0,105	0,093	1,83 * 10 ⁻⁹	6,07 * 10 ⁻⁹	7,90 * 10 ⁻⁹	
01 BU 09 BU*	grob ge- schliffen D 126	0,33	3,03 0,45	0,51 0,39	4,74 0,91	0,93 0,65	0,135	0,052	4381,40 * 10 ⁻⁹	5252,40 * 10 ⁻⁹	9633,90 * 10 ⁻⁹	0,62 0,07
03 BU 07 BU [§] *)	grob ge- schliffen D 126	0,33	2,71 0,43	0,57 0,47	4,06 0,77	0,86 0,63	0,113	0,052	4490,20 * 10 ⁻⁹	4415,40 * 10 ⁻⁹	8905,60 * 10 ⁻⁹	0,51 0,06
02 BU [§] 09 BU [§]	fein ge- schliffen D 28	0,042	1,03 0,14	0,21 0,14	3,28 0,55	0,42 0,66	0,151	0,093	120,19 * 10 ⁻⁹	154,30 * 10 ⁻⁹	274,49 * 10 ⁻⁹	0,35 0,03
03 BU [§] 07 BU [§]	fein ge- schliffen D 28	0,042	0,98 0,12	0,21 0,13	2,41 0,44	0,40 0,30	0,128	0,093	74,28 * 10 ⁻⁹	52,20 * 10 ⁻⁹	126,48 * 10 ⁻⁹	0,32 0,12
04 BU 11 BU	grob geläppt PWB 30	0,068 0,038	3,89 0,53	0,77 0,52	4,29 0,60	0,88 0,49	0,139	0,093	151,77 * 10 ⁻⁹	188,14 * 10 ⁻⁹	339,91 * 10 ⁻⁹	0,42 0,09
05 BU 12 BU	fein geläppt F 360	0,014 0,045	3,00 0,42	0,64 0,38	3,97 0,57	0,77 0,55	0,139	0,093	91,15 * 10 ⁻⁹	159,71 * 10 ⁻⁹	250,85 * 10 ⁻⁹	0,28 0,06
04 BU [§] 10 BU	grob poliert D 3	0,003	0,25 0,03	0,06 0,03	1,00 0,07	0,23 0,04	0,070	0,105	1,39 * 10 ⁻⁹	0,44 * 10 ⁻⁹	1,83 * 10 ⁻⁹	0,20 0,03
05 BU [§] 11 BU [§]	fein poliert D 1	n.b.	0,12 0,01	0,03 0,01	0,86 0,08	0,19 0,04	0,116	0,093	n.b.	7,15 * 10 ⁻⁹	n.b.	0,14 0,01

