



**Universität Stuttgart**

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile



# Fertigungstechnik keramischer Bauteile, Verbundwerkstoffe u. Oberflächentechnik

apl. Prof. Dr. rer. nat. Andreas Killinger

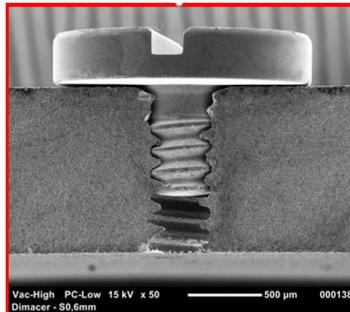
# Abteilung: Hochleistungskeramik

Auswahl aktueller Forschungsaktivitäten am Institut



**Erodierbare Keramiken  
(EDM Hartstoffbearbeitung)**

Präzisionskomponenten aus hartzäher Sonder-  
Keramik für den Werkzeug- und Formenbau  
AiF-ZIM Projekte mit Mittelständlern



Source: IFKB Universität Stuttgart

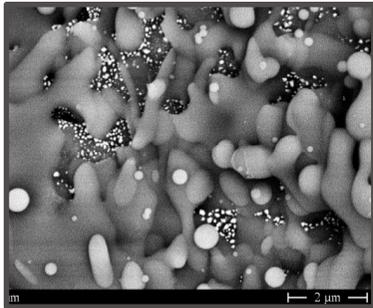
**USB-LED  
auf Keramiksubstrat**

**Laserinduzierte Metallisierung von  
Strukturkeramik  
für MID „mechatronic integrated  
devices“**

Keramikspritzguss & Additive  
Manufacturing  
AiF-IGF Kooperationsprojekte mit  
Hahn-Schickard

# Abteilung Oberflächentechnik und Schichtverbunde

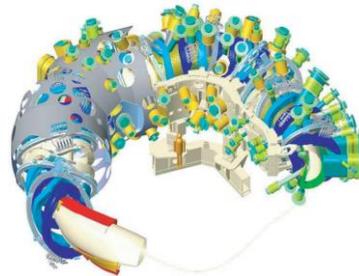
Auswahl aktueller Forschungsaktivitäten am Institut



## Antibakterielle und bioaktive Oberflächen für die Prothetik

Realisierung neuartiger Drug-Delivery Konzepte

Verbesserte Verträglichkeit  
Schnellerer Heilungsprozess



## Fusionsreaktor

### Mikrowellen-Absorberschichten in Fusionsreaktoren

Beschichtung von Reaktorkomponenten in Wendelstein und ITER



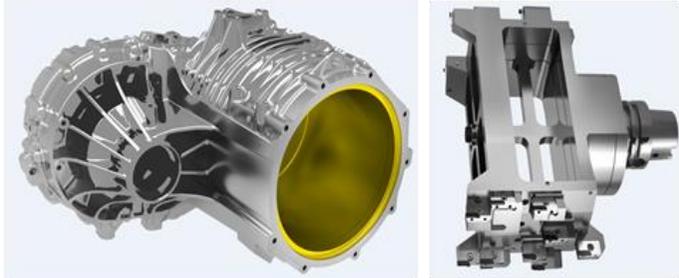
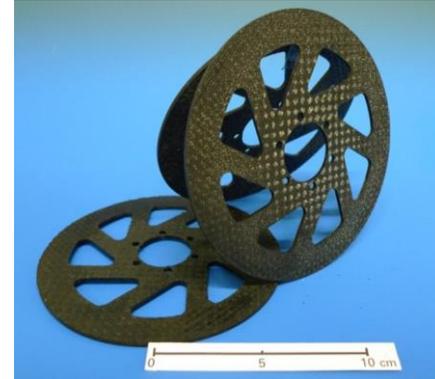
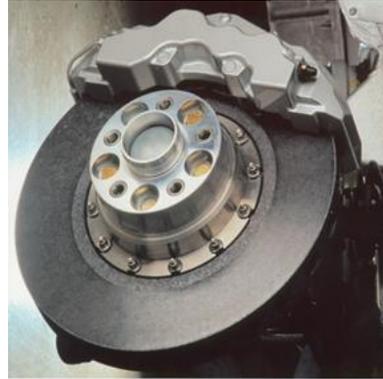
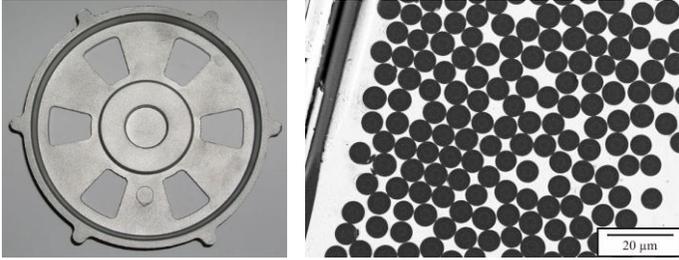
### Friktionsschichten für Leichtbau-Bremsscheiben

Reduktion von Feinstaub  
Leichtbau-Konzepte für e-mobility Systeme



# Abteilung: Verbundwerkstoffe

## Auswahl aktueller Forschungsaktivitäten am Institut



### Faserverstärkte Keramiken, PDC polymerabgeleitet

**Ceramic-Composite Brake Rotor (DE 197 11831,  
DE 197 11829)**

Leichtbaupotential und hohe Temperaturbeständigkeit  
kostengünstige Rohstoffbasis, serientaugliche CMC-  
Fertigungstechnologie für Fahrzeugbau, Luftfahrt und  
Brandschutz, technische Gebäudeausrüstung

### Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (BMBF Zeral-E)

Hochsteife und leichte Konstruktionswerkstoffe auf  
Aluminiumbasis mit maßgeschneiderten  
thermophysikalischen Eigenschaften als  
Schlüsselkomponenten der E-Mobilität

