

Produktionstechnisches Zentrum Berlin (PTZ)  
**Wir optimieren die Produktion.**

**Effiziente Bearbeitung von  
Funktionsbauteilen aus  
Leichtbauwerkstoffen –  
Vollkeramiken und CMC**

Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann  
(Institutsleiter IWF & IPK)

**Dr.-Ing. Tiago Borsoi Klein (IPK)**

Hannover, 5. April 2019

Produktionstechnisches Zentrum (PTZ)  
Fraunhofer IPK und IWF



# Überblick

- Forschungsschwerpunkte am PTZ
- Einordnung Hochleistungskeramiken
- Anwendungsbeispiele und Forschungsergebnisse
  - Monolithische Keramiken – Prozessoptimierung
  - Ceramic Matrix Composites (CMC) – Bearbeitungsstrategien
- Zusammenfassung

# Bearbeitung von Hochleistungskeramik

## Forschungsschwerpunkte am PTZ

### Werkzeuge

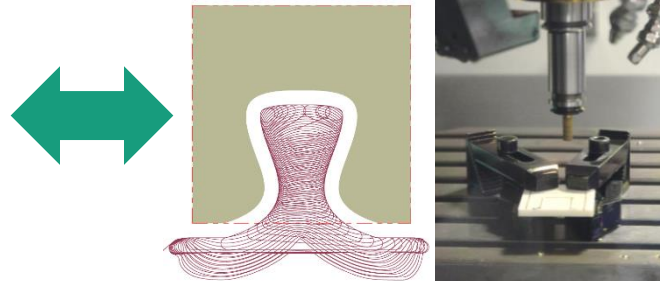
- Schleifscheiben
- Schleifstifte
- Genutete Werkzeuge
- AM gefertigte Werkzeuge



Werkzeuge zur Keramikbearbeitung

### Prozesse

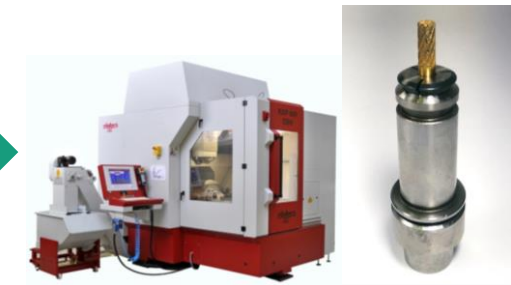
- Freiform- und Koordinatenschleifen
- Planschleifen mit Planetenkinematik
- Schnellhubschleifen
- Läppen



2 ½ D-Konturbearbeitung mit programmiertem Werkzeugweg

### Maschinen und -peripherie

- HSC-Schleifmaschinen
- Spannsysteme
- KSS-Systeme
- CAD/CAM



5-Achs-Koordinatenschleifmaschine und Aufspannsystem

Integrierte Herstellung keramischer Komponenten

# Hochleistungskeramik

## Monolithische Keramik

## Verbundkeramik

### ■ Aluminiumoxid



@ Quelle: Fraunhofer IPK

2 ½ D Kontur in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  → Medizin

### ■ Siliziumnitrid



@ Quelle: Fraunhofer IPK

Impeller aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  → Energie

### Teilchenverstärkt

#### ■ D/SiC



@ Quelle: Fraunhofer IKTS

Dichtungsringe aus Diamantkeramik (D/SiC) → SubSea

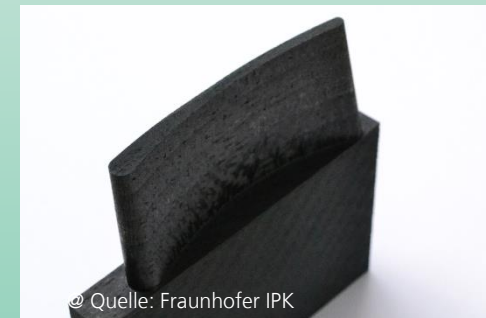
### Faserverstärkt

#### ■ C/SiC, O-CMC, SiC/SiC



@ Quelle: SGL-Brakes GmbH

Bremsscheibe aus C/SiC → Automobil



@ Quelle: Fraunhofer IPK

Schaufel aus C/SiC → Aerospace

# Monolithische Keramik

## Vorteile

- Hohe Festigkeit
- Geringe Wärmedehnung
- Hohe Thermoschockbeständigkeit
- Hochtemperaturbeständigkeit (bis ca. 1400 °C)
- Hohe Korrosionsbeständigkeit, geringer Verschleiß
- Niedrige Dichte, daher niedriges Gewicht/Massenträgheit

## Anwendung

- Energie, Medizin, Automobil, Aerospace, Werkzeugmaschinen und Anlagenbau

## Herausforderungen für die Bearbeitung

- Eingeschränkte Aufspannungsmöglichkeiten → Innovative Aufspannsysteme
- Filigrane Struktur und komplexe Geometrie → Angepasstes Bauteil Design, CAD/CAM Systeme
- Hohe Härte und sprödes Materialverhalten → Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide
- Maßungenaugkeiten / Formabweichung durch den Sinterprozess → Optimierung der Bearbeitung