n.b.: nicht bestimmbar

§ ein zweites Mal bearbeitet

¹⁾ n=1*10⁶ Überrollungen

* F_N = 548 N, P₀ = 3 GPa
anhang12

10 Literatur

- [1] W. G. Hosang
Results and Design Techniques from the Application of Ceramic Ball Bearings to the MERADCOM 10 kW Turbine, AIAA-87-1844, 23rd Joint Propulsion Conference 1987, San Diego, USA
- [2] J. F. Chudecki
Ceramic bearings - Application and performance advantages in industrial applications, SAE-TP-891904, (1989)
- [3] F. J. Ebert
Keramik in Wälzlagern für die Luft- und Raumfahrt, in: „Hochleistungskeramik in FAG Wälzlagern“, FAG Kugelfischer Georg Schäfer KGaA, Schweinfurt, Germany, Publ.-Nr. WL 40 204 DA
- [4] W. Hörning
Neue FAG Spindellager - Hybridlager mit Stahlringen und Keramikugeln, in: „Hochleistungskeramik in FAG Wälzlagern“, FAG Kugelfischer Georg Schäfer KGaA, Schweinfurt, Germany, Publ.-Nr. WL 40 204 DA
- [5] D. Steinmann
Siliziumnitrid-Keramik für Kugeln und Kugellager, cfi/ Ber. DKG 67 [12] (1990) 584
- [6] H. Knoch
Keramische Gleitlager aus gesintertem Siliciumcarbid Kap. 7 in: „Tribologisches Verhalten keramischer Werkstoffe - Grundlagen und Anwendungen“, Ed.: W.J. Bartz, Esslingen: expert-Verlag (1993)
- [7] B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig
Mediensmierung ingenieurkeramischer Gleitpaarungen Tribologie + Schmierungstechnik, 39. Jahrgang, Nr. 1, 1992, 3-9
- [8] M. Woydt, U. Effner
Machining and slip-rolling of ceramics AGARD-CP-589, Conference Proceedings, 6-7 May 1996, Sesimbra, Portugal, p. 7-1 - 7-6
- [9] T. Rabe, BAM-V.41,
eigene Herstellung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), D-12200 Berlin
- [10] Technical Data Sheet
Engineered ceramics - general characteristics, Elektroschmelzwerk Kempten GmbH (ESK), 87405 Kempten, Germany
- [11] Technical Data Sheet
Silicon Carbide Properties, SiC-B htc-hightech ceram, Dr. Steinmann + Partner, 53945 Blankenheim, Germany
- [12] I. Dörfel, U. Effner, S. Glaubitz, W. Österle, E. Rudolph
Charakterisierung hochfester ZrO_2 -Werkstoffe Tagungsband „Werkstoffwoche '96“, Stuttgart, 28.-31. Mai 1996, DGM Informationsgesellschaft-Verlag, Oberursel (1996) Band 6, S. 691-702, ISBN 3-88355-234-8
- [13] T. Rabe, R. Wäsche
Gasdrucksintern von SiC/TiC-Keramiken, Tagungsband der Jahrestagung 1993 der Deutschen Keramischen Gesellschaft, Weimar, 06.-08.10.1993, S. 266-268
- [14] A. Skopp, M. Woydt
Ceramic-ceramic composite materials with improved friction and wear properties Tribol. Intern. 25 [1] (1992) p. 61-70
- [15] M. Woydt, J. Schwenzen
Dry and water-lubricated slip-rolling of Si_3N_4 - and SiC-based ceramics Tribol. Intern. 26 [3], (1993) p. 165-173
- [16] U. Effner und M. Woydt
Zirkondioxid: Ein neuer Wälzlagerwerkstoff? Keramische Zeitschrift 48 (12) 1996, S. 389-393
- [17] U. Effner und M. Woydt
Zirkondioxid: Ein neuer Werkstoff für Wälzkontakte? Tribologie & Schmierungstechnik, 44. Jahrgang, 1997, Heft 3, S. 124-127
- [18] T. Nishioka, K. Matsunuma, T. Yamamoto, A. Yamakawa, M. Miyake,
Development of high strength Si_3N_4 materials for automobile parts, Sumitomo Electric Technical Review, June 1993, No. 36, p. 77-83
- [19] K. D. Mörgenthaler,
Keramikteile im Motorenbau, Anforderungen und Eigenschaften, in: Keramik in Wissenschaft und Praxis, Mechanische Eigenschaften keramischer Konstruktionswerkstoffe, Hrg.: G. Grathwohl, Oberursel: DGM Informationsgesellschaft mbH Verlag, (1993) p. 17-28
- [20] C. Gilbert, R. Daushardt, R. Ritchie,
Behaviour of cyclic fatigue cracks in monolithic Si_3N_4 , J. Am. Ceram. Soc. 78 [9] (1995) p. 2291-3000
- [21] R. Stevens,
Zirconia and zirconia ceramics, Second edition, 1986, July, Magnesium Elektron Ltd.
- [22] L. S. Sigl, H. J. Kleebe
Flüssigphasengesintertes Siliciumcarbid Tagungsband „Werkstoffwoche '98“, München, 12.-15. Oktober 1998, DGM Informationsgesellschaft-Verlag, Frankfurt/M., (1998), Hrg.: J. Heinrich, G. Ziegler, W. Hermel, H. Riedel, Band VII, Symposium 9, ISBN 3-88355-274-7, im Druck
- [23] V. Carle, U. Schäfer, U. Täffner, F. Predel, R. Telle, G. Petzow
Keramographie von Hochleistungskeramiken - Werkstoffbeschreibung, Präparation, Ätztechniken, und Gefügebeschreibung, Pract. Metallographie 28 (1991) S. 420-434
- [24] N.N.
Abnutzungsmaschine für Metalle Zeitschrift des VDI, 66 [15] 1922, 377-378
- [25] K.-H. Habig, M. Gienau, B. Löffelbein
Nitrierschichten FVV-Vorhaben Nr. 554 unter dem Förderzeichen BMWi/AIF Nr. 9045 - Abschlußbericht 1996
- [26] P. Studt, G. Bartelt
Verschleiß und Reibung keramischer Werkstoffe bei Mischreibung: Einfluss von Schmieröladditiven, Tribologie + Schmierungstechnik, 39, Nr. 5 (1992) S. 282-287
- [27] Angaben der Firma E. Merck,
64271 Darmstadt, Deutschland
- [28] V. S. Yushchenko, E. D. Shchukin
Rehbinder Effect Encycl. Mater. Sci. Enging. 6 (1986) p. 4162-4166
- [29] G. Heinicke, K. Beyer
Der Rehbinderereffekt - Wesen und Anwendung, Wissenschaft und Forschung 27, Nr. 12 (1977) S. 522-526
- [30] K. Adachi, K. Hokkirigawa,
Wear of materials, ASME (1991) p. 333 - 338