# Fertigungstechnik keramischer Bauteile, Verbundwerkstoffe und Oberflächentechnik

## Spezialisierungsfach für die Medizintechnik: Struktur

	Dozent	Benennung	LP	Anz. Semester	Turnus
<b>Kernfächer</b>					
IFKB	Kern / Killinger	Fertigungsverfahren Faser- und Schichtverbundwerkstoffe	6	2	WS/SS, SS/WS
	Kern	Grundlagen der Keramik und Verbundwerkstoffe	6	2	WS/SS
	Kern / Killinger	Neue Werkstoffe und Verfahren in der Fertigungstechnik	6	1 2	WS+SS
<b>Kern-/Ergänzungsfächer</b>					
IFKB	Kern / Killinger	Fertigungsverfahren Faser- und Schichtverbundwerkstoffe	6	2	WS/SS, SS/WS
IKFF	Gundelsweiler	Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik	6	2	WS/SS
IFSW	Graf	Materialbearbeitung mit Lasern	6	2	WS/SS
IMWF	Weihe	Festigkeitslehre I	6	2	WS/SS
IFKB	Kern	Grundlagen der Keramik und Verbundwerkstoffe	6	2	WS/SS
	Kern / Killinger	Neue Werkstoffe und Verfahren in der Fertigungstechnik	6	1 oder 2	WS+SS
IFKB / IFF	Killinger / Tiedje	Oberflächen- und Beschichtungstechnik	6	2	WS/SS
<b>Ergänzungsfächer</b>					
IFKB	Killinger	Thermokinetische Beschichtungsverfahren	3	1	WS
	Kern	Werkstoffe und Fertigungstechnik technischer Kohlenstoffe	3	1	WS+SS
	Ninz	Total Quality Management (TQM) und unternehmerisches Handeln	3	1	WS+SS
IFW	Rothmund	Grundlagen der Zerspanungstechnologie	3	1	WS+SS
IFKB		Additive Fertigung	3	1	WS
<b>Praktikum</b>					
IFKB	Killinger / Kern	Praktikum Fertigungstechnik keramischer Bauteile, Verbundwerkstoffe u. Oberflächentechnik	3	1	WS+SS

Das Spezialisierungsfach setzt sich aus **einem Kernfach mit 6 LP**, **einem weiteren Kern- oder Ergänzungsfach mit 6 LP** und **einem Ergänzungsfach mit 3 LP** zusammen. Hinzu kommt das **Praktikumsmodul**.

Alle wichtigen **Informationen** und **Bekanntmachungen** findet ihr auf **Ilias!!**

---

**Modul 32210:  
Grundlagen der Keramik und Verbundwerkstoffe**

**F. Kern**

**Vorlesung:** Fertigungstechnik keramischer Bauteile I (WS)

**Vorlesung:** Fertigungstechnik keramischer Bauteile II (SS)

# Fertigungstechnik keramischer Bauteile I + II (4SWS)

Materialien, Fertigungstechnologien, Anwendungen

## Wintersemester

0. Orga und Informationen zur Vorlesung
1. Institut und Einführung
  1. Institut
  2. Einführung
2. Grundlagen Keramik
  1. Einführung keramische Werkstoffe
    1. Eigenschaften keramischer Werkstoffe
    2. Fertigungskette
    3. Theorie des Sinterns
  2. Oxidkeramiken
    1. Aluminiumoxid
    2. Zirkonoxid
  3. Nichtoxidkeramiken
    1. Siliziumkarbid
    2. Siliziumnitrid
  4. Bruchmechanik
  5. Verfahren zur Materialcharakterisierung
  6. Konstruieren mit keramischen Werkstoffen

## Sommersemester

0. Orga und Informationen zur Vorlesung
3. Fertigungstechnik
  1. Rohstoffe und Masseaufbereitung
    1. Rohstoffe und Syntheseverfahren
    2. Mahltechnik
    3. Masseaufbereitung / Granulatherstellung
    4. Pulvercharakterisierung
  2. Formgebung
    1. Gießverfahren
    2. Pressverfahren
    3. Plastische Formgebung
  3. Grün- und Weißbearbeitung
  4. Wärmebehandlungen
    1. Entbindern
    2. Sintertechnik
    5. Hartbearbeitung
4. Anwendungsbeispiele

# Keramik-Highlights aus dem Institut Materialentwicklung & Fertigungstechnik

## Oxidkeramiken/Mischkeramiken

### Medizintechnik



TZP / ZTA / ATZ

- Dental
- Orthopädie
- Kieferorthopädie
- Scaffolds

### Maschinenbau



Erodierbare Keramiken

- Werkzeugeinsätze
- Schneidstempel
- Umformwerkzeuge

### Mikroelektronik

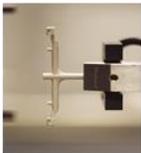


Source: IFKB Universität  
Stuttgart

Laserinduzierte  
Direktmetallisierung

- Molded interconnect devices
- Sensoren

## Fertigungstechnik



**Keramikspritzguß**

- 1K/2K
- variotherm



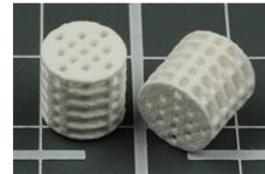
**Presstechnik**

Sprühgranulieren  
Pressen  
Zerspanen



**Non-conventional  
machining**

- EDM
- Laser



**Additive Manufacturing**

FDC (filament)  
DLP (lithography)

---

**Modul 13041:  
Fertigungsverfahren Faser- und Schichtverbundwerkstoffe**

**F. Kern (VB I) A. Killinger (VB II)**

**Vorlesung:** Verbundwerkstoffe I:  
Anorganische Faserverbundwerkstoffe (WS)

**Vorlesung:** Verbundwerkstoffe II: Oberflächentechnik und  
Schichtverbunde(SS)

# Warum Verbundwerkstoffe?

immer komplexere Lastenhefte für hochbelastete **Strukturbauteile:**

## niedrige Dichte

Leichtbaustrukturen (*Einsparung primärer Energieträger, Emissionsreduzierung - Schadstoffnormen, verbesserte Ökobilanz*)