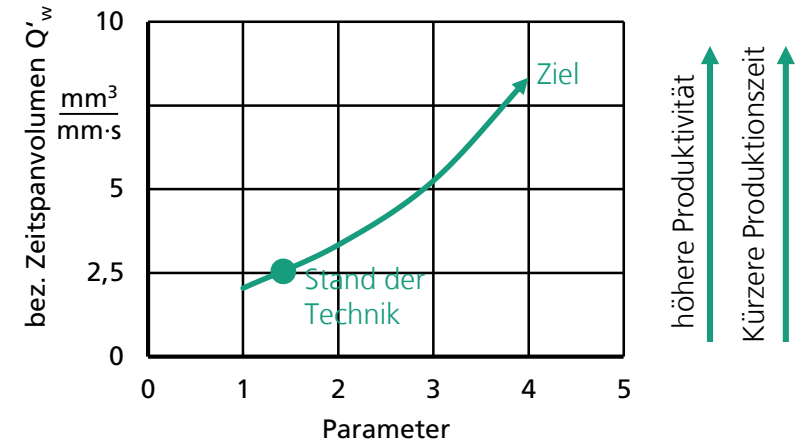
© Quelle: Fraunhofer IPK

Impeller während der Bearbeitung mittels Koordinatenschleifen

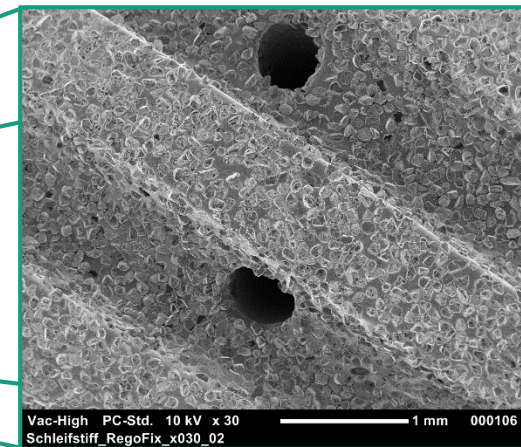
# Bearbeitung monolithischer Keramik

## Zielsetzung – Koordinatenschleifen

- Kenntnis der Wirkmechanismen bzw. mögliche Leistungssteigerung durch den Einsatz galvanischer Diamant-Schleifstifte mit genutetem Grundkörper und Bohrungen für Innenkühlung
- Erhöhung des bez. Zeitspanvolumens  $Q'_w$  durch Steigerung des Arbeitseingriffes  $a_e$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$
- Optimierte Technologie für eine effiziente Bearbeitung von Bauteilen aus Hochleistungskeramik mit komplexer Geometrie



Genuteter Diamant-Schleifstift,  
Durchmesser = 1/4 ", Korngröße = 126  $\mu\text{m}$



REM-Aufnahme des Schleifstiftes

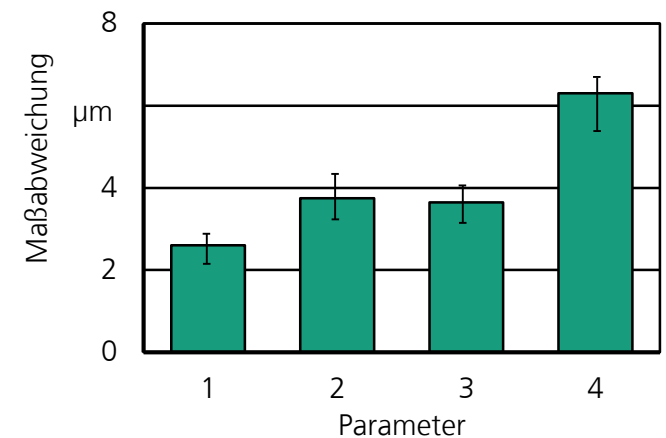
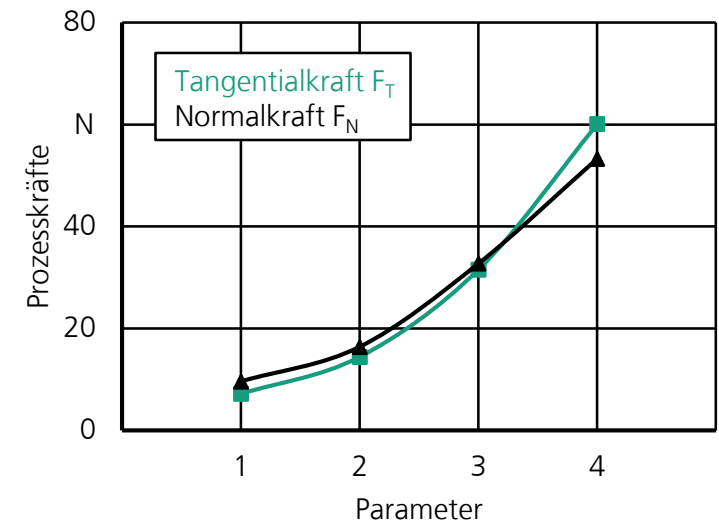
# Bearbeitung monolithischer Keramik