- [31] H. Czichos, K.-H. Habig
Tribologie Handbuch - Reibung und Verschleiß
Braunschweig: Vieweg Verlag, 1992
- [32] U. Effner, M. Woydt, E. Westkämper, L. Höhne, J. Gäbler,
Economical machining and tribological rolling wear of ceramics,
Proceedings, International Tribology Conference,
29.10.-02.11.1995, Yokohama, Japan, Vol. 1, S. 503-508
- [33] E. Westkämper, G. Kappmeyer, H.-W. Hoffmeister
Einfluss der Fertigungsverfahren Langhubhonen und Schleifen auf die Oberflächenausbildung und die tribologischen Eigenschaften keramischer Bauteile,
Tagungsband „Werkstoffwoche '96“, Stuttgart,
28.-31. Mai 1996, DGM Informationsgesellschaft-Verlag,
Oberursel, (1996), Hrg.: A. de Paoli, Band 5, S. 303-308,
ISBN 3-88355-233-X
- [34] J. Gäbler, H.-W. Hoffmeister, U.-P. Weigmann
Läppen und Polieren von Ingenieurkeramik,
Tagungsband „Werkstoffwoche '96“, Stuttgart,
28.-31. Mai 1996, DGM Informationsgesellschaft-Verlag,
Oberursel, (1996), Hrg.: A. de Paoli, Band 5, S. 135-140,
ISBN 3-88355-233-X
- [35] M. Haubold, B. Rotter, T. Brücher
Nachweis von bearbeitungsbedingten mechanischen Oberflächenspannungen mittels Akustomikroskopie,
Proc. annual. conf. of the DGZfP (Vol. 37),
Garmisch-Partenkirchen, Deutschland, 17.-19.5.1993,
S. 608-615
- [36] S. Bosek
Akustische Mikroskopie,
Phys. Bl. 49, Nr. 6 (1993) S. 497-502
- [37] DIN 50320,
Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes,
DIN-Taschenbuch 246, Tribologie, Berlin, Beuth-Verlag
(1990) S. 203-210
- [38] K.-H. Zum Gahr
Furchungverschleiß; Reibung und Verschleiß; Mechanismus – Prüfungstechnik – Werkstoffverhalten,
Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.V., Oberursel, Ed.:
K.-H. zum Gahr (1980)
- [39] H. K. Tönshoff, J. Peddinghaus, H.-G. Wobker,
Tribologische Verhältnisse zwischen Schleifscheibe und Werkstück,
in: „Tribologie 2000“,
Ed.: W. J. Bartz, Technische Akademie Esslingen, 2 (1992)
- [40] DIN 4768
Ermittlung der Rauheitsmeßgrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten, Grundlagen,
August 1974, Normenausschuß Länge und Gestalt (NLG)
im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.,
Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin, Deutschland
- [41] DIN 4776
Kenngößen R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil, Meßbedingungen und Auswerteverfahren, Anwendungshinweise und Beispiele,
Mai 1990, Normenausschuß Länge und Gestalt (NLG) im
DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Burggrafenstr. 6,
10787 Berlin, Deutschland
- [42] M. N. Gardos, R. G. Hardisty,
Fracture Toughness- and Hardness-Dependent Polishing Wear of Silicon Nitride Ceramics
Tribol. Trans. 36 [4] (1993) p. 652-660
- [43] B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig
Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen,
BAM-Forschungsbericht 186, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, D-12200 Berlin, (1992)
- [44] A. G. Evans, T. R. Wilshaw,
Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solids – I. Observation, Analysis and Implications,
Acta Metall. 24 (1976) 939
- [45] U. Effner, M. Woydt
Bearbeitung und Wälzreibung von Ingenieur-Keramiken in Wasser und Öl
VDI Berichte No. 1207 (1995) 223-233
- [46] U. Effner, J. Gäbler, M. Hartelt, D. Klaffke, Th. Naeve,
G. Spur, U.-P. Weigmann, E. Westkämper, M. Woydt
Einfluss der Bearbeitung auf das Verhalten von SiC (EKasic D) unter Gleit-, Schwingungs- und Wälzreibung
Tagungsband der DGM Tagung „Reibung und Verschleiß“,
Bad Nauheim, 21.-22. März 1996