## technische Leistungsfähigkeit

mechanische Eigenschaften

(*hohe Festigkeit, E-Modul, schadenstolerantes Versagensverhalten*)

thermische und chemische Beständigkeit

tribologische Eigenschaften (*Reibungskoeffizient, Verschleiß*)



komplexe Anforderungsprofile begrenzen den Einsatz konventioneller monolithischer Bauteile

# Verbundwerkstoffe – Einteilung nach Matrices

## Verbundwerkstoffe mit Polymermatrix (Polymer Matrix Composites – PMC)

Einlagerung von **Partikeln** hauptsächlich zur **Erhöhung der Funktionalität** (thermo-/elektro-physikalisch, chemische Beständigkeit), aber auch aus fertigungstechnischen Gründen (Verarbeitbarkeit)

**Faserverstärkung** zur **Erhöhung der Festigkeit und des E-Moduls**

## Verbundwerkstoffe mit metallischer Matrix (Metal Matrix Composites – MMC)

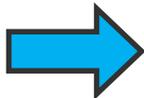
Einlagerung von **Partikeln und Fasern** vor allem in Leichtmetallmatrices zur **Erhöhung der Festigkeit und des E-Moduls** besonders bei erhöhten Temperaturen

## Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (Ceramic Matrix Composites – CMC)

Einlagerung von **Partikeln und Fasern** zur **Erhöhung der Schadenstoleranz** („Quasi-duktiler Bruchverhalten“)

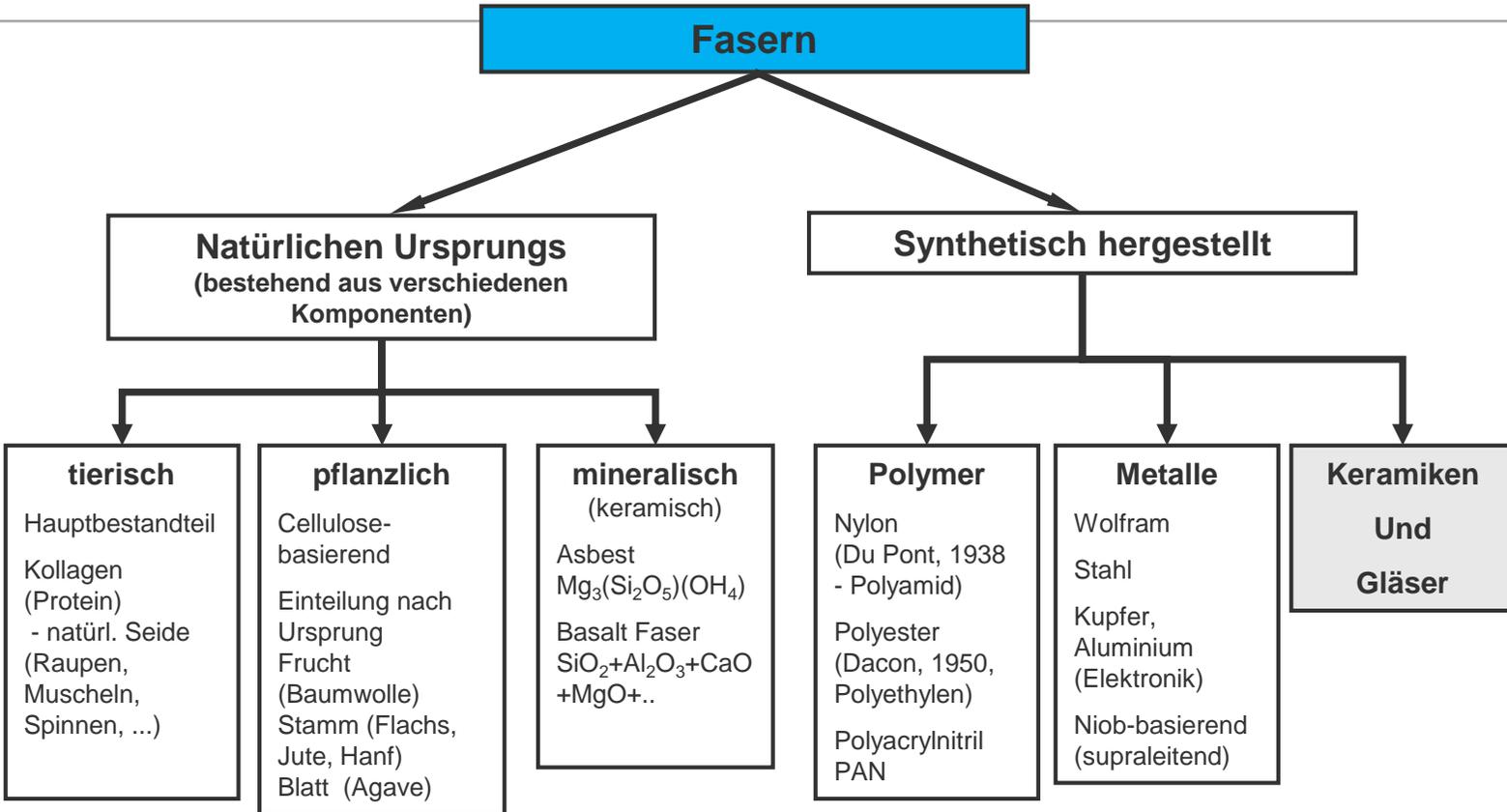
## Verbundwerkstoffe mit glasartiger Matrix (Glass Matrix Composites – GMC)

