

## 5.4 Hartbearbeitung – Toleranzen und Oberflächen

- Carsten Rußner  
CeramTec AG  
Lauf a.d. Pegnitz  
T. Ardelt u.a.

*Die Folien finden Sie ab Seite 446.*

### Charakterisierung keramischer Oberflächen

Im vorliegenden Teil einer mehrteiligen Ausarbeitung werden die Einflüsse einzelner Fertigungstechnologien erläutert

#### 5.4.1 Einleitung

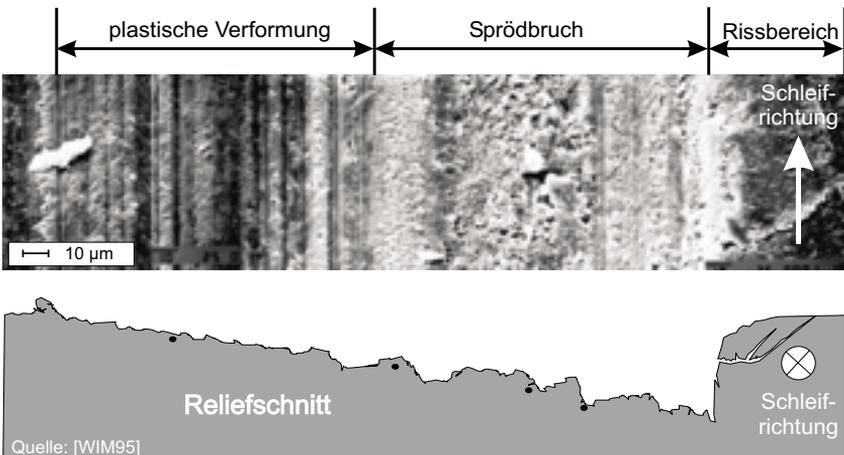
Die Oberflächentopographie einer keramischen Oberfläche ist neben dem Werkstoff entscheidend von den angewandten Fertigungstechnologien und deren spezifischen Werkstofftrennmechanismen abhängig. Die Oberflächenentstehung wird von einer Vielzahl von Größen beeinflusst, die durch Werkzeug, Werkstück, Werkzeugmaschine und Prozess bestimmt werden. Im Folgenden werden verfahrensabhängige Oberflächencharakteristika für Bauteile aus technischer Keramik dargestellt, ohne detailliert auf einzelne dieser Einflussgrößen einzugehen. Als wichtigste Hartbearbeitungsverfahren werden zunächst die Technologien Schleifen, Honen, Läppen und Polieren behandelt und danach ausgewählte Sonderverfahren diskutiert.

#### 5.4.2 Geschliffene keramische Oberflächen

Charakteristisch für das Schleifen ist die Überlagerung einer Vielzahl bahngebundener Ritzbewegungen von Schleifkörnern durch den Werkstoff sowie eine Hauptwirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche.

Ausgehend von den Prinzipien der Rissbildung lassen sich verschiedene Mechanismen der Oberflächenentstehung beim Schleifen von Keramik ableiten: Die Ritzbewegung des Schneidkorns induziert direkt Risse und spröde Ausbrüche und/oder Plastifizierungen sowie duktilen Abtrennen von Keramikpartikeln. Indirekt kommt es einerseits zur Ausbreitung und Fortpflanzung tieferliegender Risse zu Rissssystemen und dadurch zum Ausbrechen weiterer Partikel, deren Volumen größer sein kann als das vom Schneidkorn verdrängte Volumen. Andererseits kann die thermische Einwirkung beim Schleifen zu Rissstoppeffekten an plastifizierten Korngrenzen führen [UHL93, WEI97].

