# 2.5 Herstellung und Eigenschaften von Oberflächen

 Carsten Rußner CeramTec AG Lauf a.d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 187.

### Charakterisierung und Zerspanung sprödharter Werkstoffe

C. Russner; T. Ardelt

Die Charakterisierung von Oberflächen und Zerspanung sprödharter Werkstoffe verbinden eigene Gesetzmäßigkeiten, welche besonders mit unterschiedlichen Möglichkeiten der Oberflächenausprägung bei keramischen Werkstoffen zu Tage treten. Die Beschreibung der komplexen Oberflächen wurde erstmals vollständig von einem universitätsübergreifenden Autorenteam im Jahr 2001 durchgeführt [ARD01]. Der Artikel greift auf diese Zusammenfassung zurück und beschreibt die bearbeitungsspezifische Oberflächencharakteristika, sowie deren Wirkursache, zwei Zerspanmodelle sowie vier hochproduktive Hartbearbeitungsverfahren, also das Schleifen, Läppen, Honen und Polieren. Zum Verständnis der Bearbeitungseinflüsse auf ein tribologisches System werden noch Scheibe – Scheibe Reibwertsmessungen aufgeführt.

#### 2.5.1. Oberflächencharakteristika nach DIN 4761

Die DIN 4761 nimmt eine Einteilung der Oberflächentypen in drei Hauptgruppen, rillige und nichtrillige Oberflächen sowie Oberflächenfehler, vor. *Rillige und nichtrillige Oberflächen* bilden mit bloßem Auge erfassbare Oberflächenstrukturen, welche durch weitere Merkmale überlagert sein können. Als Rille wird eine regelmäßige oder unregelmäßige Vertiefung oder Spur auf der Oberfläche bezeichnet. Ihr Profil ist durch Rillentiefe, Rillenbreite und Rillenabstand bestimmt. Bezüglich der Anordnung der Rillen wird eine Unterscheidung in geordnete und



ungeordnete sowie gleichgerichtete und sich kreuzende Rillenscharen vorgenommen. Die Rillen selbst können einen geraden oder ungeraden Verlauf haben. Die nichtrilligen Oberflächen treten in regeloder unregelmäßigen Erscheinungsformen auf. Sie sind meist spanlos erzeugt und ohne bevorzugte Textur. Bei spanabhebender Bearbeitung können die nichtrilligen Texturmerkmale auch von Rillenspuren überlagert werden.

Fehler	Beschreibung	Ursache	Beispiel
Riefe	Unbeabsichtigte gra- benförmige Spur, die so tief ist, dass sie durch weitere Bearbeitungs- verfahren nicht mehr beseitigt werden kann	Fehlerhafte Vorbearbeitung, unzweckmäßige Bearbeitung	
Kratzer	Zufällige riefenförmige Beschädigung	Äußere Einwir- kung, aber nicht durch Bearbei- tung verursacht	
Riss	Örtlich begrenzte Trennung des Werk- stoffgefüges von geringer Breite, aber großer Länge und Tiefe	Innere und/oder äußere Spannungsein- wirkungen	
Pore	Zufällige, örtlich bedingte Vertiefung auf der Oberfläche mit steiler Böschung und scharfkantigem Übergang zur Oberfläche	Werkstoffbedingt	
Streifen	Markierungen auf der Oberfläche mit geringer Tiefe, aber größerer Längen- und Breiten- ausdehnung	Örtliche Glättungen während der Bearbeitung	

Tabelle 1: Oberflächenfehler nach DIN 4761

Als *Oberflächenfehler* werden örtliche Verformungen, Auftragungen oder Werkstofftrennungen bezeichnet. Sie entstehen vor, während oder nach der Bearbeitung. Eine Beschreibung der Fehler sowie deren Ursache ist in Tabelle 1 festgehalten.