Als Untergruppe der CMC



**Je nach Matrix unterschiedliche Motivation für die Einbringung einer Verstärkungsphase**

# Fasern als Verstärkungselemente in Verbundwerkstoffen



# Verstärkungsfasern

Aramidfaser



Quelle: R-G

Glasfasern



Quelle: Saint-Gobain

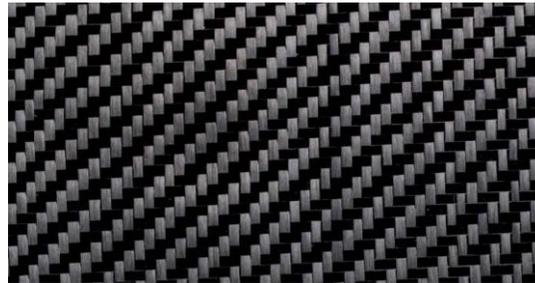
Basaltfasern



Kohlenstofffasern



Quelle: Handelsblatt



Quelle: HEXCEL

# Herstellungsverfahren Faserverstärkte Bauteile (PMC, MMC, CMC)

## Faserspritzen



Quelle: Bucker Kunststofftechnik GmbH

## Fasernasswickeln



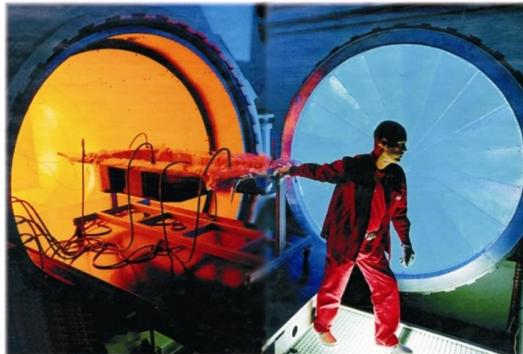
Quelle: EHA Composite Machinery

## RTM-Verfahren



Quelle: Dieffenbach/ZF/  
KraussMaffei/BMW

## Autoklav-Verfahren



Quelle: Toyota Motorsport GmbH (TMG)

## Flechten



Quelle: 2C Composites

# Anwendungsbeispiele für Verbundwerkstoffe



Quelle: Porsche



Quelle: sep aerospatale



Quelle: araihelmets-europe.com

CFK-Zielbügel für Oberschenkel- oder Kniefrakturen



Quelle: Europ-Ray



Quelle: Batex



Quelle: Brembo.com

# Faserverbundwerkstoffe in der Medizin

Nutzung der chemischen Eigenschaften des polymeren Matrixwerkstoffs

- Biokompatibilität
- Inertheit, Korrosionsbeständigkeit
- Sterilisierbarkeit

Nutzung der mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfaser

- hohe mechanische Kennwerte

Implantate



Prothesen

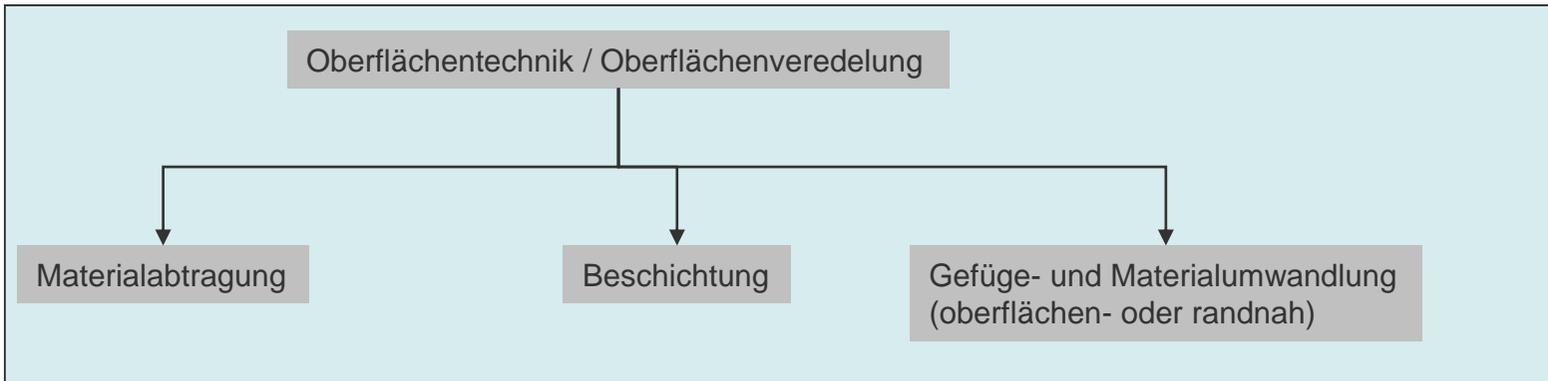


# Was ist Oberflächentechnik ?

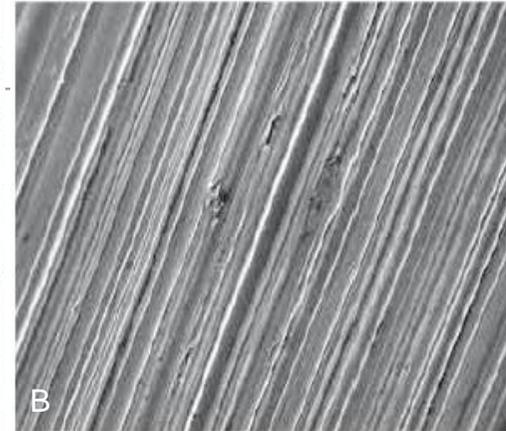
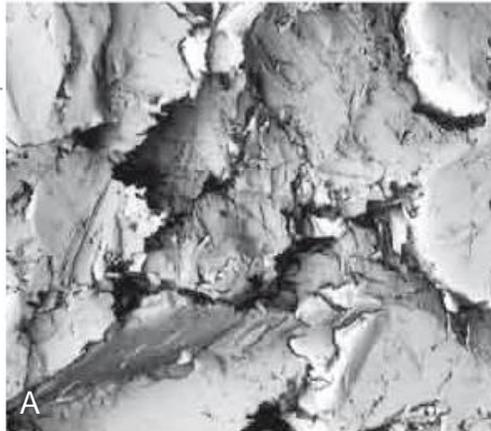
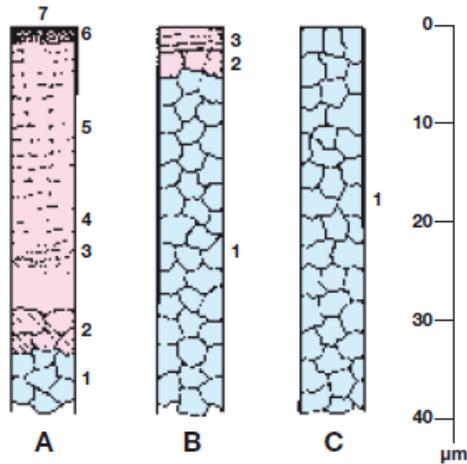
Die Oberflächentechnik umfasst...