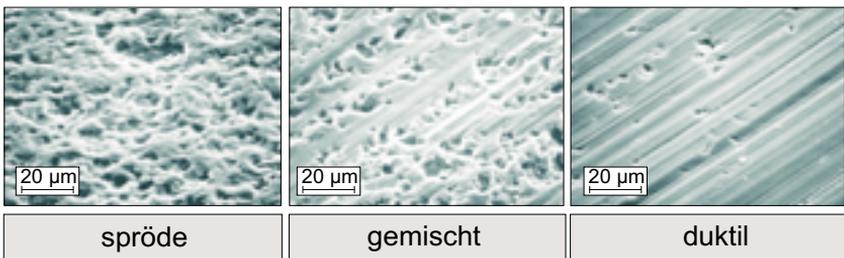
Anhand von Bearbeitungsspuren aus Modellversuchen lassen sich diese Werkstofftrennmechanismen zeigen. In Bild 1 ist ein Bereich mit vorwiegend plastischen Verformungen an der Oberfläche, ein Bereich mit vorwiegend Sprödbbruch sowie ein Rissbereich deutlich zu unterscheiden. Dieser ist durch mikroskopische Axial-, Radial- und Lateralrisse gekennzeichnet.



**Bild 1:** Unterschiedliche Werkstofftrennmechanismen bei geschliffenem Siliciumnitrid [WIM95]

Oberflächen, deren Entstehung wesentlich von plastischen Verformungsvorgängen bestimmt wird, weisen gemäß der im ersten Teil vorgestellten Einteilung der Oberflächencharakteristika Riefen, Ver-

rundungen, Schichtungen, Schuppen und eine verhältnismäßig geringe Zahl von Ausbrüchen auf. Diese Charakteristika sind kennzeichnend für das „duktiler Zerspanen“ (Bild 2). Im Gegensatz dazu ist für das „spröde Zerspanen“ eine Vielzahl von Ausbrüchen, Aufwerfungen, Schollen und Abplatzungen typisch. In der Regel kommt es beim Schleifen einer Oberfläche sowohl zu duktiler als auch zu spröder Zerspanung. Welcher dieser Werkstofftrennmechanismen vorherrscht, wird von den lokalen Spannungsbedingungen an den Einzelkörnern während des Ritzvorgangs bestimmt. Der Übergang von spröder zu duktiler Zerspanung hängt insbesondere vom Überschreiten einer werkstoffabhängigen, kritischen Spannungsdicke am Einzelkorn, aber auch von der Mikrogeometrie der Schneidkörner ab.



**Bild 2:** Oberflächen spröde, gemischt und duktil geschliffener Keramiken

### 5.4.3 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. Aufgrund der um etwa eine Größenordnung geringeren Schnittgeschwindigkeiten ist der thermische Einfluss beim Honen gegenüber dem Schleifen vergleichsweise gering. Infolgedessen zeigen gehonte keramische Oberflächen in der Regel keine Aufschmelzungen oder thermisch bedingten Risse. Es treten wie beim Schleifen duktile und spröde Werkstofftrennmechanismen nebeneinander auf. Welcher Mechanismus überwiegt, wird wesentlich von der Korneindringtiefe und der Schnittgeschwindigkeit bestimmt.

Bei der Bearbeitung von Siliciumcarbid- und Siliciumnitridwerkstoffen wurde durch HÖHNE [HÖH99] nachgewiesen, dass Oberflächengüten wie beim Schleifen durch Honen mit niedrigen Anpressdrücken realisierbar sind. Kleine Anpressdrücke bewirken kleinere Korneindringtiefen und führen damit zu geringerer Mikrorissbildung und Zerspanung. Weitere Untersuchungen bestätigten, dass beim Honen von Aluminiumoxid und Siliciumnitrid die Rauheit und Abtrennrate mit der Schneidkorngröße und dem Leistenanpressdruck zunehmen. 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 3).

Werkstück:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Nr. 8;  
 Werkzeug: D var. 50.320 C100;  
 Kühlschmierstoff: Honööl;  
 Einstellparameter:  $\alpha = 60^\circ$ ,  
 $v_c = 30 \text{ m/min}$

Quelle: [WEI97]

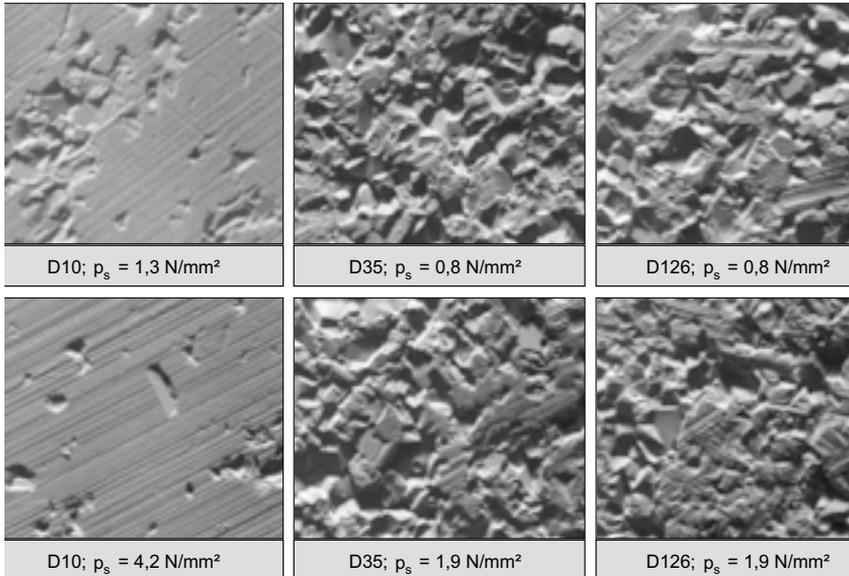
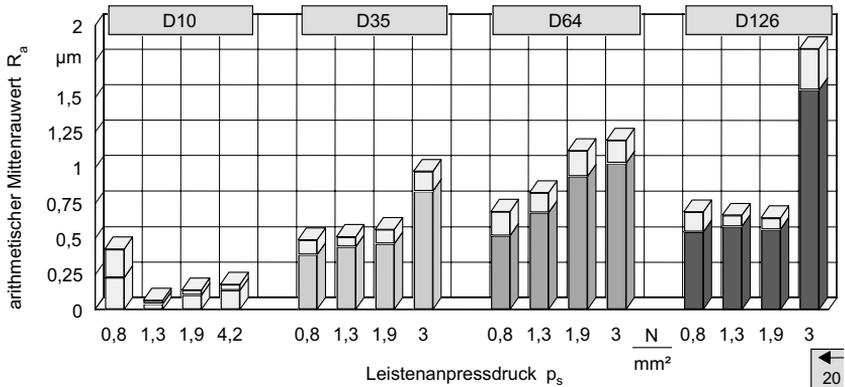


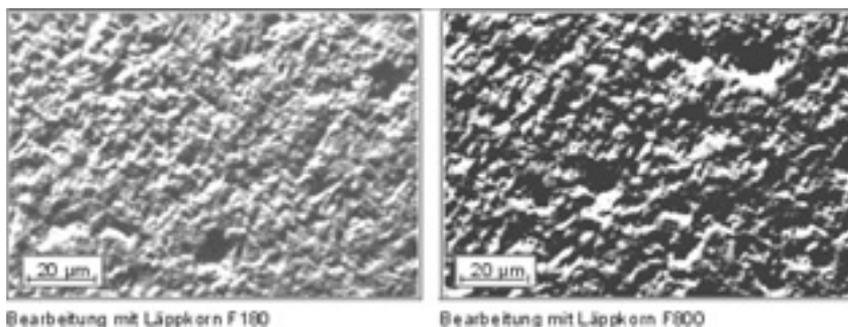
Bild 3: Oberflächenausbildung in Abhängigkeit von Korngröße und Anpressdruck beim Honen von Aluminiumoxid [WEI97]

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

### 5.4.4 Geläppte keramische Oberflächen

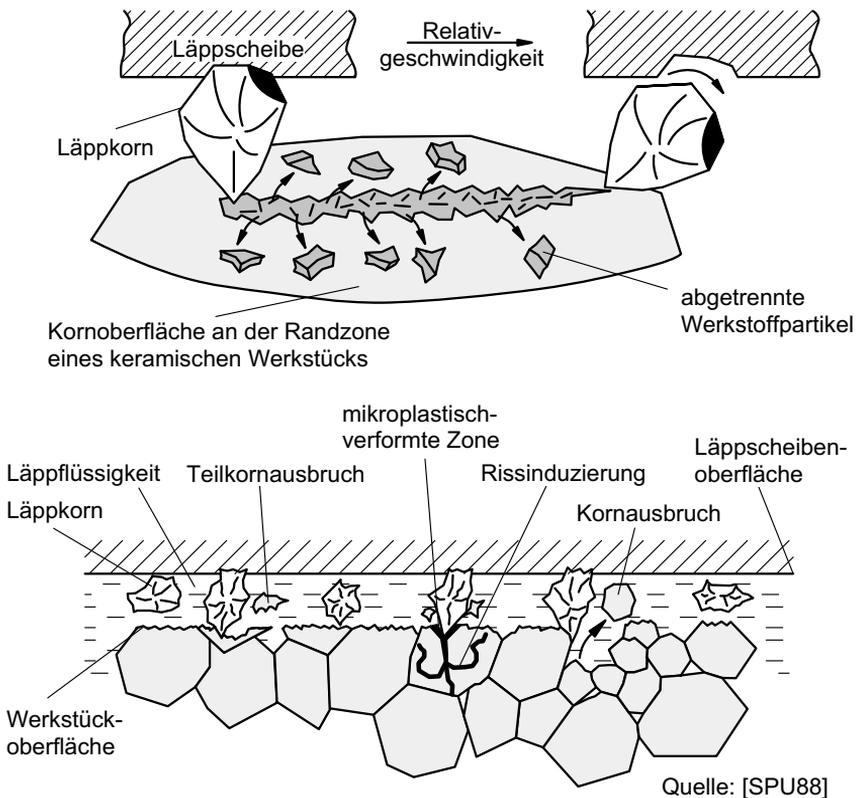
Läppen wird nach DIN 8589 definiert als Spanen mit losem, in einer Paste oder Flüssigkeit verteiltem Korn, dem Läppgemisch, das auf einem meist formübertragenden Gegenstück (Läppwerkzeug) bei möglichst ungeordneten Schneidbahnen der einzelnen Körner geführt wird.

Aufgrund der niedrigen Zeitspannungsvolumina werden Läpp-Prozesse meist für Bearbeitungsaufgaben mit geringen Aufmaßen zur Verbesserung von Formgenauigkeiten und Oberflächengüten eingesetzt. Charakteristisch sind die mikrogeometrisch nahezu isotropen Oberflächentopographien mit regellos angeordneten Riefen, einer Vielzahl sehr homogen verteilter Mulden sowie vereinzelt interkristallinen Oberflächenausbrüchen (Bild 4). Diese Strukturen erweisen sich vielfach bei hohen tribologischen oder optischen Funktionsanforderungen als vorteilhaft [KÖN96].



**Bild 4:** Geläppte Siliciumcarbid-Oberflächen

Die Werkstofftrennmechanismen spröder Zerspanung wirken sich beim Läppen keramischer Werkstoffe günstig auf das Zeitspannungsvolumen aus, da das Volumen des abgetrennten Werkstoffs größer sein kann als das durch das Schneidkorn verdrängte Volumen [SAB91]. Die Werkstofftrennung beim Läppen ist einerseits durch Eingriff der Schneidkörner infolge ihrer Abrollbewegung und andererseits durch Ritzen aufgrund temporärer Verankerung der Schneidkörner in der Läppscheibe gekennzeichnet (Bild 5).



**Bild 5:** Modelle der Werkstofftrennung beim Läppen

Die beim Läppen erreichbaren Oberflächengüten sind vom Gefüge des bearbeiteten keramischen Werkstoffes abhängig. Je feinkörniger und

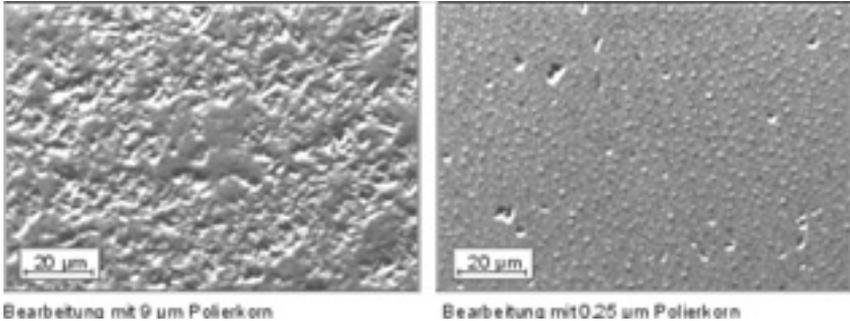
dichter der Werkstoff ist, um so höher ist die erreichbare Oberflächen-güte. Je nach Korngröße, Einstellbedingungen und Gefügebau der zu läppenden Keramik sind Formgenauigkeiten von  $1\ \mu\text{m}/\text{m}$ , Planparallelitäten bis zu  $0,2\ \mu\text{m}$  und Mittenrauwerte  $R_a < 0,3\ \mu\text{m}$  erreichbar [SPU88, BE190].

### 5.4.5 Polierte keramische Oberflächen

Polieren ist nach DIN 8589 kein eigenständiges Fertigungsverfahren und wird nur in Verbindung mit anderen Fertigungsverfahren eingesetzt. Man unterscheidet Verfahren, wie z. B. Polierschleifen, Polierhonen, Polierlappen und elektrolytisches Polieren sowie Polieren durch Beschichten (Auftragen von Politur mit mechanischer Bearbeitung). 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 Zeitspannungsvolumina zeit- und kostenaufwendig.

Die beim Polieren wirkenden Mechanismen konnten noch nicht eindeutig geklärt werden. Insbesondere bei der Bearbeitung duktiler Werkstoffe existieren widersprüchliche Theorien. Einerseits wird von einem Umformen der Oberflächenprofilspitzen ausgegangen, wobei der Werkstoff in die vorhandenen Profiltäler gequetscht wird. Andererseits ist aufgrund der zu verzeichnenden Materialabnahme ein spanabhebender Prozess anzunehmen [SAM72].

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 Spannungsdicken im Nanometerbereich erklärbar. Verschiedene Untersuchungen deuten auf eine zu vernachlässigende Schädigung der Oberflächenrandzone beim Polieren hin [SPU92]. Polierte Oberflächen sind in Abhängigkeit von der Polierzeit und dem eingesetzten Polierkorn durch glatte Bereiche und Mulden charakterisiert. Andere Oberflächencharakteristika sind nur vereinzelt anzutreffen und nicht typisch (Bild 6).



**Bild 6:** Polierte Siliciumcarbid-Oberflächen

#### 5.4.6 Sonderverfahren

Neben den beschriebenen Fertigungsverfahren, deren Einsatz bei der Hartbearbeitung keramischer Werkstoffe weit verbreitet ist, existieren Sonderverfahren. Hierzu gehören einerseits Fertigungsverfahren, die industriell eingesetzt werden, aber aufgrund verfahrensimplanter Eigenschaften keine weite Verbreitung gefunden haben. Zu nennen sind hier das Schwinglappen oder die funkenerosive Bearbeitung.

Andererseits sind in den letzten Jahren einige neue Fertigungsverfahren bekannt geworden, die zukünftig eine wichtige Rolle bei der keramikgerechten Bearbeitung spielen können. Das Planschleifen mit Lappkinematik stellt eine innovative Weiterentwicklung des Planparallelläppens dar [UHL99]. Durch den Einsatz von gebundenem Abrasivkorn können die Zeitspannungsvolumina signifikant erhöht werden. Die Überlagerung der Kinematik verschiedenster Schleifprozesse mit Ultraschallschwingungen führt zu günstigen Werkstofftrenn- und Verschleißmechanismen [UHL00]. So können z. B. beim ultraschallunterstützten Schleifen mit Anregung in axialer Richtung Oberflächentopographien geschaffen werden, deren tribologisches Einsatzverhalten sich als positiv erwiesen hat [ZAP98].

Weitere kombinierte Verfahren sind das laserunterstützte Drehen und Fräsen. Diese sind jedoch bislang nur für die Zerspannung von Siliciumnitrid einsetzbar. Bei der laserunterstützten Bearbeitung wird der Umstand ausgenutzt, dass durch Erwärmung der Glasphase mittels eines

Laserstrahls ein verbessertes Zerspanverhalten erreicht wird. Die erzeugten Oberflächen sind geschliffenen Oberflächen sehr ähnlich.

### 5.4.7 Zusammenfassung

Maßgeblich für die Charakteristika keramischer Oberflächen bei spanender Bearbeitung sind die vorherrschenden Werkstofftrennmechanismen, der verwendete Werkstoff sowie die eingesetzte Fertigungstechnologie. Im ersten Teil dieser Veröffentlichung wurden in Ergänzung zur DIN die keramikspezifischen Oberflächencharakteristika abgebildet und benannt. Dies ermöglicht eine einheitliche und vollständige Beschreibung einer Oberflächentopographie. Als Grundlage wurden keramikspezifische Werkstofftrennmechanismen sowie der Einfluss des Werkstoffs auf die Ausbildung der Oberflächentopographie dargestellt. Der vorliegende Teil des Beitrages befasst sich mit dem Einfluss der wichtigsten spanenden Bearbeitungsverfahren Schleifen, Honen, Läppen und Polieren auf die Oberflächenentstehung bei der Hartbearbeitung keramischer Bauteile und geht abschließend auf ausgewählte Sonderverfahren.

### Literatur

- [BEI90] Beitz, W., Küttner, K.-H.: *Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau*. 17. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 1990
- [HÖH99] Höhne, L.: *Honen technischer Keramik*. Essen, Vulkan-Verlag, 1999. - Braunschweig, Techn. Universität, Fachbereich 7, Diss., 1998
- [KÖN96] König, W., Klocke, F.: *Fertigungsverfahren*. Bd. 2: Schleifen, Honen, Läppen. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996
- [SAB91] Sabotka, I.: *Planläppen technischer Keramiken*. Dissertation, TU Berlin, 1991
- [SAM72] Samuels, L.E.: *Mechanism of Abrasive Polishing*. Anals of the CIRP Vol. 21/1/1972, S. 87-88
- [SPU88] Spur, G., Sabotka, I., Tio, T., Wunsch, U.: *Überblick über trennende Fertigungsverfahren zur Hartbearbeitung von Keramik*. In. Technische Keramik. Ausgabe 1, Vulkan Verlag, Essen, 1988

- [SPU89] Spur, G., Linke, K., Sabotka, I., Tio, T.H., Uhlmann, E.: *Keramikbearbeitung*. München, Carl Hanser Verlag, 1989
- [SPU92] Spur, G., Holz, B., Sabotka, I., Uhlmann, E.: *Oberflächenentstehung bei der Bearbeitung sprödharter Werkstoffe*. Tagungsband zum VIII Internationalen Oberflächenkolloquium, Chemnitz, 03.-05.02.1992
- [UHL93] Uhlmann, E.: *Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe*, Dissertation, TU Berlin 1993
- [UHL99] Uhlmann, E.; Ardelt, T.: *Influence of Kinematics on the Face Grinding Process of Lapping Machines*. Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999, S. 281-284
- [UHL00] Uhlmann, E.; Holl, S.-E.; Daus, N.-A.: *Bearbeitungsbedingte Randzonenbeeinflussung von keramischen Werkstoffen durch ultraschallunterstütztes Schleifen*. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 59. Ausgabe, 2000, Vulkan-Verlag GmbH, S. 45-57
- [WEI97] Weigmann, U.-P.: *Honen keramischer Werkstoffe*. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Berlin, Techn. Universität, Diss., 1997
- [WES92] Westkämper, E. ; Höhne, L.: *Honing of Advanced Ceramics*. International Honing Clinic, April 7-9, 1992, Dearborn, Michigan
- [WIM95] Wimmer, J.: *Konditionieren hochharter Schleifscheiben zum Schleifen von Hochleistungskeramik*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1995
- [ZAP98] Zapp, M.: *Ultraschallunterstütztes Schleifen von Hochleistungskeramik – Ein Beitrag zur gezielten Beeinflussung der Eigenschaften von Bauteilen durch eine ganzheitliche Prozeßkettenbetrachtung*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1998

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 9) finden sich auf den folgenden Seiten.

# Mechanik und Elektronik

## Hartbearbeitung – Toleranzen und Oberflächen

Carsten Rußner  
CeramTec AG  
Lauf a.d. Pegnitz



## Hartbearbeitung, Oberflächen und Toleranzen

- gängige Hartbearbeitungsverfahren
    - Schleifen
    - Läppen
    - Honen
    - Polieren
  - werkstoffspezifische Trennmechanismen
  - Genauigkeiten und Hartbearbeitungskosten
- Ziele:**
- entstehende Oberflächen
  - Einfluß Werkstoffeigenschaften auf die geschliffene Oberfläche
  - Toleranzen

## Hartbearbeitung und Oberflächen



wird notwendig bei

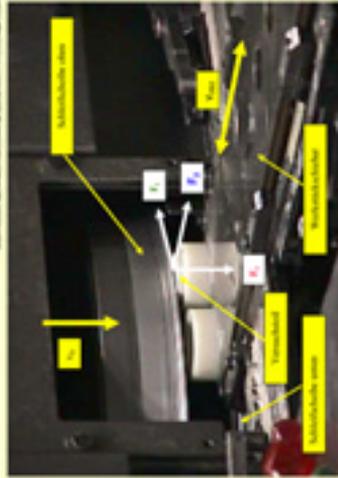
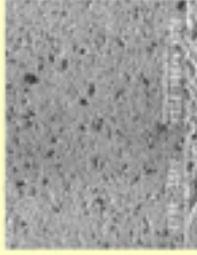
- erhöhten **Anforderungen** an die **Maßgenauigkeit**
- erhöhten **Anforderungen** an die **Oberflächen**

ist verbunden mit

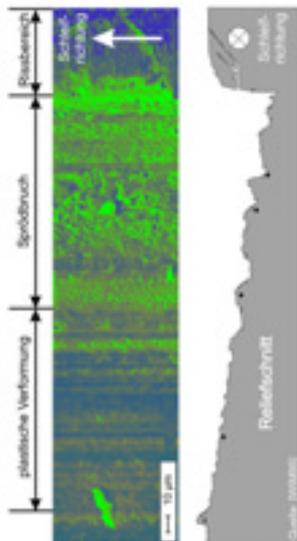
- hohen **Werkzeugkosten**
- **hohen Bearbeitungszeiten**

benötigt angepasste Prozesse

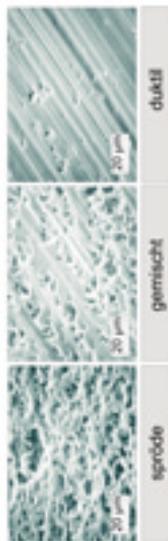
- an den **Werkstoff**
- an die **Kosten**



## Geschliffene keramische Oberflächen



- **bahngebundene Ritzbewegungen**  
gebundenes Korn
- **Sprödes Zerspanen:**  
Ausbrüche, Aufwerfungen,  
Schollen und Ablätzungen
- **Duktiles Zerspanen:**  
Plastische Verformungen Riefen,  
Verrundungen, Schichtungen,  
Schuppen
- **Realprozeß:**  
Mischzerspanung  
kritische Spannungsdicke

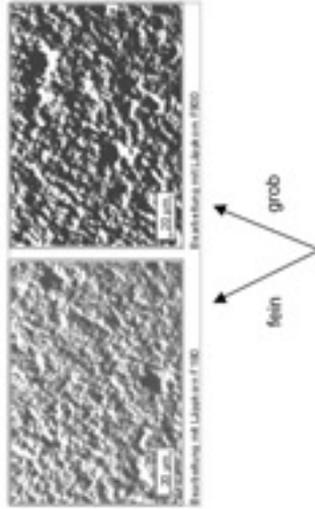


Quelle: AMDT

## Geläppte keramische Oberflächen



- Ritzbewegungen **loses Korn**
- **ungeordnete Schneidbahnen**
- Niedriges  
Zeitspannungsvolumen
- **Werkstofftrennung**
  - Abrollbewegung
  - Ritzten temporär verankerter  
Schneidkörner
- **isotrope  
Oberflächentopographie**
  - regellos angeordnete Riefen
  - homogen verteilter Mulden



Einfluß des Lappkorns auf die Oberflächenqualität

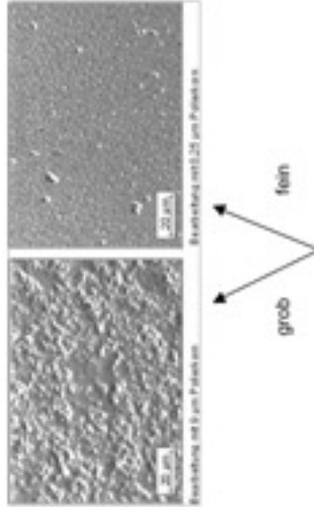
Quelle: ANDI



## Polierte keramische Oberflächen



- **Ritzbewegungen gerichtet**
- optisch spiegelnde Oberflächen mit **Ebenheiten < 1 µm**.
- geringe Zeitspannungsvolumina
- zeit- und kostenaufwendig
- **Werkstoffabtrag**
  - Umformen der Oberflächenprofilspitzen
  - spanabhebender Prozess
- Oberflächencharakteristik
  - glatte Bereiche
  - Mulden



Einfluß des Diamantkorns auf die Oberflächenqualität

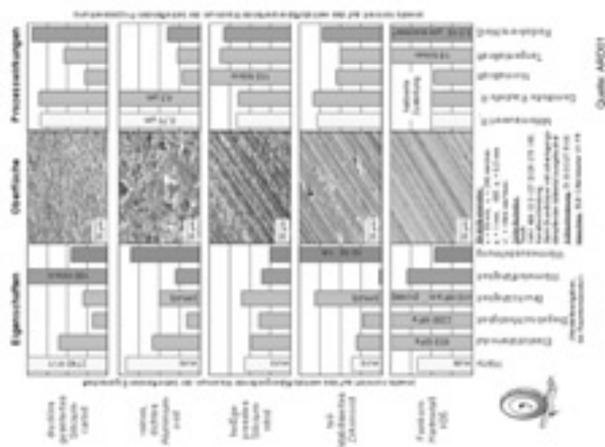
Quelle: ANOFT

## Oberflächen und Prozesswirkungen

- Trennmechanismus
- bearbeitungsabhängige Oberflächenausbildung

ist

**werkstoffspezifisch**



## Hartbearbeitungskosten und Genauigkeiten



### je genauer desto teurer?

- Prozesswahl
- Spitzenloses Durchgangs- oder Einstechschleifen billiger als Rundschleifen bei gleicher Genauigkeit  
Konstruktion beachten

### haltbare Toleranzen in der Großserie

- Außen- und Innendurchmesser +/- 3µm
- Höhe +/- 5 µm

### Prozesszeiten pro Stück

- Außen- und Innendurchmesser von 2 s bis 30 s
- Höhe 3 s bis 30 s je nach eingesetzter Bearbeitungsmaschine

