

### 4.4 Präzisionsbearbeitung von Keramik – eine Herausforderung?

- Dr.-Ing. Carsten Rußner  
CeramTec AG  
Lauf a. d. Pegnitz

*Die Folien finden Sie ab Seite 417.*

#### 4.4.1. Einleitung

Durch die besonderen und vielfältigen Materialeigenschaften von Hochleistungskeramik, wie zum Beispiel hohe Härte, Verschleiß- und Warmfestigkeit, geringes Gewicht und hohe Druckfestigkeit, kann dieser Werkstoff bei extremen Bedingungen eingesetzt werden, bei denen übliche Werkstoffe wie Stahl oder Kunststoff versagen.

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.

#### 4.4.2. Produktive Präzisionsverfahren

##### 4.4.2.1. Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik

Das charakteristische Verfahrensmerkmal der Quer-Seiten-Doppelplanschleifmaschine besteht in dem Vorhandensein der Schnittgeschwindigkeit und einer längs zur Werkstückebene verlaufenden Vorschubgeschwindigkeit  $v_{flängs}$ . Die Vorschubbewegung besteht somit aus zwei von unterschiedlichen Maschinenelementen ausgeführten Komponenten. Bei Auswahl der geeigneten Eingangskenngrößen ist die Überlagerung der Vorschubbewegungen für die guten Arbeitsergebnisse und die homogene Werkzeugbelastung verantwortlich.

Wichtigste Eingangskenngrößen sind beim Quer-Seiten-Doppelplanschleifen mit Planetenkinematik die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und die Schleifnormalkraft in axialer Richtung  $F_n$ . Die Schleifnormalkraft in axialer Richtung  $F_n$  ergab einen minimalen Ebenheitsfehler  $f_E$  bei 3000 N. Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Ebenheitsfehler war gering. In Bezug auf die erzielbaren Oberflächengüten, Form- und Maßgenauigkeiten konnte mit zunehmender Diamantkörnungsgröße ein Ansteigen des Zeitspannungsvolumens, der Formabweichung und somit der Rauheit der geschliffenen Werkstückflächen ermittelt werden. Durch Erhöhung der mittleren Schnittgeschwindigkeit konnten Werkstückhöhenstreuung und Rauheit verbessert werden, während die steigende Schleifnormalkraft in axialer Richtung  $F_n$  sich aufgrund der erhöhten Tiefe des Korneingriffes negativ auswirkte. Ein entscheidender Punkt war die Wahl des geeigneten Kühlschmierstoffes, welcher die Schleifzeit und die benötigte Schleifnormalkraft in axialer Richtung beeinflusste. In Abhängigkeit des eingesetzten Kühlmediums und der Temperatur war eine Zunahme der Zeitspannungsvolumina um den Faktor drei möglich. Alle geforderten Toleranzsysteme innerhalb der Großserienfertigung wurden erreicht.

#### **4.4.2.2. Innovation im Doppelseitenquerplanschleifen**

Aufgrund der inzwischen serienmäßig erhältlichen Automationskonzepte zum Be- und Entladen der Halter mit Werkstücken konnte die Produktivität um 200 Prozent gesteigert werden. Der Trend geht nicht mehr in Richtung Schleifscheiben mit einem Durchmesser größer als 1200 mm, sondern vielmehr zu höheren Schnittgeschwindigkeiten.

#### **4.4.2.3. Schrägeinstechschleifen mit Spitzenlostechnologie**

Verschleißkörper aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  werden auf Kronos S Maschinen von Mikrosa geschliffen. Hierbei wird es möglich die vorherige Bearbeitung zwischen Spitzen deutlich zu reduzieren. Als Schleifwerkzeug wird eine Diamantschleifscheibe  $\text{Ø}400 \times 15 \times 203,2$  mm in D46/V+2046N1SC/ C100 E eingesetzt, die Regelscheibe hat die Spezifikation  $\text{Ø}250 \times 10 \times 127,0$  mm, A120V7RXT – Manhattan und als Abrichtrolle die neuentwickelte Diamantformrolle 1T700-120-1-5 DDS - D1181 der Firma Saint Gobain Winter.

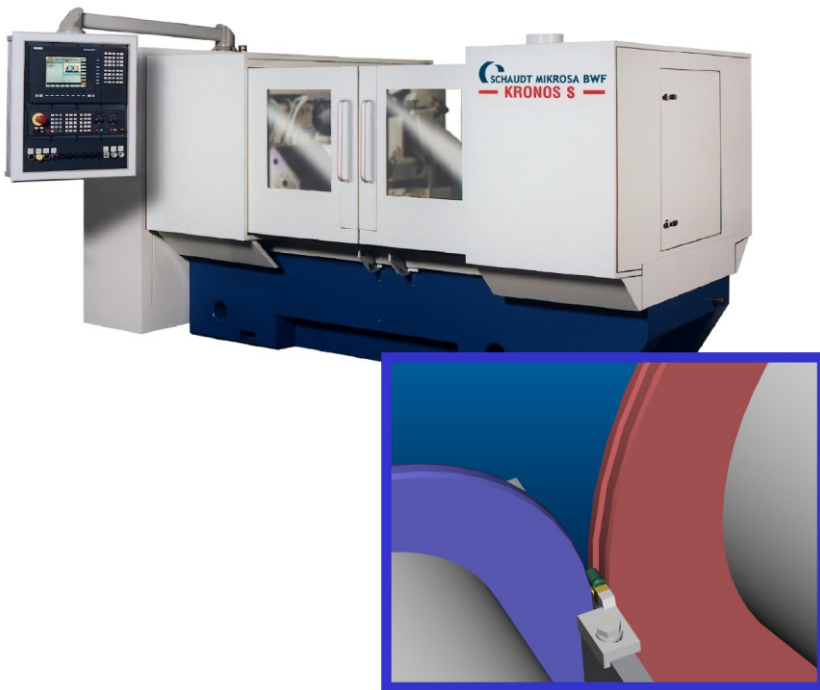
### Vortragsblock 3

---

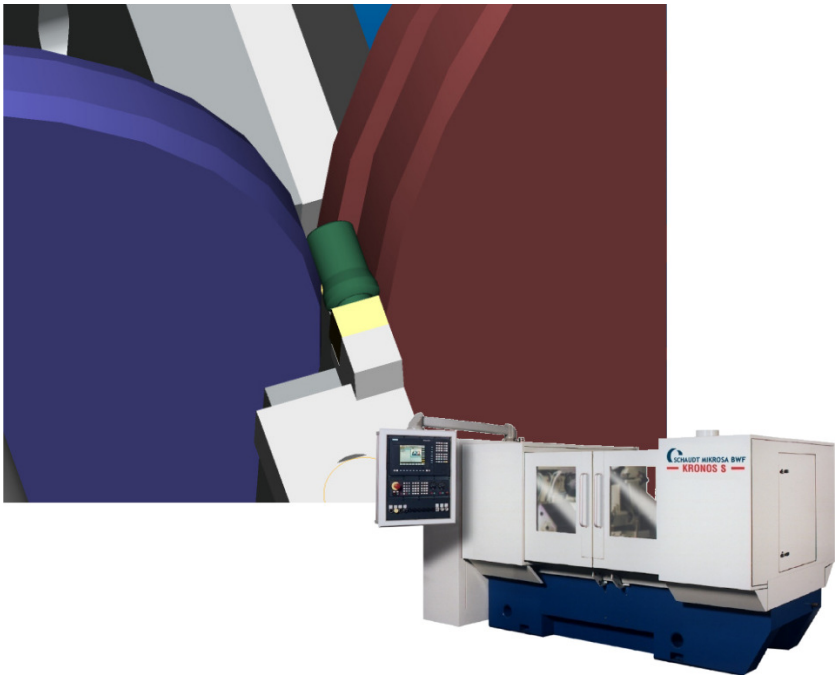
Die Genauigkeit der Werkzeugmaschine ist ausreichend für die zu erzeugenden Toleranzen. Die wirkliche Schwierigkeit ist das genaue Profilieren der Form in die Schleifscheibe, welche eine Einschränkung der erreichbaren Genauigkeit erzeugt. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, den Verschleiß der Abrichtrolle zu vermessen und errechnet das CNC-Programm Korrekturen falsch, was zu einer Ungenauigkeit führt, welche auch nur schwer zu vermeiden ist.

Der Prozessablauf wurde in drei schritten umgesetzt, Mantel vorschleifen, Stirn und Mantel schleifen sowie Mantel fertig schleifen.

Die erreichten Ergebnisse sind für keramische Großserienwerkstücke sehr gut, was unter anderem auch der cmk-Faktor von 3,86 für den Mantel ersichtlich ist. Es konnte somit eine Prozesszeitverkürzung von 50 Prozent erreicht werden.



**Bild 1:** Mirkosa Kronos S



**Bild 2:** Mirkosa Kronos S - Detail

#### **4.4.2.4. Abrichten von keramischen Diamantschleifscheiben**

Das Abrichten ist einer der Haupteinflussfaktoren beim Schleifen. Das Abrichten mit dem daraus resultierenden Oberflächenzustand der Schleifscheibe bestimmt bei der Schleifbearbeitung in großem Maße die Schleifkräfte, die Schleiftemperatur und das Schleifverhältnis  $G$  sowie das Arbeitsergebnis des Werkstücks.

Grundsätzlich wird die Schleifscheibe nach dem Einbau in die Schleifmaschine und nach längerem Einsatz abgerichtet. Dabei kann man innerhalb des Abrichtens von Profilieren oder Schärfen sprechen. Profilieren findet hauptsächlich bei Profilverlust oder nach dem Einbau einer neuen Schleifscheibe statt, um eventuelle Rundlauf- oder Scheibenprofilabweichungen auszuschließen. Während man beim Profilieren vom Verschleiß der Makrostruktur spricht, ist das Schärfen im Bereich der Mikrostruktur anzusiedeln.

Das Abrichten von Diamantschleifscheiben hat in den letzten Jahren durch den Einsatz von keramischen Bindungen einen deutlichen Fortschritt erreicht, wobei es weiterhin als schwierig anzusehen ist, was am Beispiel eines Dachprofils dargestellt ist.

### 4.4.2.5. Centerlesschleifen von Pumpenrollen

Eine bisher neu umgesetzte Anwendung findet sich in den Pumpenrollen. Die notwendigen Toleranzen einer gehonten logarithmischen Pumpenrolle entstehen durch die Spannungsoptimierung der Rolle. Die 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  $125 \text{ mm}$  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.

Die eingesetzte Schleifscheibe stammt aus der Fertigung der Fa. Saint Gobain Abrasives - Winter. Im oben genannten Fall wurde eine segmentierte Scheibe verwendet. Der Aufbau ist in zwei Bereiche aufgeteilt.

- Schruppbereich ( 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 aktiver Breite von  $1,2 \text{ mm}$  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  $n_s = 2.388$  min<sup>-1</sup>, sowie einer Zustellung der Formrolle von  $a_{ef} = 0,002$  mm. Diese Werte wurden innerhalb von mehreren Projekten als die besten Einstellungen ermittelt.

#### 4.4.2.6. Rundschleifen von keramischen Werkstoffen

Keramische Isolierstücke für die CFC-Hochleistungsbremse aus Zirkonoxid werden heute in einem HSG-Schleifprozess auf Studer S32 Maschinen bearbeitet. Es wird mit einer Schnittgeschwindigkeit von 125 m/s geschliffen. Zum Einsatz kommen hier auch keramisch gebundene Schleifscheiben mit einer Korngröße von D46 bis D126. Das Zeitspannungsvolumen liegt bei  $Q'_w$  größer 8 mm<sup>3</sup>/(mms) und das G-Verhältnis bei größer 1.000. Die erreichten Toleranzen in der keramischen Großserie liegen am Durchmesser bei kleiner 6 µm.



**Bild 3:** Studer S32

### 4.4.2.7. Hartbearbeitungskosten und Genauigkeiten

Generell gilt nicht „je genauer desto teurer“, es kommt vielmehr auf die keramikgerechte Konstruktion an und welche Möglichkeiten diese Konstruktion für die Hartbearbeitung lässt. So ist ein spitzenloses Einstechschleifen der Bearbeitung zwischen Spitzen vorzuziehen, da die aufwendige Spannung nicht erfolgt. Allerdings sind hierbei gewisse Toleranzen nicht erreichbar, speziell wenn es um Koaxialität geht.

Die erreichbaren Toleranzen bei der Schleifbearbeitung von Innen- und Außendurchmessern liegen bei +/- 3  $\mu\text{m}$ . Die Höhentoleranzen liegen bei +/- 5  $\mu\text{m}$ .

Bearbeitungszyklen für Außen- und Innendurchmesser sind von 2 s bis 30 s und für die Höhe von 3 s bis 30 s je nach eingesetzter Bearbeitungsmaschine.

### 4.4.3. Ausblick und Trends

Schnelle Automatisierungskonzepte, sowie höhere Schnittgeschwindigkeiten und Schleifnormalkräfte werden die Produktivität um Faktor 10 erhöhen. Für die Herstellung von Werkstücken mit  $\mu\text{m}$ -Toleranzen spielen neue Abrichtstrategien eine entscheidende Rolle.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 26) finden sich auf den folgenden Seiten.

# Präzisionsbearbeitung von Keramik – eine Herausforderung?

Dr.-Ing. Carsten Rußner  
CeramTec AG  
Lauf a. d. Pegnitz



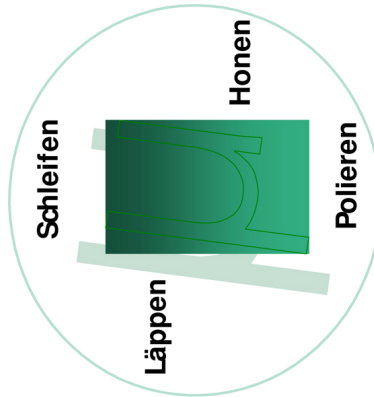
## Wegweiser

- Bedeutung der Keramik
- Keramischer Herstellungsprozess
- Zerspanmodelle
- produktive Präzisionsverfahren
  - Flachscheifen
  - Einstechschleifen
  - Spitzenlosschleifen

## Ziele:

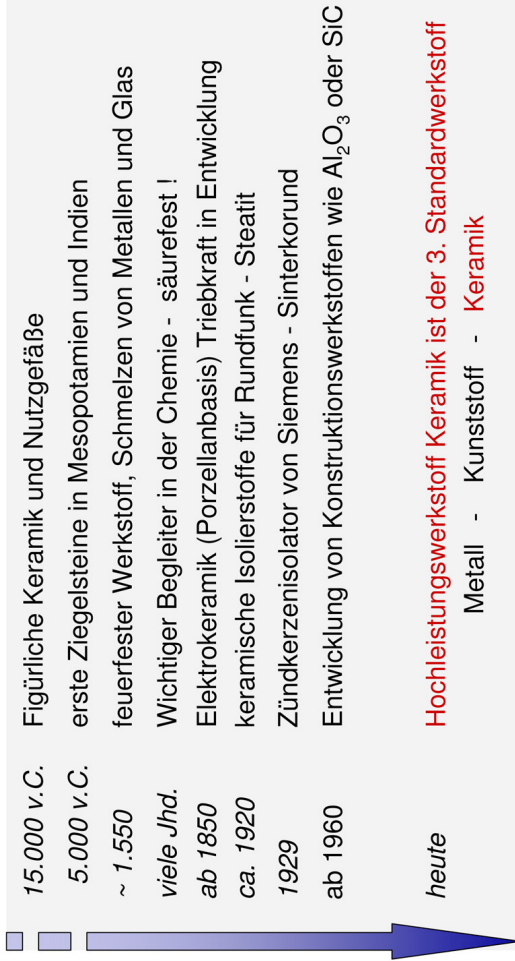
**Herstellung von Keramik  
Hartbearbeitungsverfahren sprödharter Werkstoffe  
Anwendungsbeispiele**





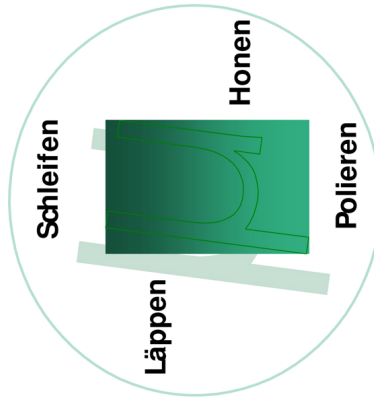
## Bedeutung der Keramik

## Geschichte: Keramik = keramos (griech.) = Ton



A vertical timeline diagram with a blue arrow pointing upwards. The arrow starts at the bottom and has several small blue squares along its shaft. The text is arranged in two columns: the left column contains dates and the right column contains descriptions of ceramic milestones.

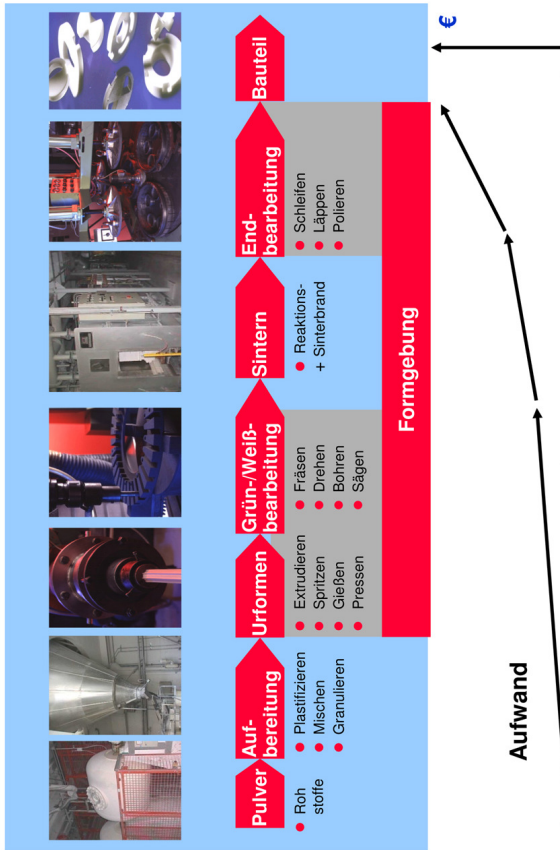
15.000 v.C.	Figürliche Keramik und Nutzgefäße
5.000 v.C.	erste Ziegelsteine in Mesopotamien und Indien
~ 1.550	feuerfester Werkstoff, Schmelzen von Metallen und Glas
viele Jhd.	Wichtiger Begleiter in der Chemie - säurefest !
ab 1850	Elektrokeramik (Porzellanbasis) Triebkraft in Entwicklung
ca. 1920	keramische Isolierstoffe für Rundfunk - Steatit
1929	Zündkerzenisolator von Siemens - Sinterkorund
ab 1960	Entwicklung von Konstruktionswerkstoffen wie $Al_2O_3$ oder SiC
heute	<b>Hochleistungswerkstoff Keramik ist der 3. Standardwerkstoff</b> Metall - Kunststoff - Keramik



**Keramischer Herstellprozess  
Zerspanmodelle**

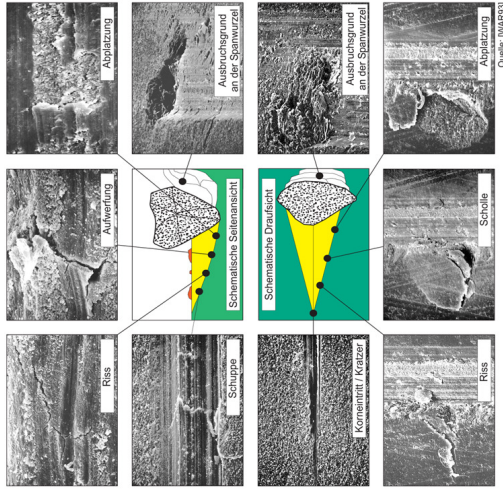
## Keramischer Herstellungsprozess

- vom Pulver bis zum Bauteil -



## Werkstofftrennmechanismen

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



## Modelle der Werkstofftrennmechanismen

### Modell I: Prof. Saijé

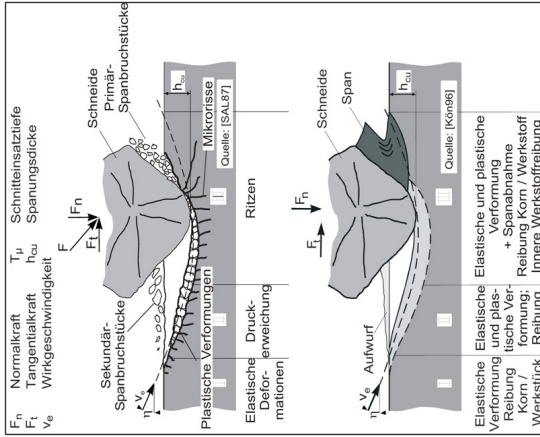
- Mikrorisse und Ausbrüche
- treibender Trennmechanismus bei zunehmender Eingriffstiefe
- I. + II. elastische / plastische Verformung
- III. Ritzen

### Modell II: Prof. König

- duktiles Werkstoffverhalten
- I. Elastische Verformung
- II. Plastisches Fließen
- III. Einzelspannungsdicke = Grenzspannungsdicke



Spannbildung



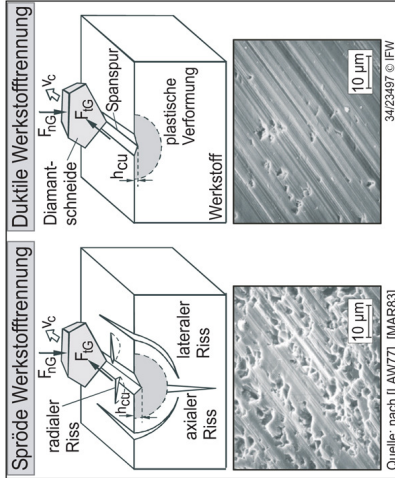
## Auswirkung der Trennmechanismen

- I: spröde Werkstofftrennung

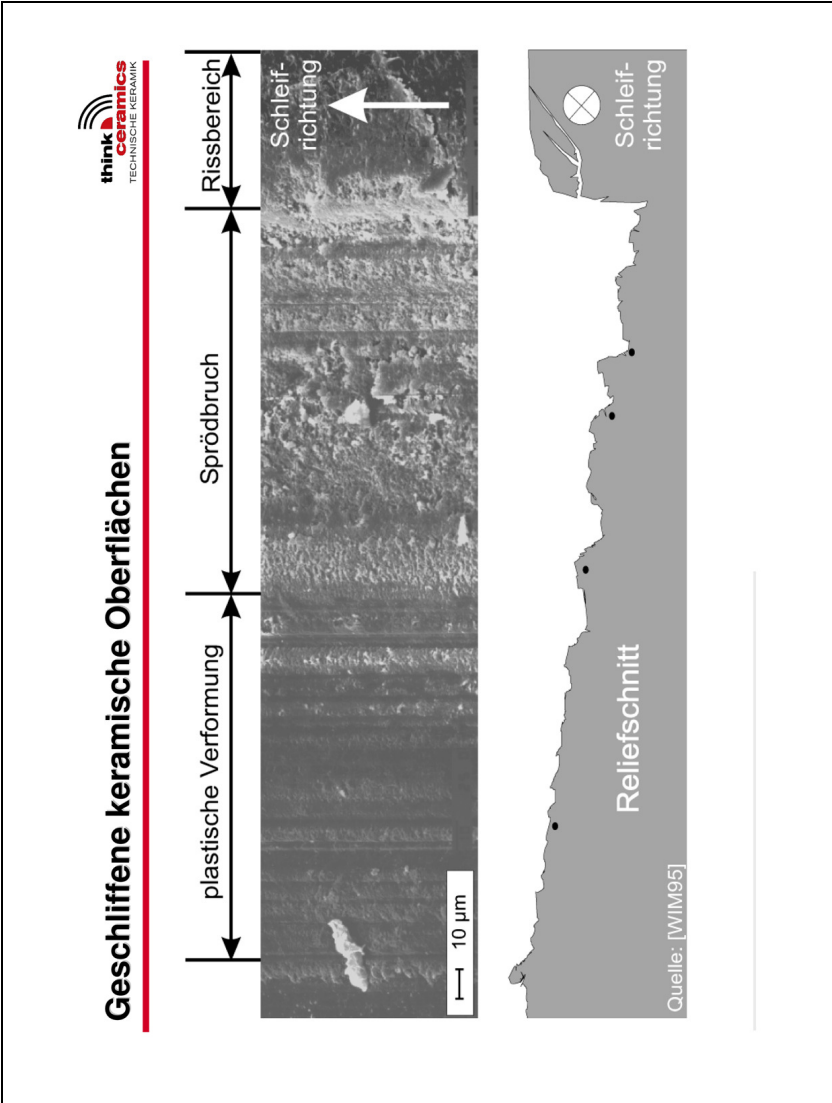
- II: duktile Werkstofftrennung

- Entstehung abhängig von:

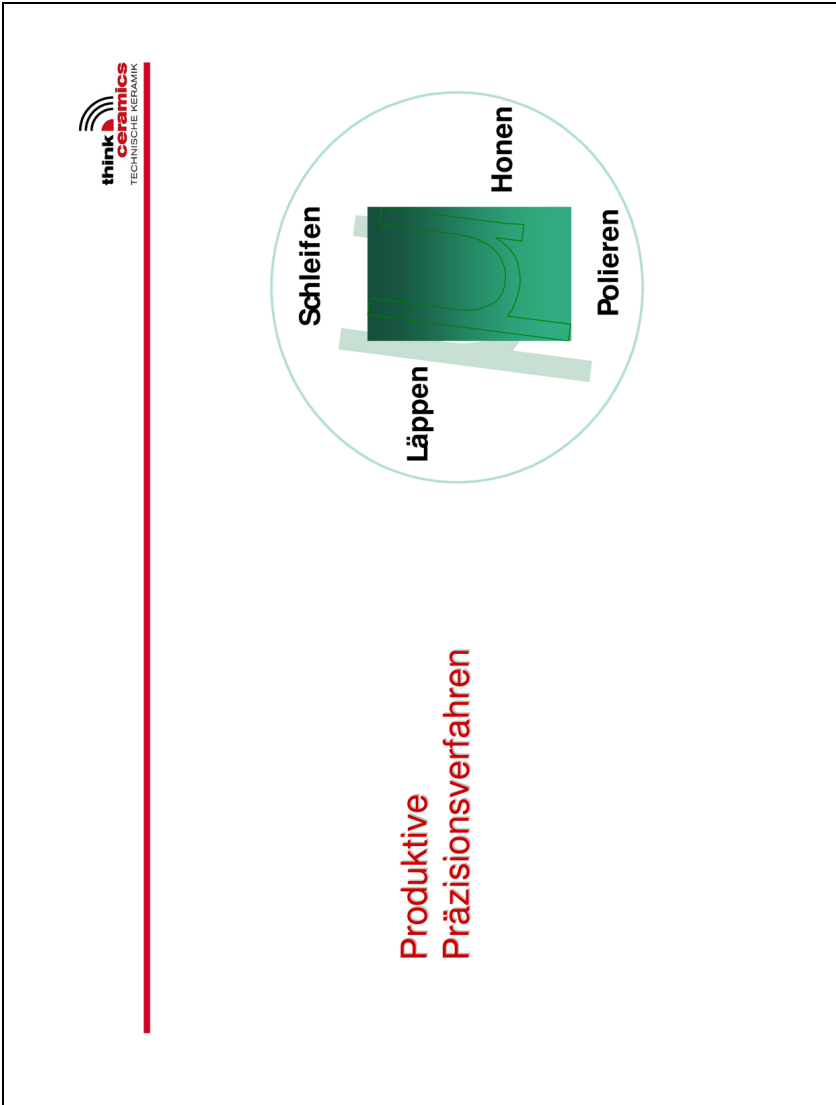
↑  
**verwendeten Prozess-  
und Systemgrößen**







4.4 Präzisionsbearbeitung von Keramik - Folie 10



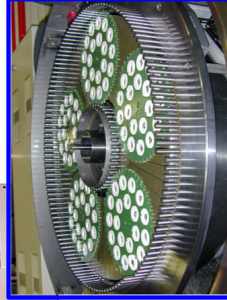
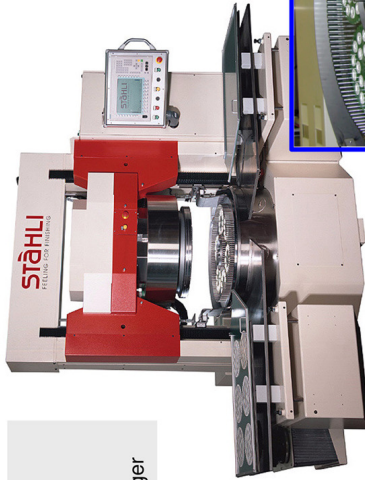
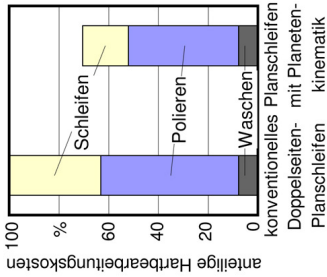
#### 4.4 Präzisionsbearbeitung von Keramik - Folie 11

**Doppelseitenquerschleifen mit Planetenkinematik**



**Schleifparameter + Ergebnis**

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

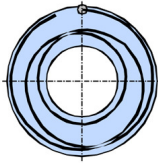


**Doppelseitenquerschleifen mit Planetenkinematik von Dichtscheiben aus Aluminiumoxid**

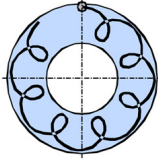
## Innovation im Doppelseitenquerplanschleifen

### Ergebnis

- Steifigkeit der Maschine
- Schleifscheibentechnologie
- Überlagerung unterschiedlicher Kinematik
- Kühlmittelmittelzusammensetzung

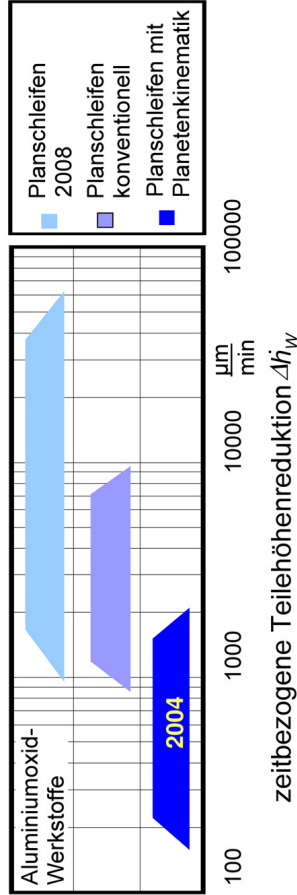


gestreckte  
Epizykloiden



verschlungene  
Epizykloiden

Quelle: ARD01



zeitbezogene Teilehöhenreduktion  $\Delta h_w$

### Schrägeinstechschleifen mit Spitzenlostechnologie



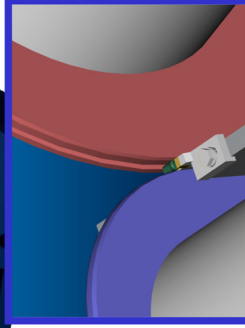
#### Grunddaten

- hochpräzise
- spannungsfreie Aufnahme der Werkstücke
- mehrere Werkstücke je Zyklus möglich
- einfache Automation

#### Schleifwerkzeuge

- Einsatz keramisch gebundener Diamantschleifscheiben
- hohe Formtreue der Schleifscheibe mit spezieller Abrichttechnologie

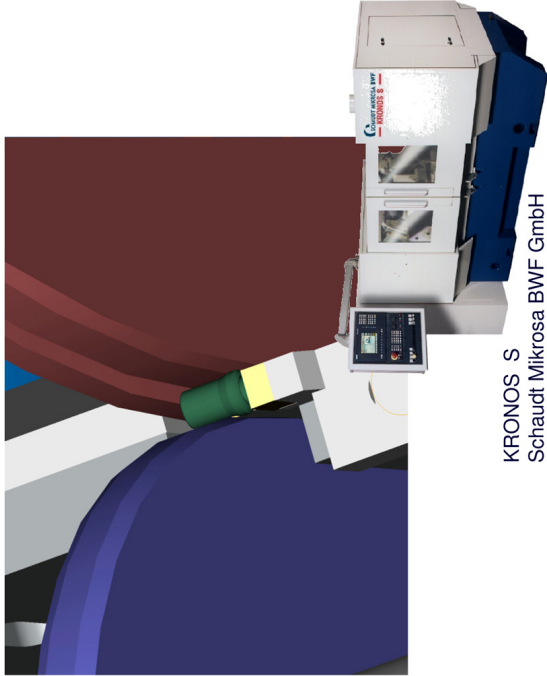
- Großserientechnik



## Schrägeinstechschleifen auf Mikrosa Kronos S



<b>Grunddaten</b>	Kronos S
Maschine	Si3N4
Werkstoff	V+ 2046
Schleifscheibe	Ø 400 x 15 mm, D46 C100
WINTER DDS-Formrolle	Ø 120 mm, $b_d = 1$ mm
<b>Schleifparameter</b>	
Aufmaß	0.7 mm
Schnittgeschw.	$v_c = 120$ m/s
<b>Abrichtparameter</b>	
Schnittgeschw.	$v_{cd} = 40$ m/s
Geschw.-Verf.	$q_{fl} = 0.4$
Zustellung	$a_{ed} = 3$ µm
<b>Ergebnis</b>	
Rauheit	$R_z = 2,02$ µm
Durchmessertoleranz	$\pm 2$ µm
nach 400 Teilen	kein messbarer Verschleiß



KRONOS S  
Schaut Mikrosa BWF GmbH

## 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

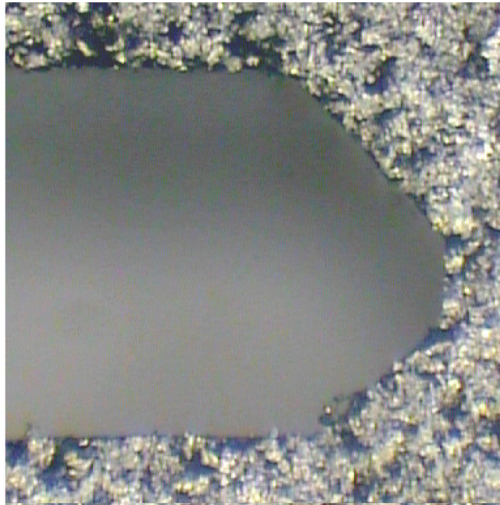


### Abrichtparameter:

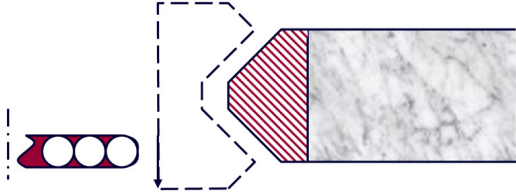
Umfangsgeschwindigkeit 20 m/s,  
Geschwindigkeitsverhältnis  $q_f=0,3$

Variation des Zeilenvorschubs senkt die kinematische Rauheit

## Formrollenverschleiß: Dachprofil



100 Hübe

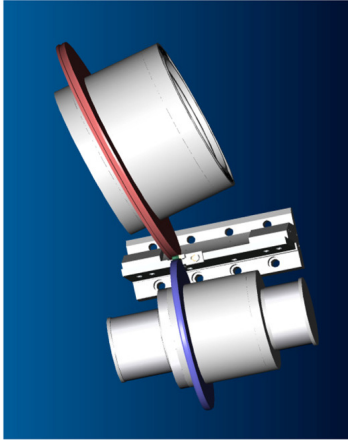
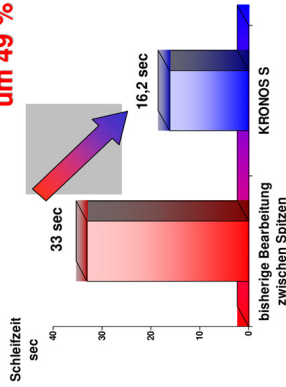




# Ergebnisse Schleifen von Siliziumnitrid

## Schleifzeitvergleich

Reduzierung  
der Schleifzeit  
um 49 %



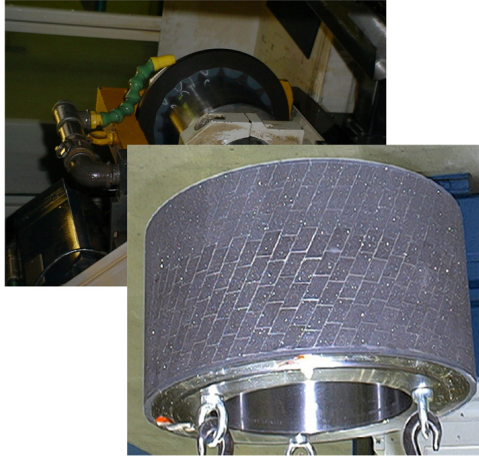
## Centerless Schleifen von Pumpenrollen

### Schleifscheibe

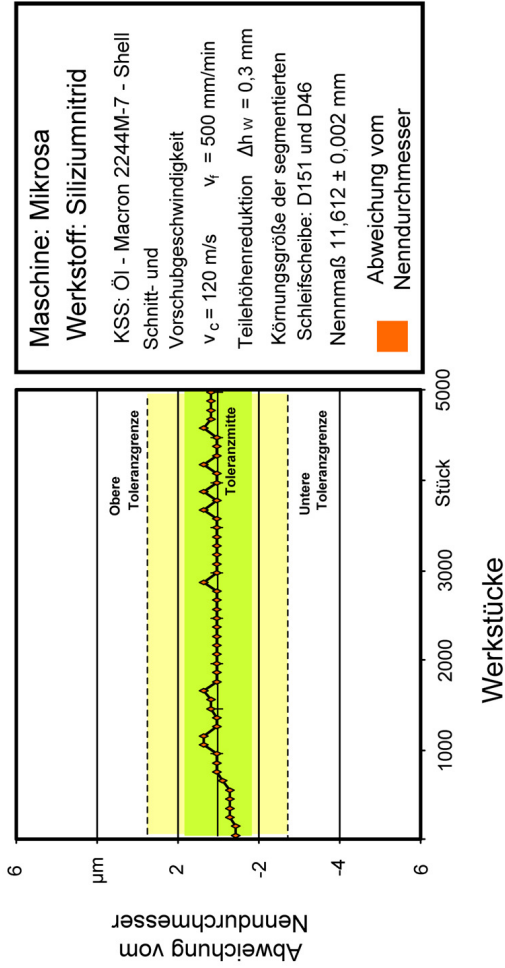
- Schrubbereich ( Grobkornzone )
- D151 V+ 2046 N1TV C150 E
  - Schlichtbereich ( Feinkornzone )
  - D46 V+ 2046 N1TV C150 E

### Abrichtparameter

- Geschwindigkeitsverhältnis  $q_d = 0,4$
- Überdeckungsgrad  $U_d = 57$
- Abrichtgeschwindigkeit  $v_{sd} = 50$  m/s
- Drehzahl  $n_{sd} = 2388$  1/min
- Zustellung der Formrolle  $a_{ef} = 0,002$  mm



## Centerless Schleifen von Pumpenrollen



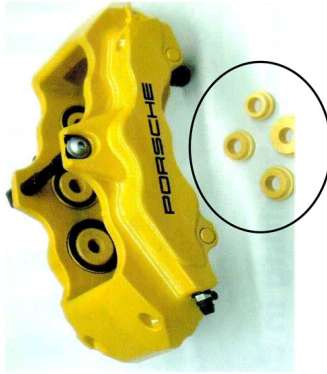
## Keramische Isolierstücke für die CFC-Hochleistungsbremse

### Werkstoff

- Zirkonoxid

### Vorteile

- Temperaturbeständigkeit
- Hohe Wärmeableitung



### Rundschleifen von keramischen Werkstoffen



#### Schleifscheibe

- Saint-Gobain Abrasives D126 C100 1A1

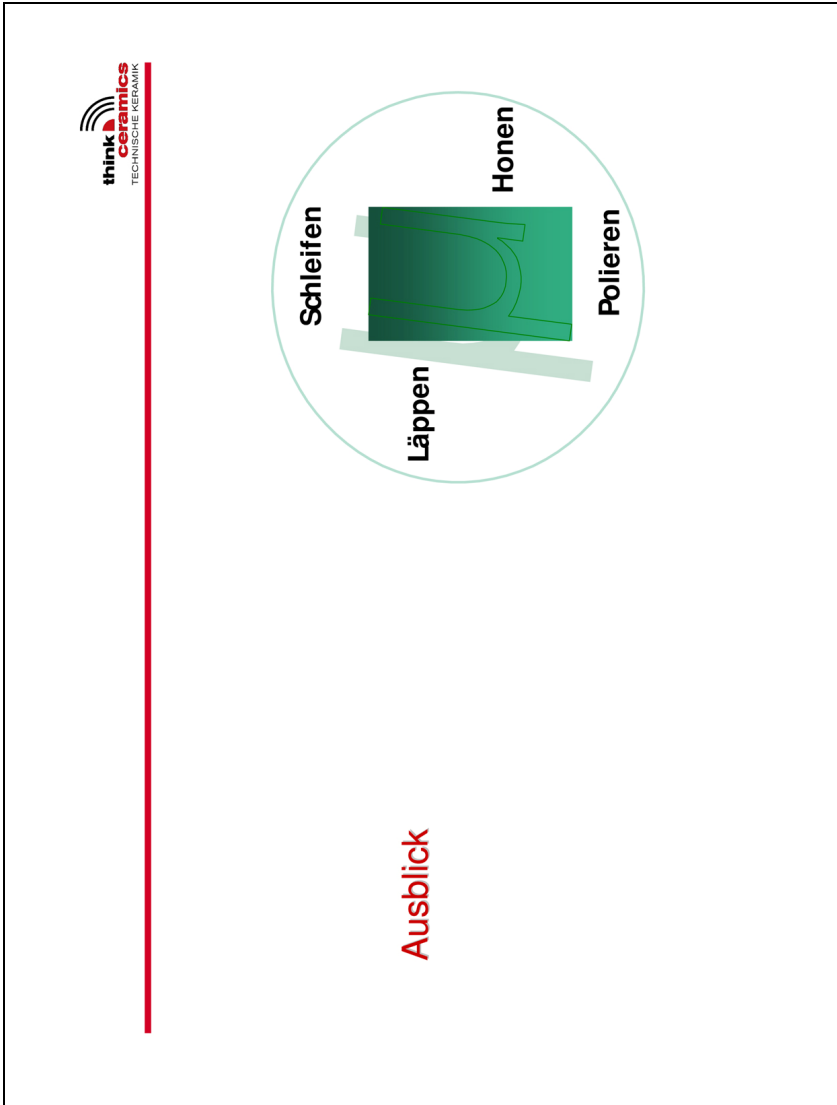
#### Schleifparameter

- Umfangsgeschwindigkeit  $v_c = 125 \text{ m/s}$
- Zeitspannungsvolumen  $Q_w > 8 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$
- G-Verhältnis  $> 1000$

#### Ergebnis

- Durchmessertoleranzen  $< 6 \mu\text{m}$
- Oberflächenwert  $R_a < 0,6 \mu\text{m}$
- Prozessfähigkeit  $c_{pk} > 1,67$





4.4 Präzisionsbearbeitung von Keramik - Folie 23

## Hartbearbeitungskosten und Genauigkeiten

je genauer desto teurer?

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

haltbare Toleranzen in der Großserie

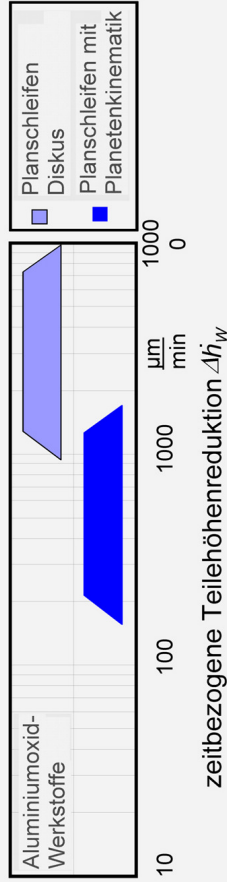
- Außen- und Innendurchmesser +/- 3µm
- Höhe +/- 5 µm

Prozesszeiten pro Stück

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

## Ausblick und Trends

- Schnelle Automatisierungskonzepte, sowie höhere Schnittgeschwindigkeiten und Schleifnormalkräfte werden die Produktivität um Faktor 10 erhöhen



- Neue Abrichtstrategien werden die Herstellung von Werkstücken mit  $\mu\text{m}$ -Toleranzen ermöglichen



## Einsatzbereiche von Keramik im Automobil



### Strukturkeramik

- Gleitringe für
  - Kühlwasserpumpe
  - CO<sub>2</sub>-Kompressoren
  - Benzindirekteinspritzung
- Portliner
- Common-Rail-Hochdruckpumpe (Ventilplatte)
- Katalysator-Ring
- Zylinderlaufbüchse in MMC-Technologie

- Lagerbuchse (für Abgasklappe)
- Brems Scheiben und Bremskolben
- Dieseldirekteinspritzung (Ventilplatte)
- Shims (im Ventiltrieb)

### Silikatkeramik

- Wabenkörper für Katalysatoren
- Sockel für Halogenlampen
- Isolierröhrchen für Xenonlicht



### Substrate

- Heizer für Lambda-Sonde (metallisierte Substrate)
- Substrate für Hybridschaltungen bei
- Motorsteuerung
  - Einspritzsteuerung
  - ABS-Steuerung
  - Airbag-Steuerung

### Aluminiumoxidkeramik

- Stäbe für Widerstände (in Hybridschaltungen)
- Zündkerze
- Seitenplatten (Benzinpumpe)
- Gehäuse (Öldruck-Sensor)
- Zündbrückenträger (in Airbag-Gasgeneratoren)
- Gleitring (Kühlwasserpumpe)
- Prall-Plättchen für Einspritzpumpe (Gemischmengenregler)
- Heizer  $\lambda$ -Sonde
- Isolierung für Hochleistungsbatterien

### Piezokeramik

- Klopfsensor
- Rückfahrnsensor
- Crash-Sensor (zur Auslösung Airbag)
- Aktuatoren