jede **kontrollierte** Veränderung von Oberflächen zu funktionalen Zwecken

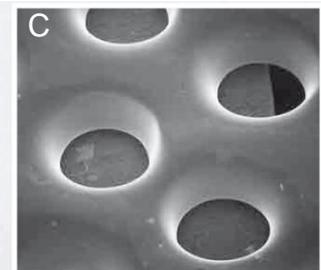
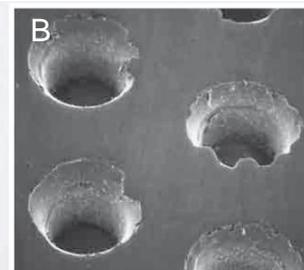
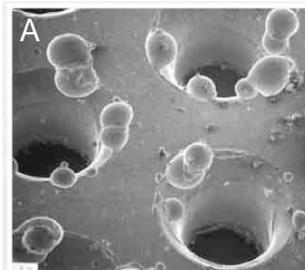
- ❖ **Materialabtragung:** Reinigung, Vorbehandlung, Schleifen, Polieren, Aktivierung ..
- ❖ **Materialabscheidung:** Beschichtungsverfahren
- ❖ **Gefüge- und/oder Materialumwandlung:**  
Ändern von Stoffeigenschaften: Verdichten, Aufhärtung,  
Eindiffundieren von Fremdstoffen
- ❖ **Strukturieren** von Oberflächen (Gezielte Verändern der Oberflächengeometrie)



# Abtragende Verfahren: Elektropolieren



Unterschiedlich bearbeitete Cr-Ni-Stahl-Oberflächen, Vergrößerung 1000fach  
 A Gestrahlt mit Korund. B Geschliffen (Korn 180)



Oberflächen eines Filterbleches WN 1.4301, Vergrößerung 50fach  
 A: Ausgangszustand  
 B: Geschliffen zur Grobentgratung  
 C: 10 Min elektropoliert

*Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die Tiefe der mechanisch veränderten Schicht*

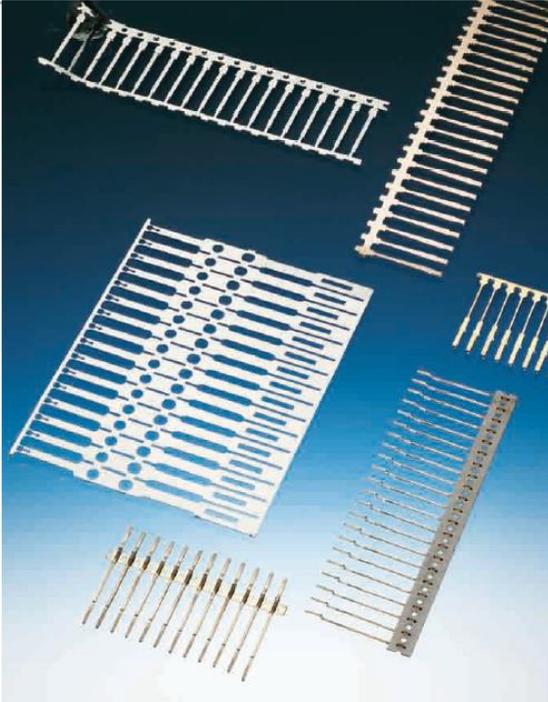
**A** Geschliffen   **B** Gehont   **C** Elektropoliert

1 Austenit  
 2 Austenit und kalt verformter Ferrit  
 3 Kalt verformter Ferrit  
 4 Kalt verformter Ferrit und verformter Austenit  
 5 Verformter Austenit  
 6 Stark verformte Körner mit oxidischen Einschlüssen  
 7 Verschiedene Oxide

*(Nach J. Wulff, The Metallurgy of Surface Finish, Cambridge/Mass.)*

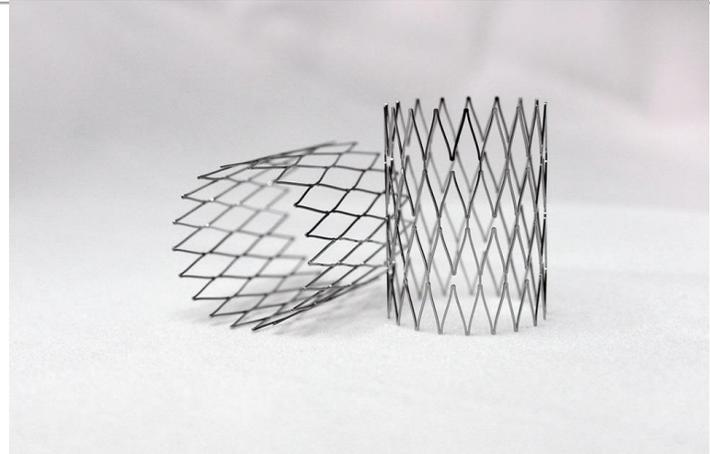
Alle Abbildungen © Firma Polygrat

# Elektropolieren: Bauteilspektrum (Elektro- und Medizintechnik)



Elektropolierte Kontaktbänder aus Bronze, Neusilber, Berylliumbronze, Messing und Kupfer.

Bearbeitungsziel: Fein-Entgratung und verbesserte Galvanisierbarkeit



NiTi (Nitinol) Stents © Firma MeKo  
alternativ auch aus 316L und CoCr

# Die wichtigsten Beschichtungsverfahren

Lackierverfahren

Sol-Gel  
Präkursorbeschichtung

Schmelztauchen

Thermisches Spritzen

Auftragsschweißen

Vakuumbeschichtung  
PVD und CVD

Nach welchen Kriterien kann man die Vielzahl von Beschichtungsverfahren ordnen ?

