

3) Maschinen- und Anlagenbau

3.1 Universell und doch speziell: Hartbearbeitung von Keramik

- Carsten Rußner
CeramTec AG
Lauf a. d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 248.

In vielen technischen Anwendungen steigen die Anforderungen an die Genauigkeit zur Einhaltung der Maßtoleranzen. Beim Einsatz von hochproduktiven Schleifmaschinen sind hierfür bessere Prozessführungsstrategien erforderlich. Ein Ansatz hierzu besteht in der Abrichtstrategie von keramisch gebundenen Diamantschleifscheiben.

In der Herstellung von technischer Keramik stellt nach Formgebung und Brand die Endbearbeitung durch produktspezifische Schleif- und Polierverfahren nach wie vor einen entscheidenden Zeit- und Kostenfaktor dar. Auf dem Gebiet der Endbearbeitung werden seit über 50 Jahren erfolgreich das Centerless Schleifen, das Einstechschleifen auf Centerlessmaschinen, das Rundschleifen und das Seitenschleifen mit Diamantschleifscheiben eingesetzt. Diese Standardverfahren werden vor allem in der Massengbearbeitung von sprödharten Werkstoffen verwendet. Aufgrund der Notwendigkeit, sprödharte Werkstoffe mit Diamantschleifscheiben zu bearbeiten, wurden bisher nur allgemeine Maßtoleranzen erreicht, welche für Applikationen in der Automobilindustrie nur selten ausreichen. Der Erfolg der Schleifbearbeitung begründet sich einzig durch das Abrichten der Diamantwerkzeuge.

3.1.1. Abrichten mit rotierenden Diamantwerkzeugen

3.1.1.1. Grundlagen der Abrichttechnologie

Die Einsatzvorbereitung von Schleifscheiben dient dazu, Topographie und Geometrie der Werkzeuge für den anschließenden Bearbeitungsprozess einzustellen und wird als Konditionierung bezeichnet. Zum Konditionieren gehören das Profilieren, ein Schärfvorgang und eventuell ein Reinigungsprozess. Auf der einen Seite ist die Bearbeitung einer Schleifscheibe mit einem abrasiven, aber weicheren Werkzeug möglich. Dabei wird so lange die Bindung zwischen den Hartstoffkörnern zurückgesetzt, bis durch heraus fallende Körner die gewünschte Kontur erreicht ist. Auf der anderen Seite ist das Profilieren einer Schleifscheibe mit härteren Werkzeugen möglich. Typisches Beispiel ist das Konditionieren konventioneller Schleifscheiben mit stehenden oder rotierenden Diamantwerkzeugen.

Für eine Schleifbearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe wie Hartmetall, Titan, Glas oder Keramik kommen nur Diamantschleifscheiben in Frage. Diamantschleifscheiben werden zumeist außerhalb der Produktionsmaschine mit Siliziumkarbid profiliert. Im Gegensatz dazu bietet die Einsatzvorbereitung mit rotierenden Diamantwerkzeugen viele Vorteile hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit.



Bild 1: Abrichten

3.1.1.2. Bearbeitungsparameter beim Abrichten

Die Bearbeitungsparameter beim Abrichten beeinflussen maßgeblich die Topografie der Schleifscheibe. Eine raue Schleifscheibe ist schnittfreudig und ermöglicht hohe Zeitspannungsvolumina. Glatte Schleifbeläge führen zu höheren Schleifkräften und -temperaturen, ermöglichen aber geringere Rauheiten an der Werkstückoberfläche. Von besonderer Bedeutung ist die Festlegung der maschinenseitigen Abrichtparameter:

Der **Überdeckungsgrad** U_D gibt an, wie häufig ein Punkt auf der Schleifbelagsfläche pro Abrichthub vom Abrichtwerkzeug überstrichen wird. Dieser Wert wird als Quotient aus der Eingriffsbreite des Abrichtwerkzeuges und dem Vorschub pro Schleifscheibenumdrehung gebildet. Je größer der Überdeckungsgrad gewählt wird, desto glatter wird die Schleifscheibe.

Das **Geschwindigkeitsverhältnis** q_d bezeichnet den Quotienten aus den Umfangsgeschwindigkeiten beider Wirkpartner. Das Vorzeichen dieses Quotienten kennzeichnet Gleich- und Gegenlauf. Dieser Parameter legt die Bahnkurve fest, entlang der ein Schneidkorn des Abrichtwerkzeuges in die Schleifscheibe eingreift. Im Gleichlauf greifen die Abrichtdiamanten auf spitzen Bahnkurven in die Schleifscheibenoberfläche ein und erzeugen raue Topographien. Im Gegenlauf bewegen sich die Diamanten der Abrichtrolle auf lang gestreckten Bahnen durch den Schleifkörper, so dass hier glattere Oberflächen entstehen.

Von der **Zustellung** a_{ed} hängt es ab, ob der Abrichter mit den Schneidkörnern der Schleifscheibe in Kontakt kommt oder auch mit der tiefer liegenden Bindung. Vom Touch-Dressing spricht man dann, wenn die Abrichtzustellung so gering ist, dass nur ein kleiner Teil des Kornüberstandes abgetrennt wird. Anschließend ist ein ausreichender Kornüberstand für die weitere Schleifbearbeitung gegeben.