## Ergebnisse – Koordinatenschleifen

- Material:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Reinheit 99,5%, Kristallitgröße 5  $\mu\text{m}$ )
- Werkzeug: Genuteter Diamant-Schleifstift
- Werkzeugmaschine: Röders RXP 600 DSH
- CAD/CAM Programmierung (Mastercam)
- Werkzeugspannsystem mit hoher Rundlaufgenauigkeit (< 3  $\mu\text{m}$ ) und hohem Dämpfungsgrad notwendig
- bez. Zeitspanvolumen bis zu  $Q'_w = 8 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  realisierbar bei geringem Werkzeugverschleiß

|             | $v_{ft}$<br>[mm/min] | $a_e$<br>[mm] | $Q'_w$<br>[mm <sup>3</sup> /mm·s] |
|-------------|----------------------|---------------|-----------------------------------|
| Parameter 1 | 350                  | 0,35          | 2,04                              |
| Parameter 2 | 400                  | 0,50          | 3,33                              |
| Parameter 3 | 450                  | 0,70          | 5,25                              |
| Parameter 4 | 500                  | 1,00          | 8,33                              |

$n = 55000 \text{ 1/min}$ ; KSS = Schleiföl



# Bearbeitung monolithischer Keramik

## Ergebnisse – Video der Bearbeitung



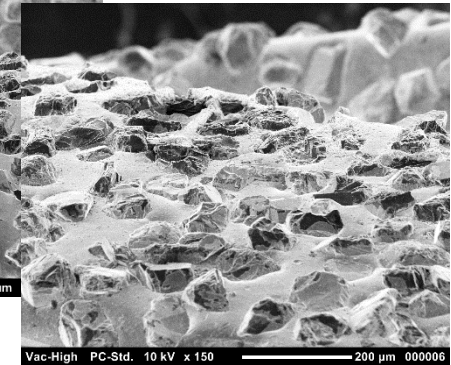
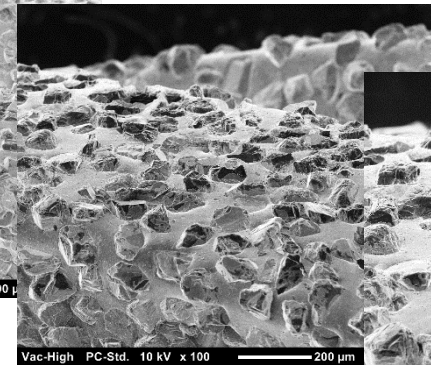
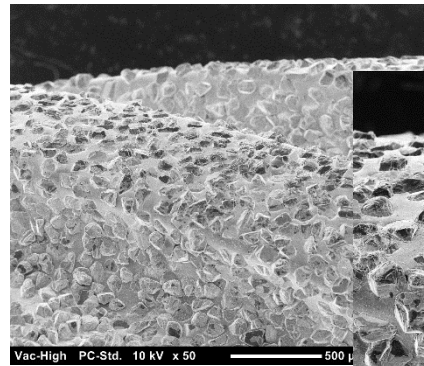
# Bearbeitung monolithischer Keramik

## Ergebnisse – Koordinatenschleifen

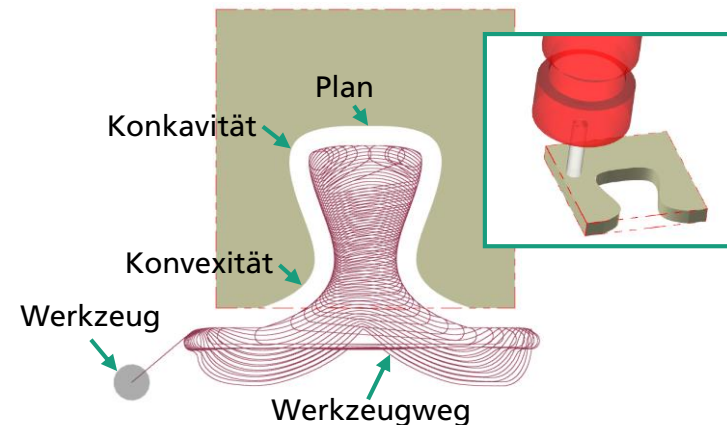
- 2 ½ D-Kontur in  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- Spanvolumen  $V$  pro Bauteil  
 $V = 2300 \text{ mm}^3$  in 3:40 min
- Maßabweichung  $< 5 \mu\text{m}$