### 2.5.1.1. Oberflächencharakteristika keramischer Werkstoffe

Bei keramischen Oberflächen treten alle in der DIN genannten Oberflächencharakteristika auf. Diese reichen jedoch für eine eindeutige Beschreibung nicht aus. In Tabelle 2 sind daher die in der Norm genannten Oberflächenfehler durch typische Oberflächencharakteristika keramischer Werkstoffe ergänzt.

Beschrei- bung	Ursache	Prinzipskizze	REM-Aufnahme
Glatt (smooth)	mit Mikro- körnungen bearbeitete Oberfläche		
Riefen (grooves)	Duktile Zerspa- nung unterhalb der kritischen Spanungsdicke mit gebunde- nem Korn		
Riss (crack)	thermische Einflüsse beim Brand, Bearbeitung über kritischer Spanungsdicke		



Kratzer (scratch)	Verschleppung von groben Körnern bei der Feinbearbei- tung	(III)	
Pore (pore)	Werkstoff- bedingte Verunreinigung (gewollt / ungewollt)		¥۴
Mulden (hollowed surface)	Oberflächeaus- prägung nach Tribokontakten		
Interkristal- line Aus- brüche (inter- crystalline break-outs)	Trennen von Oberflächen mit groben Diamant- körnungen	0	
Ausbruchs- gründe (grounds of break-outs)	Abplatzungen von Partikeln		ton a
Strukturlos zerklüftet (un- structured fissured surface)	Bearbeitung mit losem Korn oder gebrannte Oberflächen	4	

Aufwerfung (pile)	Entlastung nach starken Druck- spannungen		1
Scholle (clod)	durch Bearbei- tung lösender Partikel überhalb einer Pore		
Abplatzung (split off)	durch Druck- oder Zugspan- nungen gelöster Partikel	Co	
Schuppe (scale)	durch Bearbei- tung erzeugter Riss quer zur Bearbeitungs- richtung	EN I	
Schichtung (lamination)	nach Tribokontakten entstehende Material- anhäufung		
Auf- schmelzung (melting)	Laser- bearbeitung, Hot-spot Temperaturen beim Schleifen		Trans.



Spröde gebrochen (brittely broken)	Oberflächen- bearbeitung Überschreitet die kritische Spanungsdicke	
Sekundär- phasen (secondary phases)	werkstoffbe- dingt, Umwand- lung durch fal- sche Hartbear- beitungspara- meter möglich	
Ver- rundungen (roundings)	Entstehung durch Tribokontakte	A Frank

Tabelle 2: Oberflächencharakteristika keramischer Werkstoffe

# 2.5.2. Werkstoffmechanismen

Die Hartbearbeitung gesinterter Keramik erfolgt in den meisten Fällen durch spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide und Diamant als Schneidstoff. Die Oberflächenausbildung wird besser erklärbar durch die Betrachtung eines einzelnen Abrasivkornes und die dadurch entstehenden Trennmechanismen.



Bild 1: Detailaufnahmen entlang einer Ritzspur

Die bekanntesten beschreibenden Darstellungen der Werkstofftrennmechanismen stammen von SALJÉ [SAL87] und von KÖNIG [KÖN96]. Das Modell von SALJÉ betrachtet einen Trennvorgang unter sprödem Werkstoffverhalten: Mikrorisse und die daraus folgenden Ausbrüche dominieren mit zunehmender Eingriffstiefe die Werkstofftrennung. Im Gegensatz dazu beziehen sich die Beschreibungen von KÖNIG auf duktiles Werkstoffverhalten. Die Kornschneide löst nach einer Phase elastischer Verformung plastisches Fließen aus. Anfangs bildet sich zwischen Schneidkontur und Werkstückoberfläche noch kein Span. Erst wenn die Einzelkornspanungsdicke  $h_{cu}$  der Grenzspanungsdicke entspricht, beginnt die eigentliche Spanbildung.