Emaillieren

Elektrochemische Verfahren  
Galvanik

# Beispiel Beschichtung: Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)



Magnetronsputterquelle

Typische Anwendungsfelder:

Elektrotechnik, Optik, Korrosionsschutz, Photovoltaik, Halbleitertechnik, allgemeiner Maschinenbau, Medizintechnik, Automobiltechnik u. v. m.

Typische Stoffsysteme:

Metalle, Nichtoxidkeramiken, Oxidkeramiken, organische Polymere, Halbleiter, amorphe Kohlenstoffe und viele weitere Sonderwerkstoffe

- Verfahren zur Herstellung von Dünnschichten ( 100 nm – einige  $\mu\text{m}$ )
- Benötigt Vakuumkammer (Fein- Hochvakuum)
- Industrieller Standard

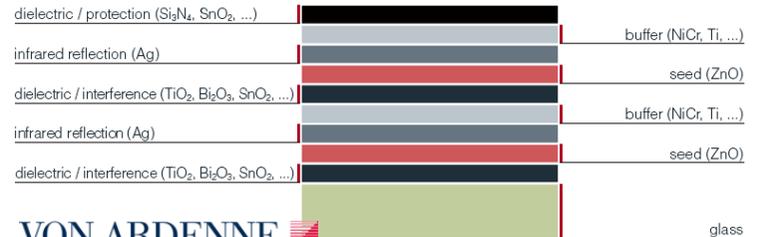
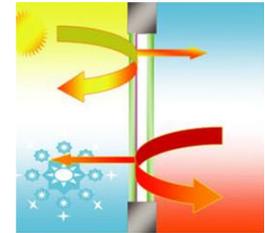
# Anwendungsbeispiele PVD: Bohrwerkzeuge und Architekturglas



## Wärmedämmung / Lichtschutz auf Architekturglas



■ low  $\epsilon$  - glass "



VON ARDENNE

Aufbau einer low  $\epsilon$  - glass Schicht

# Dünnschichtverfahren in der Medizintechnik

Knie-Implantate

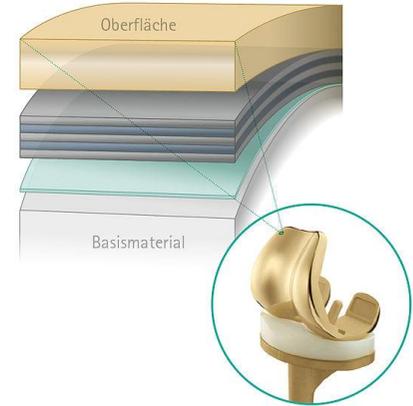


Titan-Nitrid (TiN) oder Titan-Niob-Nitrid (TiNbN)

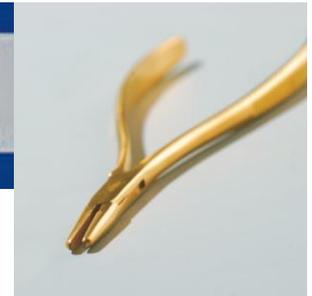
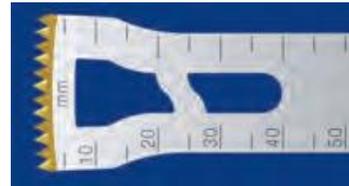


Farbgebung zur Kennzeichnung

Knie-Implantate  
ZrN-CrN-CrCN



- Implantat-Beschichtung: korrosionsbeständig, biokompatibel, tribofunktional z. B. TiN, TiNbN, ZrN-CrN-CrCN
- DLC-Beschichtung für Stents
- TiN auf Operationsbestecken etc.
- Verfahrensvarianten: ARC, MS, PA-CVD



Medizinische Geräte

---

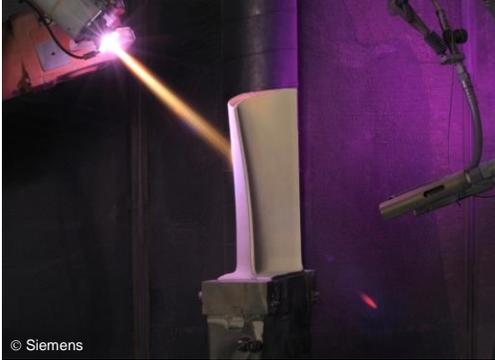
**Modul 32500:  
Neue Werkstoffe und Verfahren in der Fertigungstechnik**

**A. Killinger (I) F. Kern (II)**

**Vorlesung:** Thermokinetische Beschichtungsverfahren

**Vorlesung:** Werkstoffe und Fertigungstechnik technischer Kohlenstoffe

# Thermokinetische Beschichtungsverfahren (Thermisches Spritzen)



Typische Anwendungsfelder:  
Allgemeiner Maschinenbau, Automobiltechnik, Aerospace,  
Energietechnik, Korrosions- und Verschleißschutz, elektrische  
Funktionsschichten, **Medizintechnik** u. v. m.

Typische Stoffsysteme:  
Metalle (Fe, Ni, Co –Basis, Al, Zn, Cu ...), Oxidkeramiken, einige  
Karbide (z. B.  $B_4C$ ), Cermets (z. B. WC-Co, CrC-NiCr),  
Thermoplasten, **CaP-Keramiken**, Gläser ....

Spritzzusätze in Form von Pulvern, Draht, Stab oder als Suspension,  
im Spritzprozess Überführung in **schmelzflüssige Phase**.

Besonderheiten: Einziges (einstufiges) Verfahren, welches oxidkeramische Dickschichten aufbringen kann.  
Thermisch induzierte Eigenspannungen möglich !