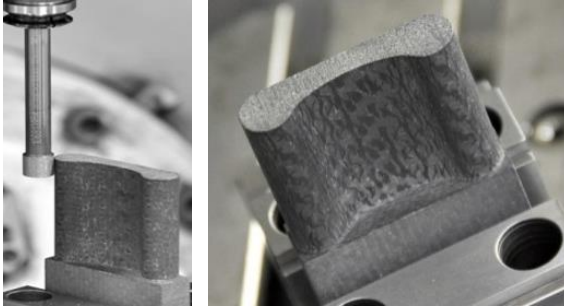
2 ½ D-Kontur:  
Parameter 1 (links) und Parameter 3 (rechts)



REM-Aufnahmen des Werkzeugs nach der  
Bearbeitung



# Ceramic Matrix Composites (CMC)



@ Quelle: Fraunhofer IPK, Borsoi Klein 2015

## Strategien für die CMC-Bearbeitung

### Vorteile

- Faserverstärkte Keramik, dadurch quasiduktiles Bruchverhalten (durch Effekte wie z.B. Debonding und Faser-Pullout)
- höhere Einsatztemperaturen als Nickelbasis- und Titanlegierungen

### Anwendung

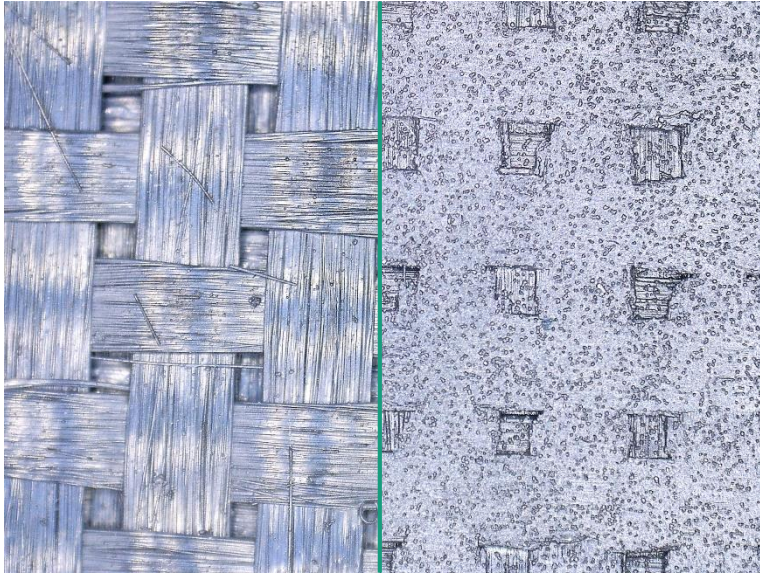
- Einsatz kohlefaserverstärkter CMCs (z.B. C/SiC) in der Raumfahrttechnik (Hitzeschild) und für Bremssysteme (Bremsscheiben)
- Großes Potential SiC-faserverstärkter CMCs als Leichtbauwerkstoff für die Anwendung in Flugzeugtriebwerken und Turbomaschinen (statische Leitschaufeln, Shrouds)



@ Quelle: GE Aviation and the CMC Revolution

## SiC/SiC-Shrouds

# Bearbeitung von Ceramic Matrix Composites – SiC/SiC



Mikroskopie der CMC-Werkstückoberfläche

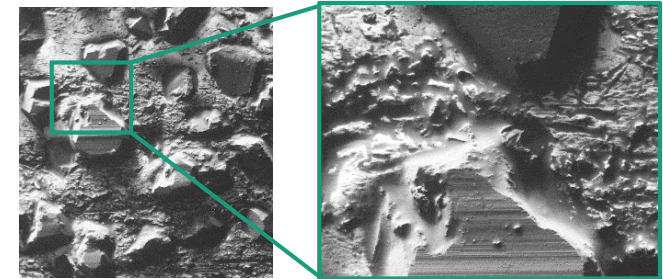


## Zielsetzung

- Bereitstellung von Bearbeitungsstrategien zur wirtschaftlichen Endbearbeitung von Komponenten aus SiC/SiC
- Optimierung der Bearbeitungsparameter zur Maximierung der bez. Zeitspannvolumina reduziertem Werkzeugverschleiß
- Gewährleistung der Werkstückqualität hinsichtlich der Form- und Maßgenauigkeit (Abweichung < 15 µm)
- Reduzierung des Einsatzes mineralöhlhaltiger Kühlschmierstoffe

## Herausforderungen bei der Bearbeitung

- Hochabrasiver Werkstoff → Werkzeugverschleiß, Maschinenbelastung durch abrasive Späne
- Herstellungsbedingte Werkstoffinhomogenitäten

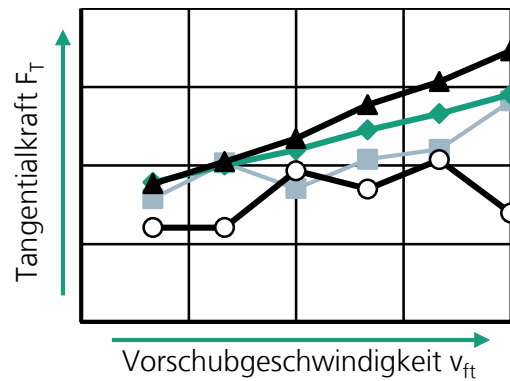
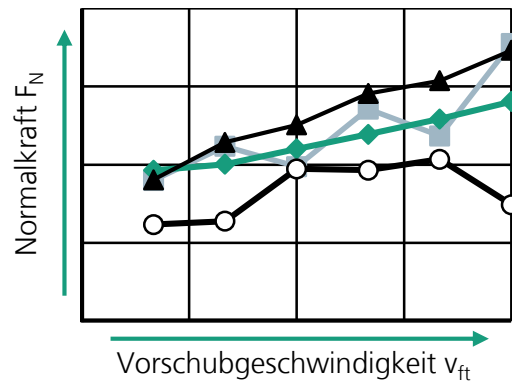


REM-Aufnahme eines Diamant-Schleifstiftes nach der Bearbeitung von SiC/SiC

# Bearbeitung von Ceramic Matrix Composites – SiC/SiC

## Ergebnisse – Werkstoffanalyse

- Koordinatenschleifen mit galvanisch gebundenen Diamant-Schleifstiften
- Abhängig vom Herstellungsverfahren und der Faserart und –anordnung erfolgt eine unterschiedlich starke Infiltrierung mit Matrixwerkstoff (resultierend in der Porosität bis 20%)
- Die Stabilität des Bearbeitungsprozesses sowie die erreichbare Werkstückqualität werden durch die Homogenität des Ausgangswerkstoffes sehr stark beeinflusst



### Prozess:

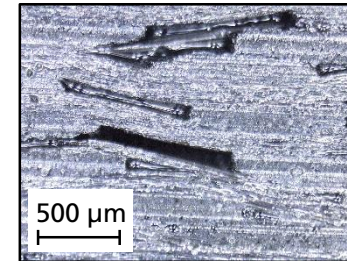
Umfangsplanschleifen mit Schleifstiften

### Werkstoff:

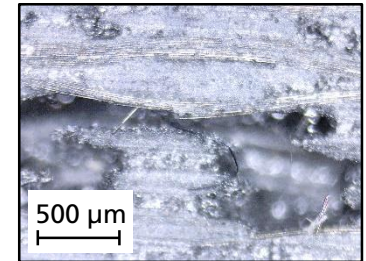
Ceramic Matrix Composite  
SiC/SiC

- ▲ Werkstoff 1
- Werkstoff 2
- Werkstoff 3
- ◆ Werkstoff 4

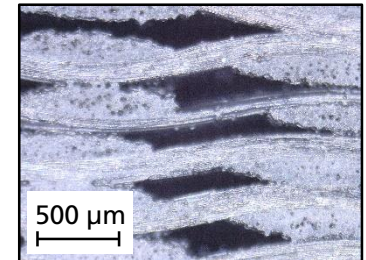
Werkstoff 1



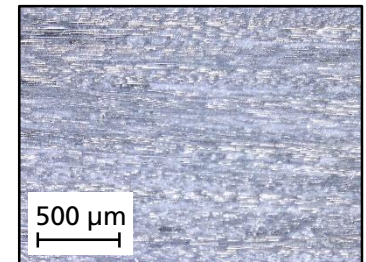
Werkstoff 2



Werkstoff 3



Werkstoff 4

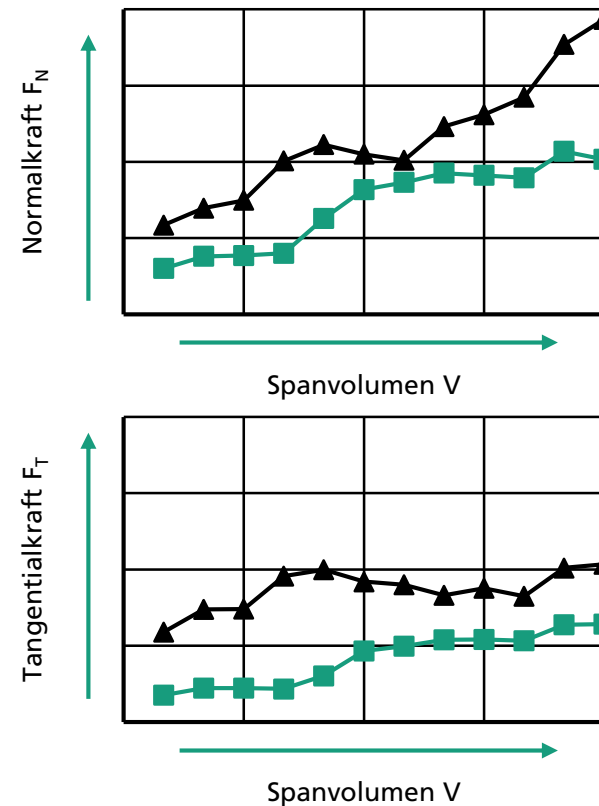


Mikroskopie der  
Bearbeitungs-  
fläche verschiedener  
SiC/SiC-Werkstoffe

# Bearbeitung von Ceramic Matrix Composites – SiC/SiC

## Ergebnisse – Bearbeitungsstrategien

- Bearbeitung mit PKD-Fräsern und galvanisch gebundenen Diamantschleifstiften
- Die realisierbaren bez. Zeitspanvolumina sind bei beiden Strategien vergleichbar (bis  $20 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ )
- Fräsbearbeitung:
  - hoher Verschleiß ( $V < 7000 \text{ mm}^3$ )
  - gute Maßgenauigkeit ( $< 20 \mu\text{m}$ ) infolge der Werkzeuggrundkörper aus HM
- Schleifbearbeitung:
  - Geringerer Verschleiß
  - Niedrigere Maßgenauigkeit (kein HM-Werkzeuggrundkörper)
- Schleifbearbeitung hat großes Potential für eine wirtschaftliche Bearbeitung von SiC/SiC



### Prozess:

- ▲ Umfangsplanfräsen mit Schaftfräsern
- Umfangsplanschleifen mit Schleifstiften

### Werkstoff:

Ceramic Matrix Composite SiC/SiC

### Werkzeug:

PKD-Schaftfräser  
Diamant-Schleifstift

### Kühlschmierstoff:

Rotex Spezial V 1734-2

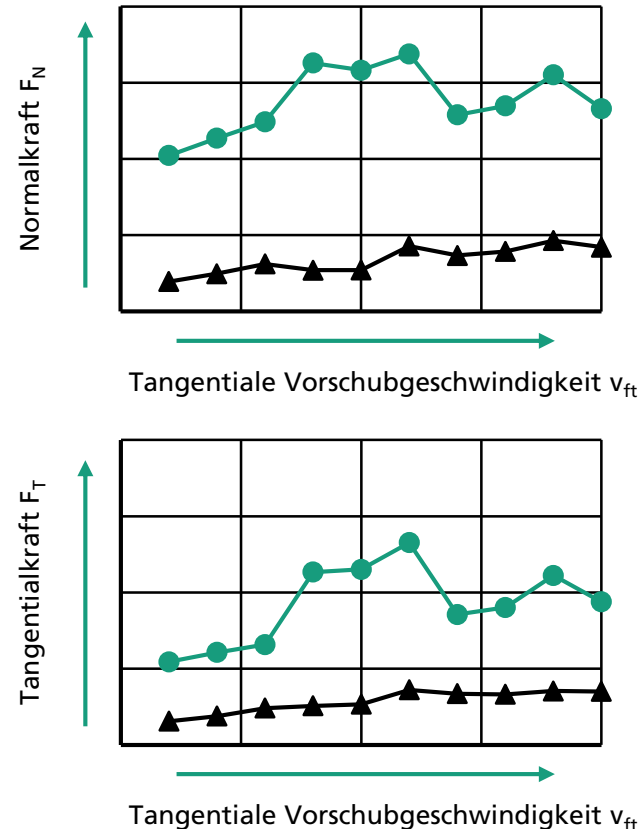
### Prozessparameter:

$v_{ft} = 2.000 \text{ mm/min}$   
 $a_e = 300 \mu\text{m}$   
 $a_p = 3 \text{ mm}$

# Bearbeitung von Ceramic Matrix Composites – SiC/SiC

## Ergebnisse – Koordinatenschleifen

- Anpassung des Schleifwerkzeuges durch Einsatz von HM-Grundkörpern
- Gesteigerte Biegesteifigkeit führt zur Erhöhung der Prozesskräfte
- Maßgenauigkeit kann entscheidend erhöht werden ( $< 10 \mu\text{m}$ )
- Reduzierung der Prozesskräfte durch Steigerung der Abtragsraten  
→ Verwendung größerer Diamantkörner)
- Anpassung der Korngröße und -art führt zu einer Verbesserung des Verschleißverhaltens



**Prozess:**  
Umfangsplanschleifen  
mit Schleifstiften

**Werkstück:**  
Ceramic Matrix Composite  
SiC/SiC

**Werkzeug:**  
● Diamantschleifstift  
(HM, D126)  
▲ Diamantschleifstift  
(HM, D252)

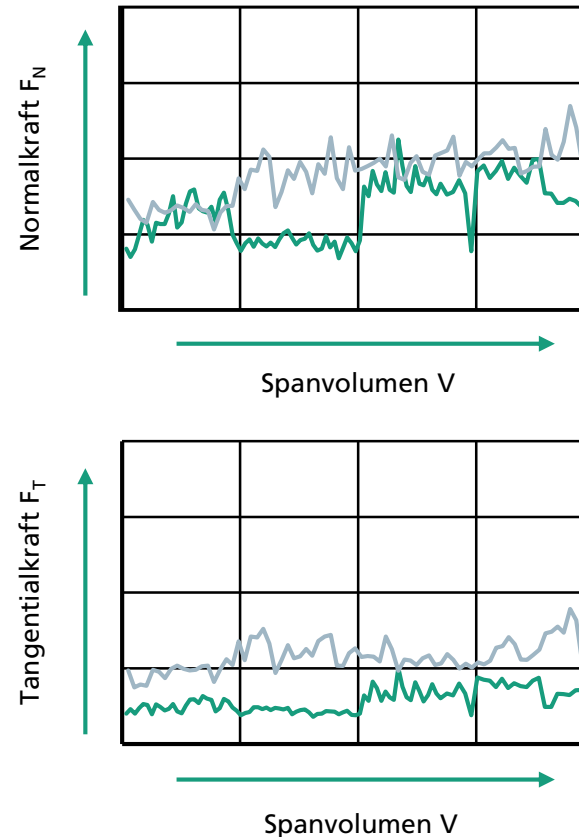
**Kühlschmierstoff:**  
Rotex Spezial V 1734-2

**Prozessparameter:**  
 $n = 50.000 \text{ 1/min}$   
 $a_e = 300 \mu\text{m}$   
 $a_p = 3 \text{ mm}$

# Bearbeitung von Ceramic Matrix Composites – SiC/SiC

## Ergebnisse – Einsatz alternativer Kühlschmiersysteme

- Bearbeitung mit galvanisch gebundenen Diamantschleifstiften mit HM-Grundkörper und D252
- Kühlschmierstoff hat keinen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung der Prozesskräfte bei steigendem Spanvolumen (Langzeitverhalten)
- Trockenbearbeitung ist prinzipiell möglich
- Abbruch der Versuche zur Trockenbearbeitung aufgrund starker Verschmutzung und gesundheitlicher Belastung  
→ Staub nicht gebunden durch KSS, unzureichende Absaugung



### Prozess:

Umfangsplanschleifen mit Schleifstiften

### Werkstück:

Ceramic Matrix Composite SiC/SiC

### Werkzeug:

Diamant-Schleifstift (HM, D252)

### Kühlschmierstoff:

■ Rotex Spezial V 1734-2

■ Wasser

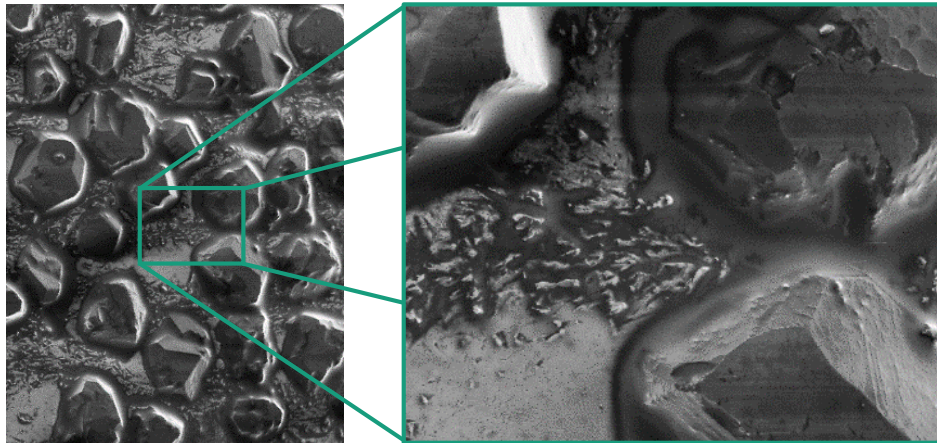
### Prozessparameter:

$n = 50.000 \text{ 1/min}$   
 $v_{ft} = 2.000 \text{ mm/min}$   
 $a_e = 300 \text{ }\mu\text{m}$   
 $a_p = 3 \text{ mm}$

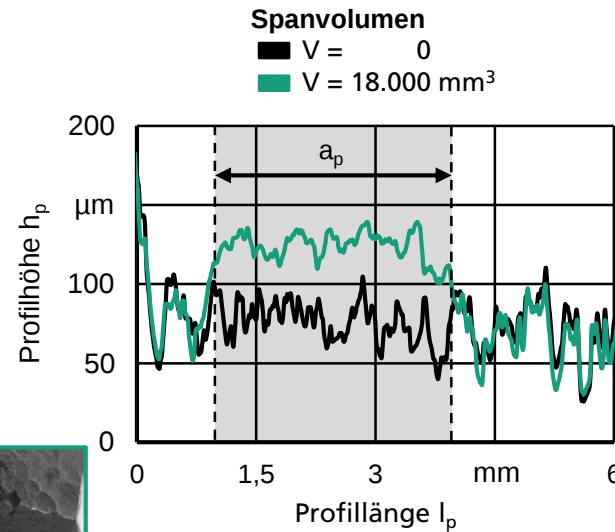
# Bearbeitung von Ceramic Matrix Composites – SiC/SiC

## Ergebnisse – Werkzeugverschleiß

- Verschleiß bei verschiedenen Kühlschmiersystemen ähnlich
- Makroskopischer Verschleiß in Form von Radialverschleiß ca. 50  $\mu\text{m}$  bei einem Spanvolumen  $V = 18.000 \text{ mm}^3$
- Mikroskopischer Verschleiß primär in Form von Druckerweichen



REM-Aufnahme eines Diamant-Schleifstiftes nach der Bearbeitung von SiC/SiC



### Prozess:

Umfangsplanschleifen  
mit Schleifstiften

### Werkstück:

Ceramic Matrix Composite  
SiC/SiC

### Werkzeug:

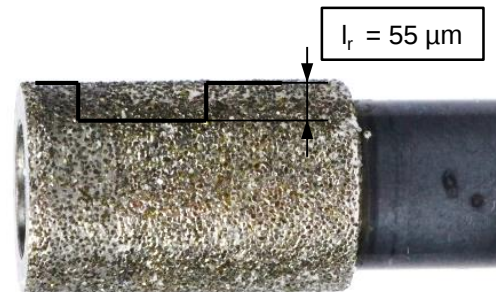
Diamant-Schleifstift  
(HM, D252)

### Kühlschmierstoff

Rotex Spezial V 1734-2

### Prozessparameter:

$n = 50.000 \text{ 1/min}$   
 $v_{ft} = 2.000 \text{ mm/min}$   
 $a_e = 300 \mu\text{m}$   
 $a_p = 3 \text{ mm}$

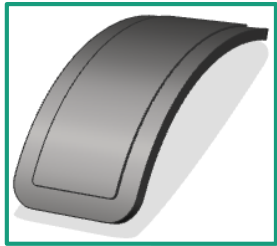


Diamant-Schleifstifte nach der Bearbeitung von SiC/SiC

# Bearbeitung von Ceramic Matrix Composites – SiC/SiC

## Anwendung

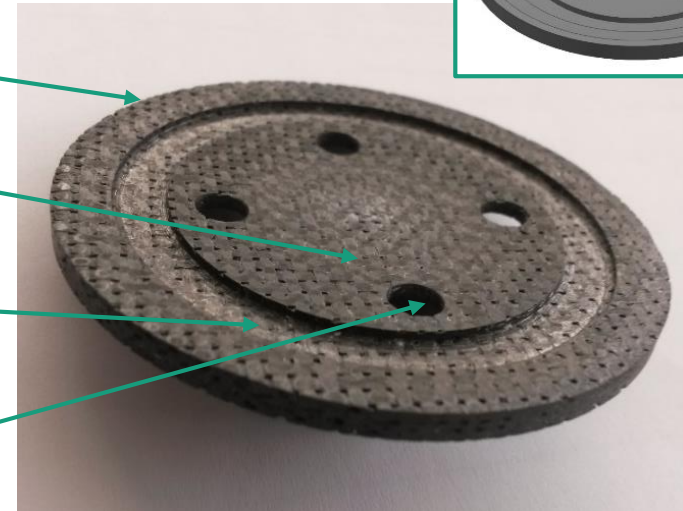
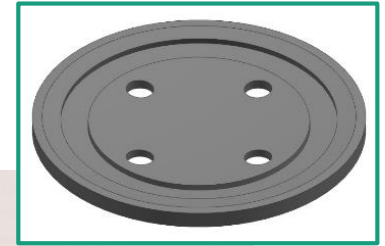
- Übertragen der Ergebnisse auf Bauteile mit technisch relevanten Features



Kachel aus SiC/SiC (unidirektionale Endlosfaser)

### Features:

- Kontur
- Freiform
- Nut
- Bohrung



Demonstrator aus SiC/SiC (Fasergewebe)

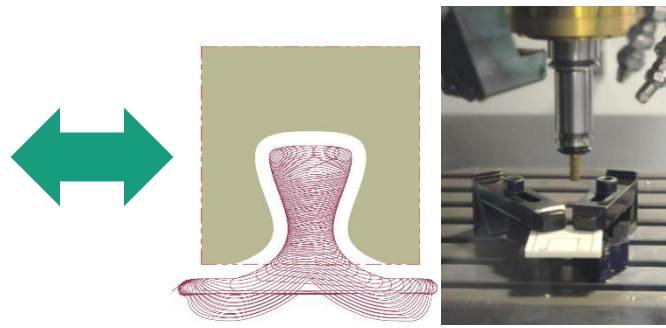
# Bearbeitung von Hochleistungskeramik – Zusammenfassung

## Werkzeuge



Werkzeuge zur  
Keramikbearbeitung

## Prozesse



2 ½ D-Konturbearbeitung mit  
programmiertem Werkzeugweg

## Maschinen und - peripherie



5-Achs-Koordinatenschleif-  
maschine und Aufspannsystem

## Integrierte Herstellung keramischer Komponenten



Monolithische Keramik



CMC

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

## Kontakt:

Dr.-Ing. Tiago Borsoi Klein

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Fertigungstechnologien

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen  
und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstraße 8-9  
10587 Berlin

Tel.: +49 (0) 30 / 3 90 06-267

[tiago.borsoi.klein@ipk.fraunhofer.de](mailto:tiago.borsoi.klein@ipk.fraunhofer.de)

<http://www.ipk.fraunhofer.de>