**Bild 2:** Modelle zu Werkstofftrennmechanismen nach SALJÉ (links) und KÖNIG (rechts)

Die unterschiedlichen Oberflächenausbildungen sind abhängig von den verwendeten Prozess- und Systemgrößen. Die Auswirkungen dieser beiden prinzipiell unterschiedlichen Trennmechanismen sind nach MARSHALL in Bild 3 dargestellt [MAR83].



Bild 3: Werkstofftrennung und Rissbildung an sprödharten Werkstoffen

Welche Werkstofftrennmechanismen bei der Bearbeitung vorherrschen, hängt u.a. von der Geometrie des eindringenden Ritzkörpers ab.



# 2.5.3. Hartbearbeitungsverfahren

Die gängisten großserientechnischen Verfahren sind das Schleifen, das Läppen, Polieren sowie für die Bohrungsbearbeitung das Honen.

# 2.5.3.1. Geschliffene keramische Oberflächen

Charakteristisch für das Schleifen ist die Überlagerung einer Vielzahl bahngebundener Ritzbewegungen von gebundenen Schleifkörnern durch den Werkstoff sowie eine Hauptwirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche. Die Ritzbewegung des Schneidkorns induziert direkt Risse und spröde Ausbrüche und/oder Plastifizierungen sowie duktiles Abtrennen von Keramikpartikeln. Indirekt kommt es einerseits zur Ausbreitung und Fortpflanzung tieferliegender Risse zu Risssystemen und dadurch zum Ausbrechen weiterer Partikel, deren Volumen größer sein kann als das vom Schneidkorn verdrängte Volumen.

In Bild 5 ist ein Bereich mit vorwiegend plastischen Verformungen an der Oberfläche, ein Bereich mit vorwiegend Sprödbruch sowie ein Rissbereich deutlich zu unterscheiden. Dieser ist durch mikroskopische Axial-, Radial- und Lateralrisse gekennzeichnet.



**Bild 5:** Unterschiedliche Werkstofftrennmechanismen bei geschliffenem Siliciumnitrid [WIM95]



Bild 6: Oberflächen spröder, gemischt und duktil geschliffener Keramiken

# 2.5.3.2. Gehonte keramische Oberflächen

Charakteristisch für das Honen ist die Überlagerung einer Vielzahl kraftgebundener Ritzbewegungen von Schneidkörnern durch den Werkstoff und ein flächenhafter Werkzeugeingriff mit einer Hauptwirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche. Es treten wie beim Schleifen duktile und spröde Werkstofftrennmechanismen nebeneinander auf. Welcher Mechanismus überwiegt, wird wesentlich von der Korneindringtiefe und der Schnittgeschwindigkeit bestimmt.

SPUR [SPU89], WEIGMANN [WEI97] sowie WESTKÄMPER und HÖHNE [WES92] ermittelten an Aluminiumoxidkeramiken, dass es infolge überwiegend duktiler Zerspanung bei kleinen Diamantkorngrößen (D7, D10) zu weitgehend glatten Oberflächen kommt, die von einer Vielzahl von Mulden und Riefen sowie Bereichen mit mikroplastischen Deformationen wie Schichtungen oder Verrundungen unterbrochen sind. Bei großen Korngrößen verlagern sich die Werkstofftrennmechanismen in Richtung spröder Zerspanung, so dass Oberflächen mit vielen interkristallinen Ausbrüchen entstehen (Bild 7).





**Bild 7:** Oberflächenausbildung in Abhängigkeit von Korngröße und Anpressdruck beim Honen von Aluminiumoxid [WEI97]

Beim Honen wirken sich bei spröder Zerspanung höhere Schnittgeschwindigkeiten positiv auf das Zeitspanungsvolumen aus. Für die Oberflächengüte sind höhere Schnittgeschwindigkeiten jedoch aufgrund der stärkeren Rissinduzierung, die zu Ausbrüchen und Abplatzungen führen kann, von Nachteil [HÖH99].

# 2.5.3.3. Geläppte keramische Oberflächen

Läppen wird definiert als Spanen mit losem, in einer Paste oder Flüssigkeit verteiltem Korn, dem Läppgemisch, das auf einem meist formübertragenden Gegenstück (Läppwerkzeug) bei möglichst ungeordneten Schneidbahnen der einzelnen Körner geführt wird.

Charakteristisch sind die mikrogeometrisch nahezu isotropen Oberflächentopographien mit regellos angeordneten Riefen, einer Vielzahl sehr homogen verteilter Mulden sowie vereinzelten interkristallinen Oberflächenausbrüchen (Bild 8). Diese Strukturen erweisen sich vielfach bei hohen tribologischen oder optischen Funktionsanforderungen als vorteilhaft [KÖN96].



Bearbeitung mit Lägekorn F 190

Bearbeitung mit Lägskein F800



Die Werkstofftrennmechanismen spröder Zerspanung wirken sich beim Läppen keramischer Werkstoffe günstig auf das Zeitspanungsvolumen aus, da das Volumen des abgetrennten Werkstoffs größer sein kann als das durch das Schneidkorn verdrängte Volumen [SAB91].

Die beim Läppen erreichbaren Oberflächengüten sind vom Gefüge des bearbeiteten keramischen Werkstoffes abhängig. Je feinkörniger und dichter der Werkstoff ist, um so höher ist die erreichbare Oberflächengüte. Je nach Korngröße, Einstellbedingungen und Gefügeaufbau der zu läppenden Keramik sind Formgenauigkeiten von 1  $\mu$ m/m, Plan-



parallelitäten bis zu 0,2  $\mu$ m und Mittenrauwerte R<sub>a</sub> < 0,3  $\mu$ m erreichbar [SPU88, BEI90].

### 2.5.3.3. Polierte keramische Oberflächen

Durch Polieren sollen vorrangig hohe Oberflächengüten erzeugt werden. Im Gegensatz zum Läppen ist das Polierkorn in einem Tuch oder einer Polierscheibe eingebettet, so dass eine gerichtete Werkzeugbewegung realisiert wird, welche für die Erzeugung optisch spiegelnder Oberflächen notwendig ist. Polieren ist wegen der geringen Zeitspanungsvolumina zeit- und kostenaufwendig.

Bei der Keramikbearbeitung wird in der Regel nur bei äußerst hoher punktueller Druckbelastung eine geringfügige plastische Deformation erreicht. Daher ist die Materialabnahme beim Polieren von Keramik lediglich durch ein Ritzen mit Spanungsdicken im Nanometerbereich erklärbar. Polierte Oberflächen sind in Abhängigkeit von der Polierzeit und dem eingesetzten Polierkorn durch glatte Bereiche und Mulden charakterisiert.



Bearbeitung mit 9 um Polieikom

Bearbeitung mit 0.25 um Polierkorn

Bild 9: Polierte Siliciumcarbid-Oberflächen

#### 2.5.4. Zusammenfassung

Die Erfahrungen bei der Bearbeitung und dem Einsatz keramischer Werkstoffe haben gezeigt, dass die Oberflächentopographie eine wesentliche Einflussgröße auf die Funktionszuverlässigkeit keramischer Komponenten darstellt. Gerade diese Möglichkeiten des Einstellens spezifischer Oberflächen stellt das Potential der keramischen Werkstoffen in Tribosystemen dar. Hier findet sich das Know-how der keramischen Industrie, zu dem benötigten tribologischen Anwendungsfall den richtigen keramischen Werkstoff und die dazu notwendige Oberflächenqualität zu definieren und großserientechnisch herzustellen.

### 2.5.5. Literatur

Danksagung: Ich möchte mich hiermit noch einmal bei dem Autorenteam und speziell bei Herrn Dr.-Ing. H. Engel vom Institut für Fabrikbetrieb an der TU-Berlin recht herzlich bedanken für die Zurverfügungstellung der beiden Veröffentlichungen anlässlich der Weiterbildungsveranstaltung 2003 des Informationszentrums Technische Keramik im Verband der Keramischen Industrie e.V. (VKI).

[ARD01] T. Ardelt, C. Barth, N. Daus, K. Eichgrün, D. Hessel, R. Kreis, D. Pähler, L. Schäfer, C. Schmidt, C. Spengler. F. Sroka: Charakterisierung keramischer Oberflächen Teil 1: Vollständige und einheitliche Beschreibung keramischer Oberflächen IDR 35 (2001) Nr. 2, S. 171-179. Teil 2: Einfluss der Bearbeitung auf die Oberflächentopographie IDR 35 (2001) Nr. 4, S. 346-351. [AND91] Anderson, T. L.: Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications. CRC Press, Boca Raton, 1991 [BLU93] Blumenauer, H.; Pusch, G.: Technische Bruchmechanik. 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig Stuttgart, 1993 [GR092] Gross, D.: Bruchmechanik 1: Grundlagen, Lineare Bruchmechanik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1992



- [IRW57] Irwin, G. R.: *Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate.* In: Journal of Applied Mechanics 24 (1957), S. 361-364
- [KÖN96] König, W., Klocke, F.: Fertigungsverfahren. Bd. 2: Schleifen, Honen, Läppen. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996
- [LAW77] Lawn, B.; Evans, A. G.: A model of crack initiation in elastic/plastic indentation fields. Journal of Mat., 12 (1977), S. 2195-2199
- [MAI90] Maier, H. R.: *Werkstoffkunde II Keramik*. Vorlesungsmanuskript, RWTH Aachen, 1990
- [MAR83] Marshall, D. B.; Evans, A. G.: *The nature of mashining damage in brittle materials*. Proc. R. Soc. Laond. A385 (1983), S. 461-475
- [MUN89] Munz, D. ; Fett, T.: *Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1989
- [NAK89] Nakajima, T.; Uno, Y.; Fujiwara, T.: *Cutting mecha*nism of fine ceramics with single point diamond. Prec. Eng. 11 (1989) 1, S. 19-25
- [ROS82] Rossmanith, H.-P.: *Grundlagen der Bruchmechanik.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982
- [ROS94] Rosenberger, U.: *Prozessüberwachung beim Flachschleifen von Hochleistungskeramik*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994
- [ROT94] Roth, P.: *Abtrennmechanismen beim Schleifen von Aluminiumoxid*. Dissertation, Universität Hannover 1994
- [SAL87] Saljé, E., Möhlen, H.: *Prozeßoptimierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe.* IDR 21 (1987) Nr. 4, S. 243-247
- [SCH80] Schwalbe, K.-H.: *Bruchmechanik metallischer Werk*stoffe. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1980

[SUB97]	Subraminian, K., Ramanath, S., Tricard, M.: <i>Mecha-</i> <i>nisms of Material Removal in the Precision Production</i> <i>Grinding of Ceramics</i> . Journal of Manufacturing Sci- ence and Engineering, November, Vol. 119, (1997), S. 509-519
[UHL93]	Uhlmann, E.: <i>Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe</i> , Dissertation, TU Berlin 1993
[WAR93]	Warnecke, G., Rosenberger, U. Wimmer, J.: <i>Mikro-</i> <i>vorgänge beim Schleifen von Hochleistungskeramik.</i> In: IDR 27 (1993) 4, S. 247-252
[WT98]	Ardelt, Th. ; Eichgrün, K. ; Friemuth, Th. ; Gäbler, J. ; Gerent, O. ; Holl, SE. ; Kreis, R. ; Lierse, T. ; Schip- pers, C. ; Zapp, M.: <i>Rauheitsmessung an keramischen</i> <i>Oberflächen.</i> In: Werkstattstechnik 88 (1998), Nr. 5/98, S. 239-243

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 11) finden sich auf den folgenden Seiten.





2.5 Folie 1



2.5 Folie 2











2.5 Folie 5



2.5 Folie 6







2.5 Folie 8







2.5 Folie 10