3.1.2. Praktische Anwendungsbeispiele

3.1.2.1. Formschleifen von Keramik

In diesem Beispiel wurde auf einer Walter Helitronic Power Maschine eine keramisch gebundene Diamantschleifscheibe mit Vollradius abgerichtet. Dieses Profil dient zum Formschleifen an Freiformflächen keramischer Bauteile aus dem Medizinsektor. Eingesetzt wurde eine Schleifscheibe mit dem Durchmesser 200 mm, einem Vollradius von 16 mm Breite und der Spezifikation D64 V+ 2064 C100. Als Abrichtwerkzeug diente eine Winter-DDS-Formrolle. Abgerichtet wurde mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 20 m/s bei einem Geschwindigkeitsverhältnis von $q_d = 0,3$ und unterschiedlichen Überdeckungsgraden. Durch Variation des Zeilenvorschubes beim Schleifen wurde die kinematische Rauheit so weit gesenkt, dass die anschließenden Polierzeiten minimiert werden konnten.

3.1.2.2. Einstechen von Keramiken und Hartmetallen

Hier wurden auf einer Rundschleifmaschine des Typs Studer S30 CNC Rundmaterialien aus Si_3N_4 -Keramik sowie aus K10-Hartmetall durch Einstechschleifen bearbeitet. Es kamen keramisch gebundene, mit Winter-DDS-Formrollen abgerichtete Schleifscheiben mit Diamantkorngrößen zwischen D46 und D91 zum Einsatz. Dabei ließen sich Abweichungen zwischen Soll- und Istprofil von teilweise weniger als $\pm 3 \mu\text{m}$ erreichen. Die Schleifscheiben waren immer nach dem Abrichten ohne zusätzlichen Schärfprozess sofort einsetzbar.

3.1.2.3. Schältschleifen von Keramiken und Hartmetallen

In einem dritten Beispiel wurden auf dem gleichen Maschinensystem Schältschleifversuche an Hartmetallrundstäben der Qualität K10 durchgeführt. Hier wurde die Schleifscheibenspezifikation D91 V+ 2046 C150 mit einer DDS-Rolle zylindrisch abgerichtet. Dabei betrug $v_{cd} = 40 \text{ m/s}$, $q_d = 0,7$ und $U_d = 15$. Anschließend wurden die Rohlinge mit unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten, Zustellungen und Vorschüben bearbeitet. Die besten Rauheiten wurden mit $R_a = 0,12$

μm bei $v_c = 40 \text{ m/s}$ und $a_e = 0,2 \text{ mm}$ und einem axialen Vorschub von 100 mm/min erreicht. Bei der höchsten eingestellten Zerspanleistung mit $v_c = 60 \text{ m/s}$, $a_e = 0,1 \text{ mm}$ und $v_{fa} = 300 \text{ mm/min}$ wurde ein arithmetischer Mittenrauwert von $0,14 \mu\text{m}$ gemessen. Vergleichbare Qualitäten konnten auch an Rohlingen aus Siliziumnitrid-Keramik erreicht werden.

3.1.2.4. Bohrernutenschleifen

Bei Versuchen auf einer mit einer Abrichtspindel ausgerüsteten Walter Helitronic Power wurden keramisch gebundene Diamantschleifscheiben der Spezifikation D76 V+ 3438 C100 mit Winter-DDS-Formrollen als Nutenschleifscheibe profiliert. Anschließend konnten bei Schnittgeschwindigkeiten zwischen 18 m/s und 50 m/s im Tief-schliff in der Nut mit einer Zustellung von $3,5 \text{ mm}$ Vorschübe von bis zu 150 mm/min realisiert werden. Bei diesem Prozess treten im Nutgrund immense Zeitspannungsvolumina von $Q'_w > 8,75 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ auf.

3.1.2.5. Centerlesschleifen

Für die Centerlesschleifbearbeitung von Automobilkomponenten sind insgesamt drei Einflussfaktoren für die prozessfähige Massenproduktion besonders wichtig: Die Formgenauigkeit der gelieferten Schleifscheiben, die Schleifkräfte und die Abrichttechnologie der Schleifscheiben, welche meistens durch Einschicken zum Schleifscheibenhersteller realisiert wird. Der Einfluss von technologischen Vererbungen (z. B. Schwindungstoleranzen) aus der Prozesskette für qualitätskritische Masse wurde nicht betrachtet, da dies aufgrund von mehreren Schleifdurchgängen nicht notwendig wurde.

Standardmäßig werden heute in der sprödharten Schleiftechnologie Schleifmaschinen eingesetzt, welche eine Besonderheit der neuen Centerlesschleifmaschinen nicht besitzen: „Eine Abrichteinheit mit rotierender Formrolle“. Die neuen, extrem steifen Centerlesschleifmaschinen der Firmen Mikrosa, Modler, PeTeWe und LMT sind jetzt mit entsprechender Software und Abrichteinheiten ausgerüstet, um

Diamantschleifscheiben in der Maschine zu konditionieren. Somit ist die Möglichkeit geschaffen, in engere Maßgenauigkeiten vorzustoßen. Als weiterer Vorteil kann die eingebaute Diamantschleifscheibe hinsichtlich Formgenauigkeit sowie benötigter Oberflächengüte der Werkstücke abgerichtet werden. Ansonsten unterscheiden sich die Maschinenparameter zur Bearbeitung von sprödharten Werkstoffen wenig von denen anderer Werkstoffe. Aufgrund der niedrigeren Vorschubgeschwindigkeit und des geringeren Abschliffes je Durchgang ist das Schleifen von Keramik jedoch kostenintensiver.

3.1.2.6. Centerlesschleifen für Pumpenrollen

Eine bisher neu umgesetzte Anwendung findet sich in den Pumpenrollen. Folie 17 zeigt die notwendigen Toleranzen einer gehonten logarithmischen Pumpenrolle. Die spannungsoptimierte Rolle muss von der Mitte aus zu den Stirnflächen logarithmisch um $1,7 \mu\text{m}$ fallen, um in der Anwendung einen optimalen Spannungsverlauf ohne extreme Spannungsspitzen zu erreichen. Um bei der Honbearbeitung diese Verläufe zu erreichen, muss die vorhergehende spitzenlose Schleifbearbeitung mittels keramisch gebundener Diamantschleifscheiben in einem Bereich von $11,612 \pm 0,002 \mu\text{m}$ liegen.