**Kennzahlen und Arbeitsergebnisse des
Vorhabens DFG Wo 521/1-1 bis -6**

Publikationen	30
Vorträge	16
Werkstoffe	7
untersuchte Proben*	280
Überrollungen	$300 * 10^6$
Versuchsdauer	>600 Tage

Weitere Literatur zum Thema:

Nr.68: D. Petersohn

Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers

32 Seiten, 1980

DM 11,50

Nr.85: H. Czichos

Technische Materialforschung und -prüfung – Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „ Basic Technological Research”

50 Seiten, 1982

DM 17,00

Nr.88: A. Erhard

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

42 Seiten, 1983

DM 16,00

Nr.95: M. Römer

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

52 Seiten, 1983

DM 19,00

Nr.186: B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig:

Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus ingenieurkeramischen Werkstoffen in wäßrigen Lösungen

86 S., 54 Abb. (1 fbg), 7 Tab., 1992

DM33,50

Nr.221: Dr.-Ing. R. Wäsche und Dipl.-Ing. F. Köse

Einfluß der Verfahrensparameter beim Gelcasting auf die Entstehung bruchauslösender Gefügefehler in hochreinen Aluminiumoxidkeramiken

52 S., 69 Abb., 7 Tab., 1997

DM 28,00

Nr.222: Dr.-Ing. H. Frenz

Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung der einkristallinen Nickelbasislegierung SC 16 unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung

44 S., 49 Abb., 4 Tab., 1997

DM 26,50

Die neuesten BAM-Berichte:

Nr.223: Knut Rurack, Dr. rer. nat. Ute Resch-Genger

Design, Synthese und Charakterisierung von neuen Fluoreszenzstandards und Fluoreszenzmarkern für die zeitaufgelöste Fluorometrie – Abschlußbericht zum BMBF-Vorhaben, Förderkennzeichen: 13N6587

36 S., 24 Abb., 1 Tab., 1998

Nr.224: Dr.-Ing. Michael Weber

Strukturspannungsberechnung bei zylindrischen Behältern mit Aufdachungen unter Innendruck

72 S., 43 Abb., 18 Tab., 1998

Nr.225: Dr. Ute Schoknecht, Dr. Jan Gunschera, Dipl.-Ing. Hans-Norbert Marx,

Dipl.-Ing. Gabriele Marx, Dr. André Peyla, Dipl.-Ing. Gabriele Schwarz

Holzschutzmittelanalytik – Daten- und Literaturzusammenstellung für Wirkstoffe in geprüften Holzschutzmitteln

160 Seiten, 1998

Nr.226: Dr.-Ing. Lutz Auersch

Fundamentalschwingungen und Wellenausbreitung bei inhomogenen Böden – Beiträge zur Dynamik der Verkehrssysteme

68 S., 31 Abb., 1998

Nr.227: Dr. rer. nat. Frank Liebau, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Berechnung von Temperatur- und Wärmestromverteilungen mittels algebraischer Mehrgittermethoden auf der Basis der Methode der finiten Volumen bei allgemeiner Triangulierung mit Winkeln über 90°

64 S., 30 Abb., 13 Tab., 1989

Nr.228: Dietmar Aurich, Dietmar Klingbeil

Entwicklung von Verfahren zur Ermittlung von Reißwiderstandskurven verschiedener Probengeometrien aus der Kerbschlagarbeit

152 S., 188 Abb., 15 Tab., 1998

Nr.229: Dipl.-Ing. Jörg Hamann, Dr.-Ing. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi,

Dr. rer. nat. Robert Schriever, Prof. Dr. Ulf Wickström

Anwendung von Temperatur-Berechnungsprogrammen auf kritische Referenzbeispiele des Brandschutzes

144 S., 44 Abb., 34 Diagr., 1999

Nr.230: B. Schulz-Forberg, M. W. Hübner

Klassifizierung und Sicherheitsreserven von Transportbehältern für Radioaktive Stoffe

124 S., 112 Abb., 29 Tab., 1999

Nr.231: R. Konersmann

Zur Festlegung von Ausschlußflächen in Start- und Einflugschneisen von Flughäfen und Landeplätzen gemäß Störfall-Verordnung

132 S., 15 Abb., 41 Tab., 1999