Spritzen von Calciumphosphatkeramiken für Gelenkimplantate

# Thermokinetische Beschichtungsverfahren

## Anwendungsfelder



**Mechanischer Verschleißschutz & Korrosionsschutz im Maschinenbau**

**Reparaturschichten**

**Haftvermittler**

**Wärmedämmschichten & Funktionsschichten Im Turbinenbau**

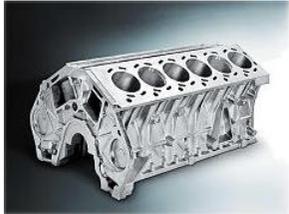
**Schichten für medizintechnische Anwendungen**

**Sonderanwendungen z. B. Kerntechnik, Sensorik usw.**

**Elektrische Funktionsschichten**

**Tribologische Funktionsschichten**

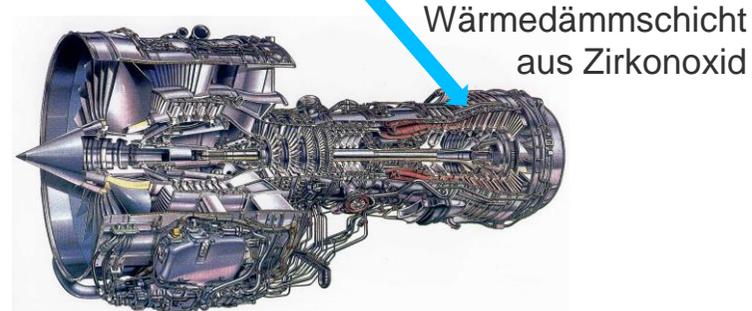
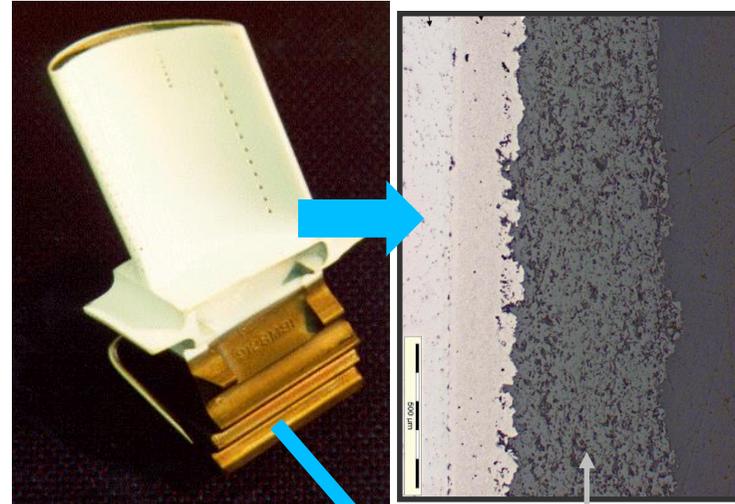
**Abraables, Einlaufschichten**



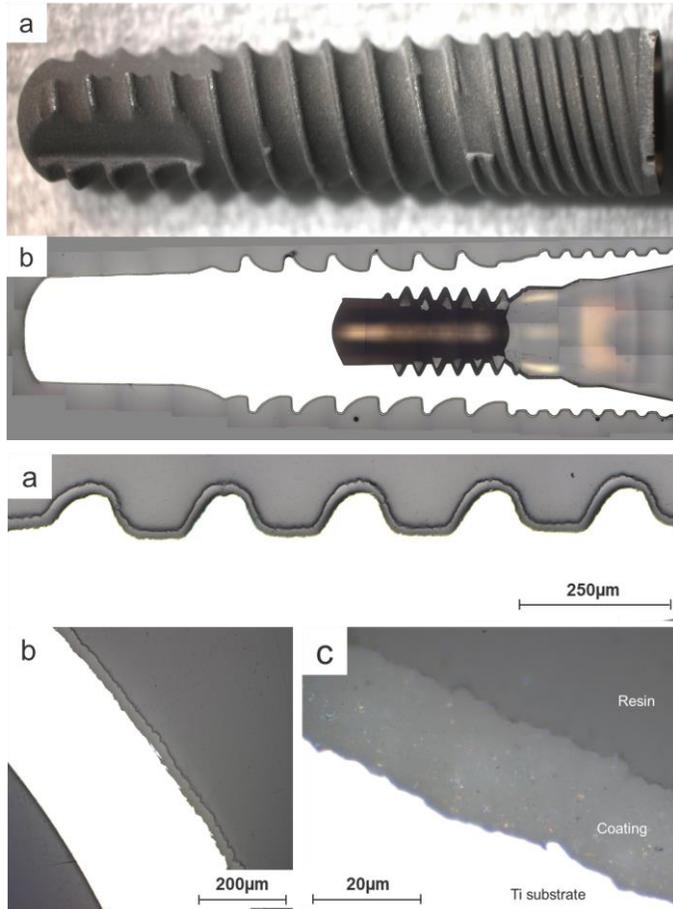
# Anwendungsbeispiele Thermisches Spritzen