Wird eine heutige Standardproduktion über einen Zeitraum von vier Jahren mit metallgebundenen Diamantschleifscheiben der Breite 125 mm analysiert, kann hiermit eine Fertigung prozesssicher innerhalb von $50 \mu\text{m}$ gehalten werden, jedoch niemals innerhalb der benötigten zwei Mikrometer. Das Erreichen solcher Toleranzen ist nur mit in der Maschine abgerichteten keramisch gebundenen Schleifscheiben und mit nur einem Schleifdurchgang möglich. Die produktionstechnische Herausforderung liegt in der neuartigen Schleifscheibengeneration und der dazu angepassten Abrichttechnologie.

3.1.2.6.1. Abrichten

Folie 15 zeigt die eingesetzte Schleifscheibe der Fa. Saint Gobain Abrasives. Im oben genannten Fall wurde eine segmentierte Scheibe verwendet. Der Aufbau ist in zwei Bereiche aufgeteilt.

- Schrubbereich (Grobkornzone)
D151 V+ 2046 N1TV C150 E
- Schlichtbereich (Feinkornzone)
D46 V+ 2046 N1TV C150 E

Als Abrichtrolle wurde eine rotierende DDS Rolle der Firma Saint Gobain Abrasives mit einer aktiven Breite von 1,2 mm eingesetzt. Von entscheidender Bedeutung für den Schleiferfolg sind die eingesetzten Abrichtparameter:

Das Geschwindigkeitsverhältnis $q_d = 0,4$ beim Abrichten, der Überdeckungsgrad $U_d = 57$, die Abrichtgeschwindigkeit der Schleifscheibe bei $v_s = 50$ m/s bei einer Drehzahl $n_s = 2388$ min⁻¹ sowie einer Zustellung der Formrolle von $a_{ef} = 0,002$ mm. Diese Werte wurden innerhalb von mehreren Projekten als die besten Einstellungen ermittelt.

Um die entsprechenden Genauigkeiten beim Schleifen für die Pumpenrollen zu erreichen, muss im Schrubbereich ein Radius von 4.200 mm auf 80 Prozent der Länge angebracht werden, welcher die Schleifscheibe zum Schleifspalt in Größe des Aufmaßes öffnen muss. Aufgrund der hohen Abrasivität sprödharter keramischer Werkstoffe kam die oben bezeichnete segmentierte Schleifscheibe zum Einsatz. Die Wahl der Bindung sowie der hohen Konzentration von 150 entstand aus dem Wunsch, eine hohe Standzeit der Formgenauigkeit zu erreichen. Entsprechend gestaltete sich der Abrichtprozess anfangs problematisch. Die Gründe hierfür sind zum einen das blockige Korn im Schrubbereich, die hohe Konzentration sowie die Bindungshärte, zum anderen die Überlappung der Segmente im Auslauf. Die Schleifscheibe konnte mit einem erhöhten Verschleiß der Formrolle abgerichtet werden.

3.1.2.6.2. Ergebnis und Ausblick

Nach Konditionieren der Schleifscheibe wurden 5.000 Pumpenrollen geschliffen. Das Ergebnis ist in Folie 18 zusammengestellt. Insgesamt konnte innerhalb der genannten Durchmessertoleranz produziert werden. Die Formtoleranzen sowie die Oberflächengüten sind in Folie 17

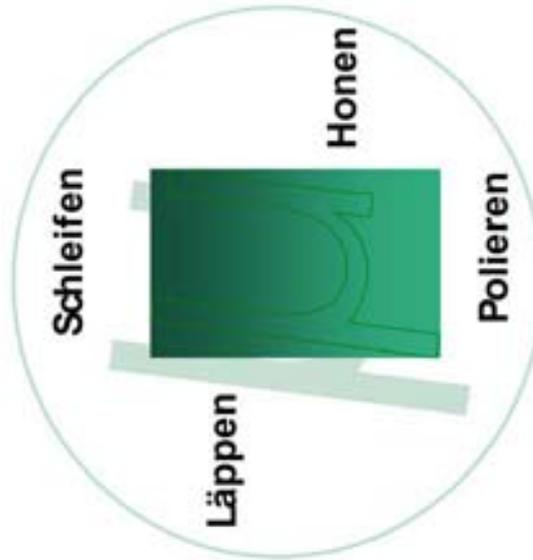
zu entnehmen. Die Rundheit und Zylinderform lagen bei $1,07\ \mu\text{m}$ und $1,31\ \mu\text{m}$. Erfolgreich konnte weiterhin die Oberflächengüte mittels Schlichtzone und der veränderten Körnunggröße sowie durch die eingestellten Abrichtparameter beeinflusst werden. Die R_z -Werte lagen für den bearbeiteten Siliziumnitridwerkstoff bei $1,3\ \mu\text{m}$ im Mittelwert. Aufgrund der hohen Verschleißbeständigkeit der Schleifscheibe konnte durch Regelung des Schleifspaltes die Genauigkeit gehalten werden. Da das Abrichten mittels DDS-Formrolle sich extrem schwierig gestaltete, müssen bei der nächsten Auslegung der Schleifscheibe Änderungen vorgenommen werden. Das Korn im Schrubbereich muss splitterfreudiger werden. Die Konzentration und die Bindungshärte sind zu reduzieren. Insgesamt konnte jetzt ein Verfahren zur Bearbeitung sprödharter keramischer Werkstoffe in die Produktion integriert werden, mit dem die bisher in der keramischen Industrie gültigen Genauigkeiten deutlich in Richtung Automobilzuliefermarkt verbessert werden konnten. Das Abrichten von keramisch gebundenen Diamantschleifscheiben mittels Formrollen ist die Schlüsselinnovation der letzten zwei Jahre, die sich langsam, aber zielsicher durchsetzt.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 20) finden sich auf den folgenden Seiten.

**Universell und doch speziell:
Hartbearbeitung von Keramik**

Carsten Rußner
CeramTec AG
Lauf a.d. Pegnitz





**Hartbearbeitung sprödharter
Werkstoffe – Vision und
Wirklichkeit !**

Wegweiser



- Werkstofftrennmechanismen sprödharter Werkstoffe
- produktive Hartbearbeitungsverfahren auf dem Prüfstand

- Schleifen
- Läppen
- Polieren



Ziele:



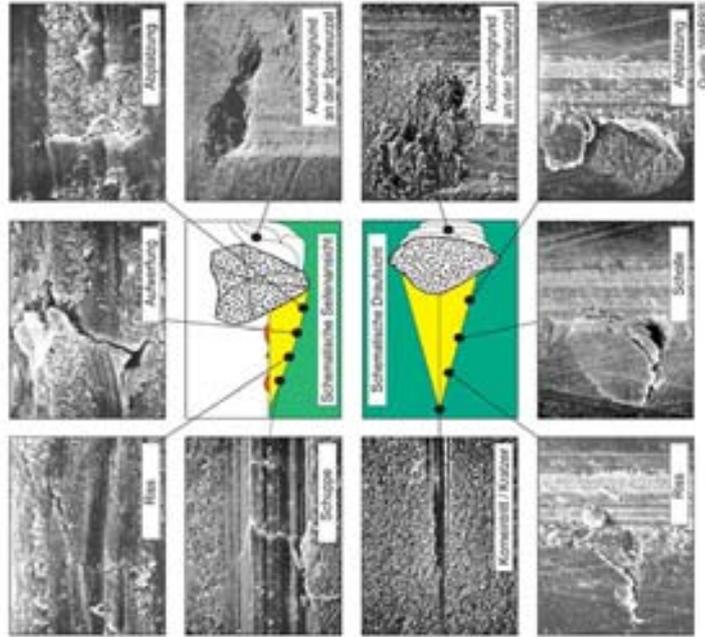
**Hartbearbeitungsverfahren sprödharter Werkstoffe
am Beispiel von Anwendungen**

Hartbearbeitung - so günstig wie noch nie ?

Werkstofftrennmechanismen



- spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch **unbestimmter Schneide**
- Trennmechanismus durch einzelne Abrasivkörner
- Oberflächenausprägung entlang einer Ritzspur



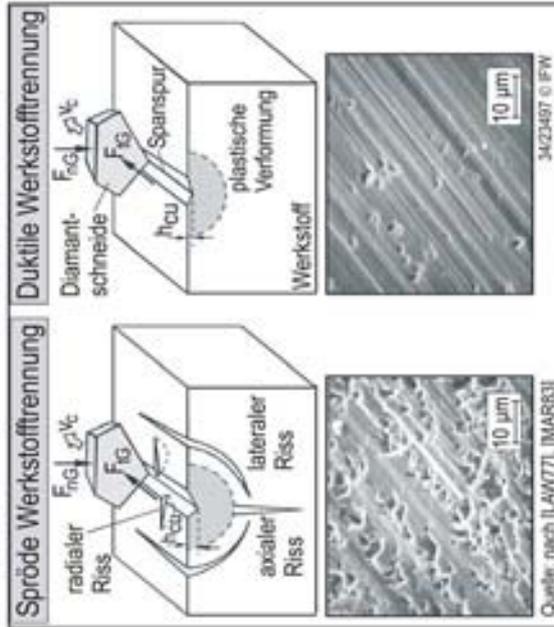
Quelle: [unreadable]

Quelle: ARD01

Auswirkung der Trennmechanismen

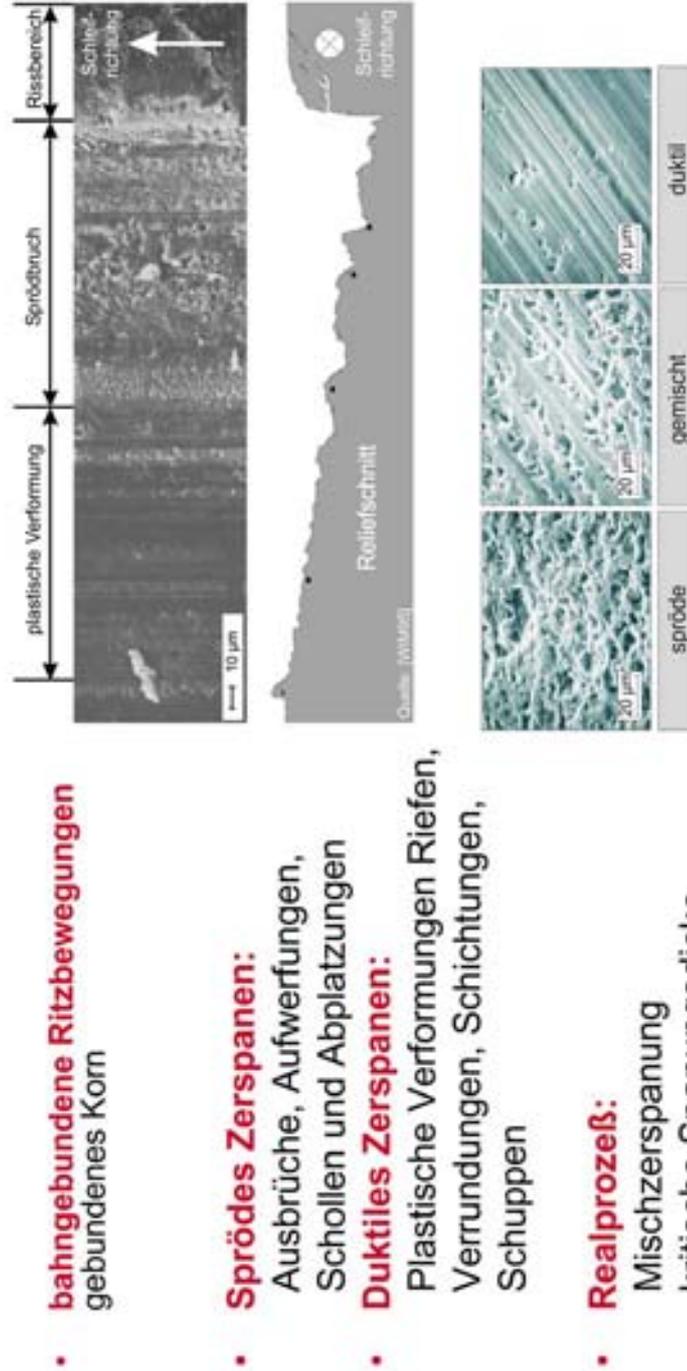


- I: spröde Werkstofftrennung
- II: duktile Werkstofftrennung
- Entstehung abhängig von:
↑ verwendeten Prozess- und Systemgrößen



Quelle: ARD01

Geschliffene keramische Oberflächen

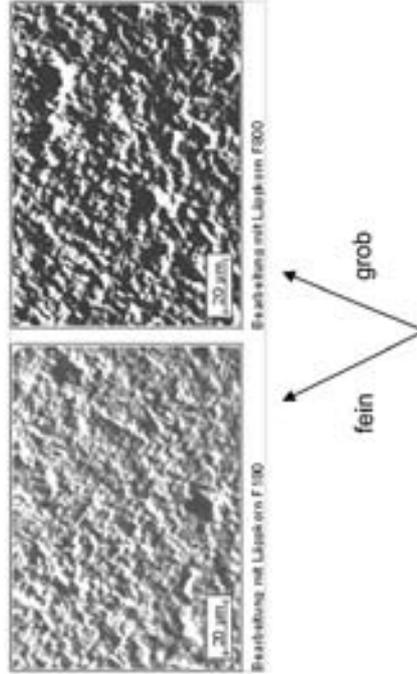


Quelle: ARD01

Geläppte keramische Oberflächen



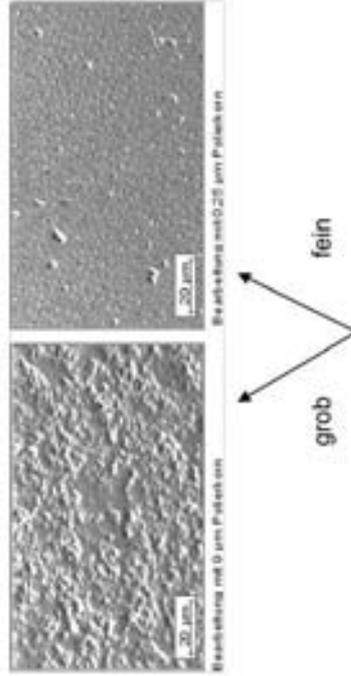
- Ritzbewegungen **loses Korn**
- **ungeordnete Schneidbahnen**
- Niedriges
Zeitspannungsvolumen
- **Werkstofftrennung**
 - Abrollbewegung
 - Ritzen temporär verankerter
Schneidkörner
- **isotrope
Oberflächentopographie**
 - regellos angeordnete Riefen
 - homogen verteilter Mulden



Einfluß des Läppkorns auf die Oberflächenqualität Quelle: ARD01

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



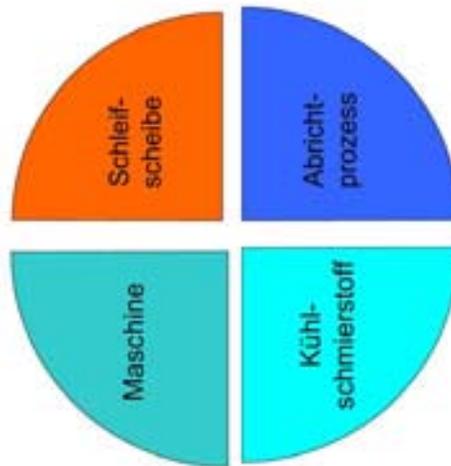
Einfluß des Diamantkorns auf die Oberflächenqualität

Quelle: ARD01

Wegweiser

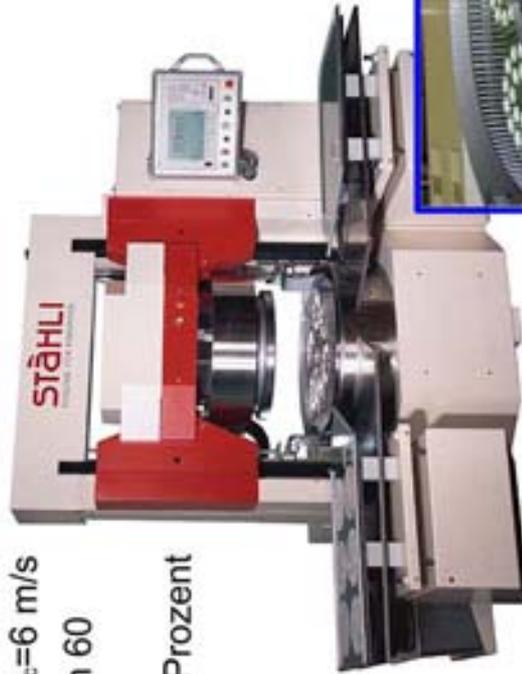
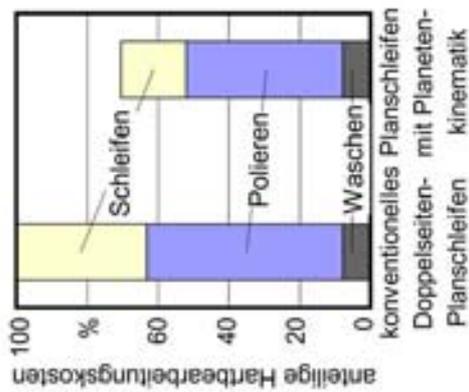


- Werkstofftrennmechanismen sprödharter Werkstoffe
- **produktive Hartbearbeitungsverfahren auf dem Prüfstand**

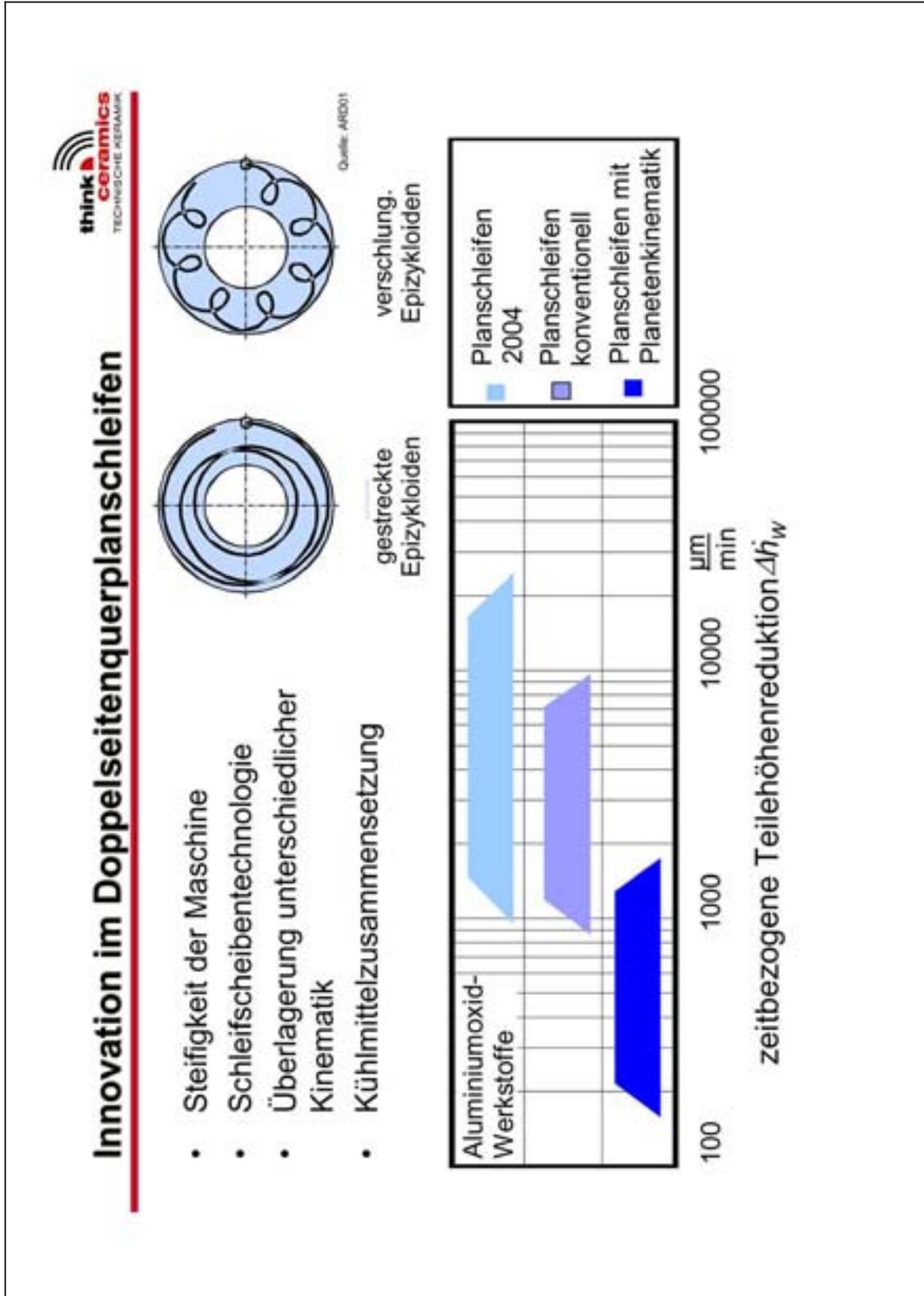


Doppelseitenquerschleifen mit Planetenkinematik

- Schnittgeschwindigkeit $v_c=6$ m/s
- Hauptzeitreduzierung um 60 Prozent
- Werkzeugkosten um 25 Prozent geringer



Doppelseitenquerschleifen mit Planetenkinematik von Dichtscheiben aus Aluminiumoxid



3.1 Hartbearbeitung - Folie 11

Abrichten von keramischen Diamantschleifscheiben

- Vorprofilierung mit Siliziumkarbid
- Profilierung mit rotierenden Diamantwerkzeugen erhöht Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit
- Schleifscheibe mit einem Vollradius von 16 mm Breite und der Spezifikation D64 V+ 2064 C100.
- Abrichtwerkzeug diente eine Winter-DDS-Formrolle.

Abrichtparameter:
Umfangsgeschwindigkeit 20 m/s,
Geschwindigkeitsverhältnis $q_d=0,3$

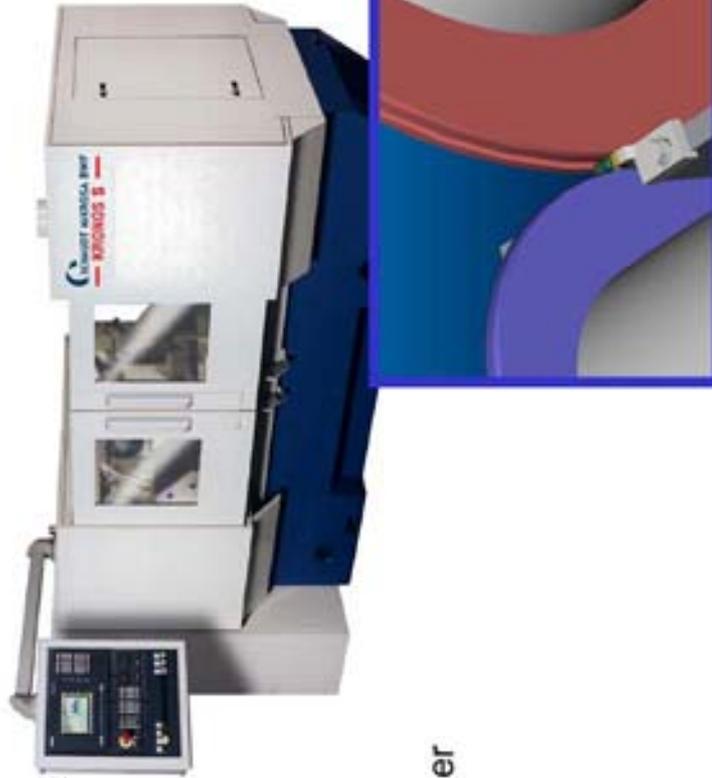
Variation des Zeilenvorschubs
senkt die kinematische Rauheit
Reduzierung der Polierzeiten



think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Schrägeinstechschleifen mit Spitzenlostechnologie

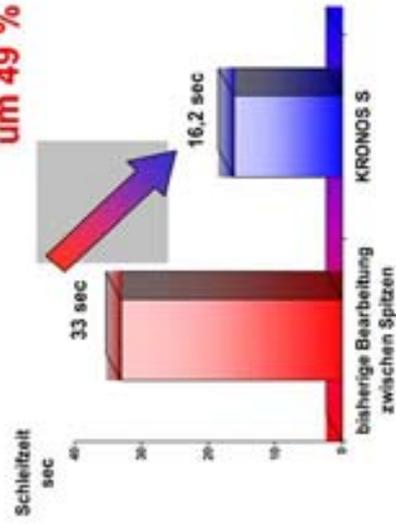
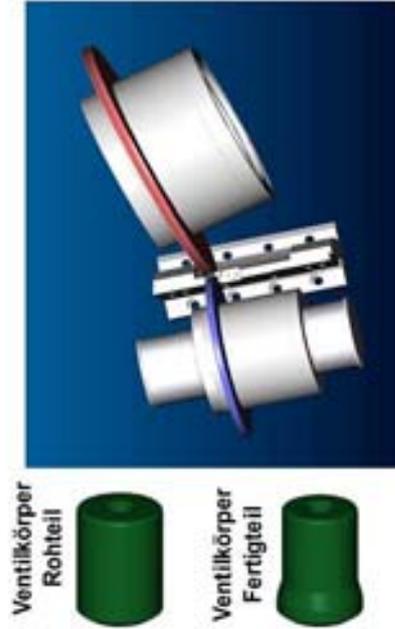
- hochprofitabel
- spannungsfreie Aufnahme der Werkstücke
- mehrere Werkstücke je Zyklus möglich
- Einsatz keramisch gebundener Diamantschleifscheiben
- hohe Formtreue der Schleifscheibe mit spezieller Abrichttechnologie
- einfache Automation
- Großserientechnik



Ergebnisse Schleifen von Siliziumnitrid

Schleifzeitvergleich

Reduzierung
der Schleifzeit
um 49 %





Formgenauigkeiten und Oberflächenwerte

	Soll	Ist
• Schleifzeit:	20 s	16,2 s
• Abrichtintervall:	nach 1000 Stück noch kein Verschleiß	
• Rundheit :	< 4,0 μm	2,04 $\mu\text{m}^{(1)}$
• Planlauf:	< 20 μm	3,07 $\mu\text{m}^{(1)}$
• Oberfläche Rz Ø6:	< 1,6 μm	2,02 $\mu\text{m}^{(1)}$
• Oberfläche Rz plan:	< 4,0 μm	1,89 $\mu\text{m}^{(1)}$
• Durchmesser:	$\pm 6 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$

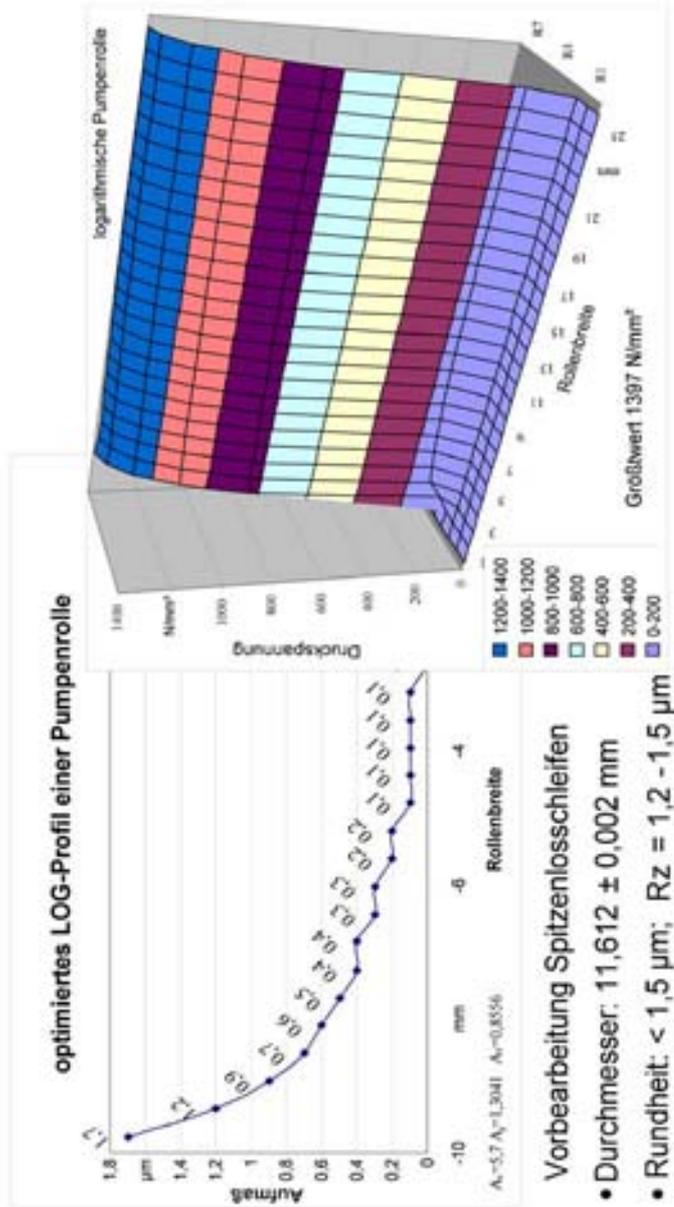
⁽¹⁾ Mittelwerte aus Stichprobe

Centerless Schleifen von Pumpenrollen



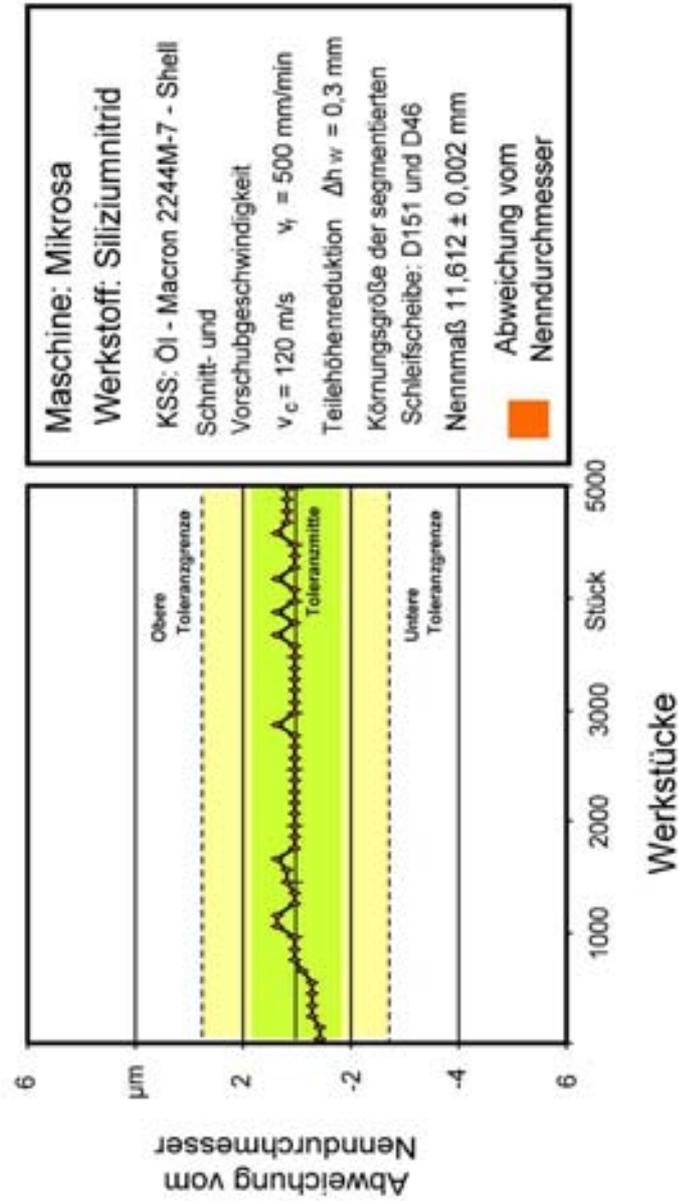
- Schruppbereich (Grobkornzone)
D151 V+ 2046 N1TV C150 E
- Schlichtbereich (Feinkornzone)
D46 V+ 2046 N1TV C150 E
- Abrichtparameter
 - Geschwindigkeitsverhältnis $q_0 = 0,4$
 - Überdeckungsgrad $U_d = 57$
 - Abrichtgeschwindigkeit $v_s = 50 \text{ m/s}$
 - Drehzahl $n_s = 2388 \text{ 1/min}$
 - Zustellung der Formrolle $a_{ef} = 0,002 \text{ mm}$

Centerless Schleifen von Pumpenrollen



3.1 Hartbearbeitung - Folie 17

Centerless Schleifen von Pumpenrollen



Rundscheifen von keramischen Werkstoffen



- Schleifscheibe Saint-Gobain Abrasives D126 C100 1A1
- Umfangsgeschwindigkeit $v_c=60$ bis 125 m/s
- Zeitspannungsvolumen $Q'_w > 8$ mm³/(mm·s)
- G-Verhältnis > 500

Ergebnis:

- Durchmessertoleranzen < 10 µm
- Oberflächenwert $R_a < 0,6$ µm
- Prozessfähigkeit $C_{pk} > 1,67$



Bearbeitung der Ventilplatten

- Neues Maschinenkonzept: Einscheibenlappmaschine mit Messsteuerung
- Lappmittel Borcarbid
- Genauigkeit der Bauteilhöhe: 30 μm in der Großserie