## Medizintechnik und Fluggasturbine

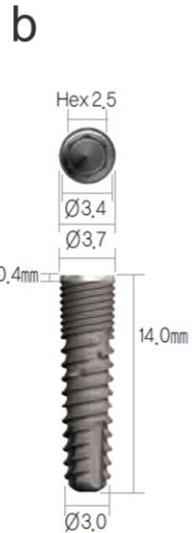
Hüftgelenkprothese



# Oberflächen- und Beschichtungstechnik



Hydroxylapatitbeschichtung auf Zahnimplantat



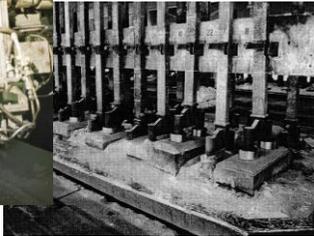
Schichtstruktur Gewindeoberfläche

# Werkstoffe und Fertigungstechnik technischer Kohlenstoffe



Quelle: SGL

## Elektroden

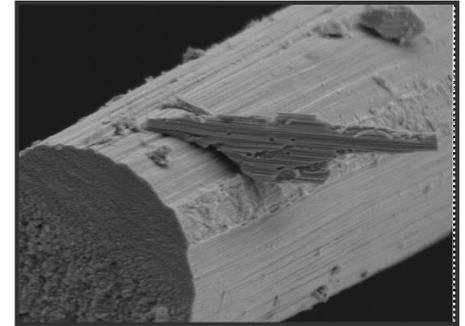


Quelle: Anodes, R&D Carbon



Quelle: SGL

## Feinkorngraphit

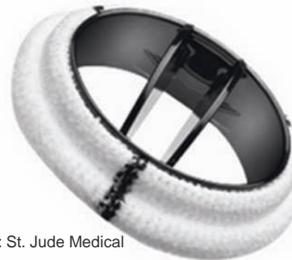


## C-Fasern und Faserbeschichtungen



Quelle: VB II, Gadow

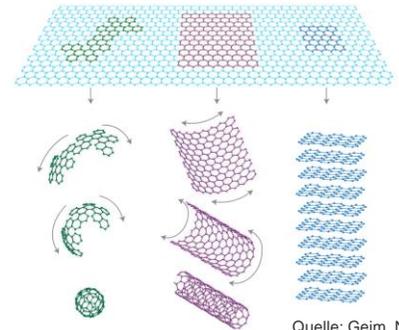
## Carbon-Carbon-Composites



Quelle: St. Jude Medical

## Herzklappen

Graphit / Pyrokohlenstoff



Quelle: Geim, Nature 2007

## CNTs & Graphen

---

**Modul 32510:  
Oberflächen- und Beschichtungstechnik (OB)**

**A. Killinger (I) O. Tiedje (II)**

**Vorlesung: OB I: Thermokinetische Beschichtungsverfahren**

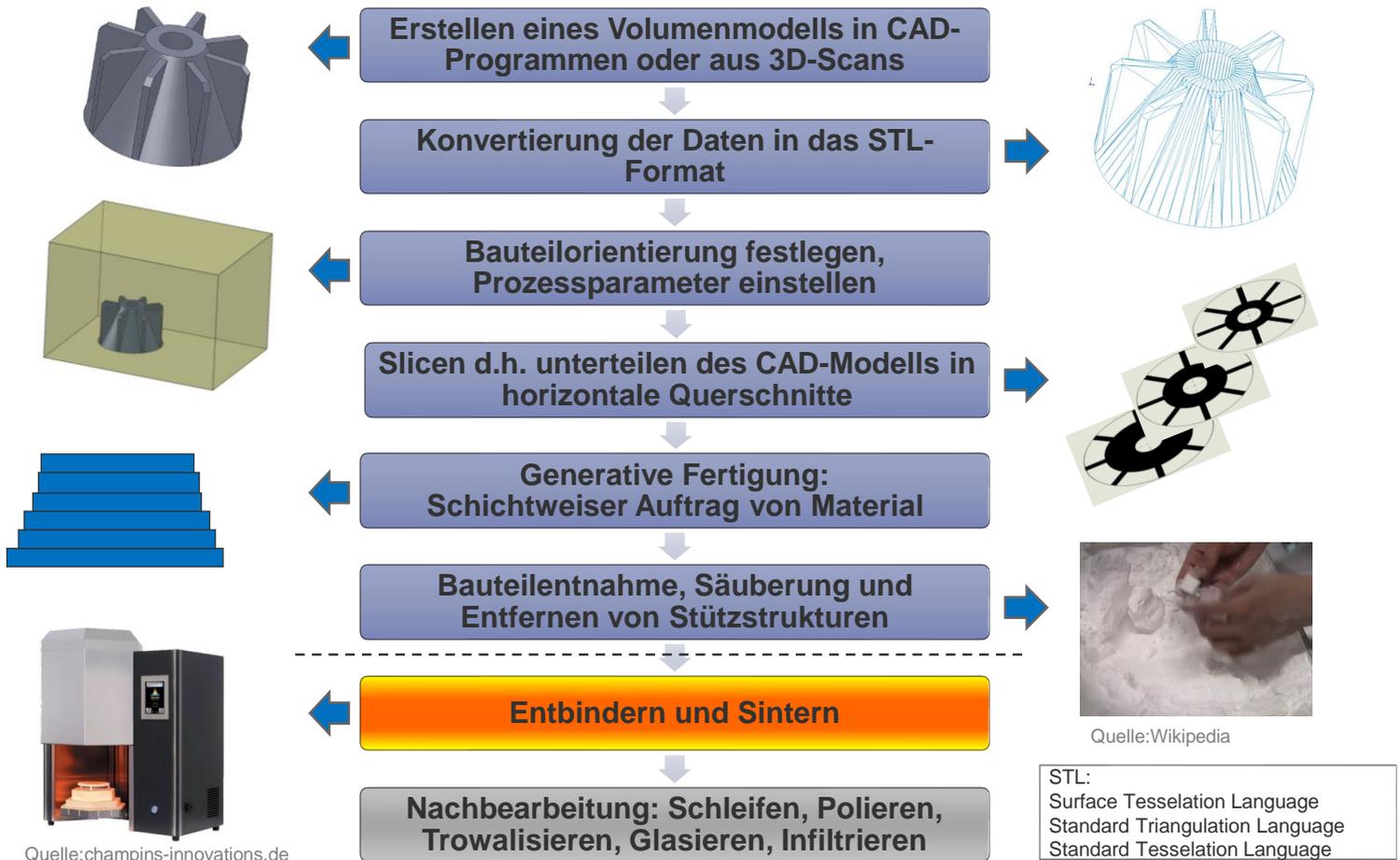
**Vorlesung: OB II Lackierverfahren**

---

# Modul 74200: Additive Fertigung

F. Kern

# Prozessschritte der generativen Formgebung von Keramik-Bauteilen



---

**Modul 32530:  
Total Quality Management (TQM) und unternehmerisches Handeln**

**F. Kern / P. Ninz**



Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit