

# Effizienzsteigerung im Titanfeinguss durch angepasste Werkstoffe und Technologien



Lisa Freitag<sup>a</sup>, Christos G. Aneziris<sup>a</sup>, Florian Bulling<sup>b</sup>, Ulrich E. Klotz<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institut für Keramik, Feuerfest und Verbundwerkstoffe, TU Bergakademie Freiberg

<sup>b</sup> fem Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie, Schwäbisch Gmünd

4. Feuerfestsymposium, Freiberg, 27.04.2022

## Titan und Titanlegierungen – exzellente Eigenschaften



Boeing 787 “Dreamliner”

© Boeing Corporation

**Hohe spezifische Festigkeit**



Zahnimplantat

[www.zahnarztpraxis-kupferdreh.de](http://www.zahnarztpraxis-kupferdreh.de)

**Biokompatibilität**



Turbinenschaufel

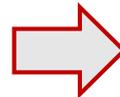
© ADV-TI CO., LTD

**Kriechbeständigkeit**

## Ziel 1: Korrosionsbeständiger Werkstoff

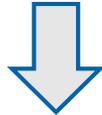
### Titanlegierungen

- Hoher Schmelzpunkt (Ti6Al4V: 1670 °C)
- Extrem reduzierende Schmelze



### Stand der Technik

- Keramische Feingussformen (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Frontschicht, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> Stützsichten, SiO<sub>2</sub>-Binder)
- Harte, spröde Reaktionszone (α-case)
- Aufwendige Nachbearbeitung



### Korrosionsbeständige Feingussformen

- Ausschließlich CaZrO<sub>3</sub>, bereits erfolgreiche Verwendung für Tiegel\*
- Silikatfreies Bindersystem

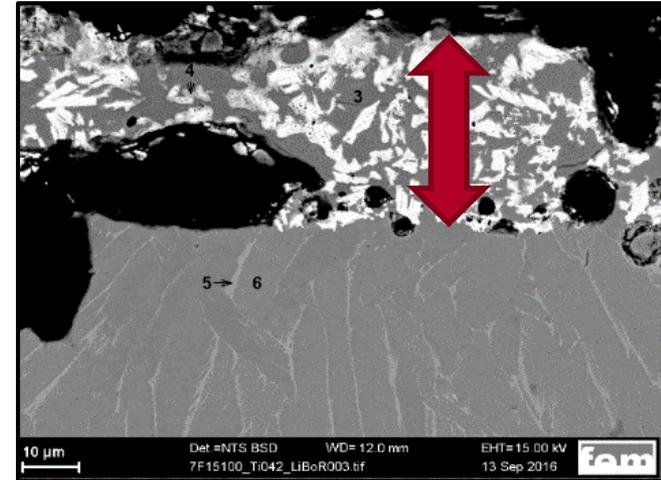
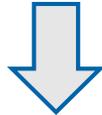


- Grünfestigkeit
- Thermoschockbeständigkeit
- Gasdurchlässigkeit

## Ziel 1: Korrosionsbeständiger Werkstoff

### Titanlegierungen

- Hoher Schmelzpunkt (Ti6Al4V: 1670 °C)
- Extrem reduzierende Schmelze



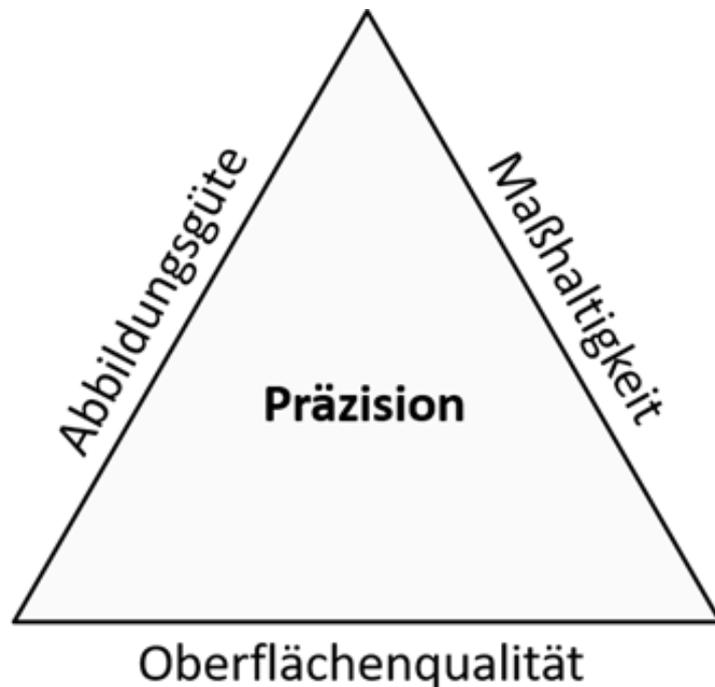
### Korrosionsbeständige Feingussformen

- Ausschließlich  $\text{CaZrO}_3$ , bereits erfolgreiche Verwendung für Tiegel\*
- Silikatfreies Bindersystem



- Grünfestigkeit
- Thermoschockbeständigkeit
- Gasdurchlässigkeit

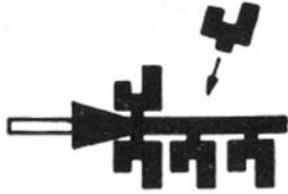
## Ziel 2: Neuartige Technologien



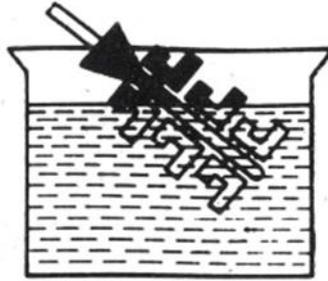
### Funktionale Beschichtungen

- Dünne Beschichtungen
- Geringe Partikelgröße  $\leq 63 \mu\text{m}$
- Neuartige Beschichtungsverfahren:  
Sprühen und Zentrifugieren
- Rheologische Einstellung der Schlicker
- Funktionalisierung der Oberfläche und  
des Gefüges

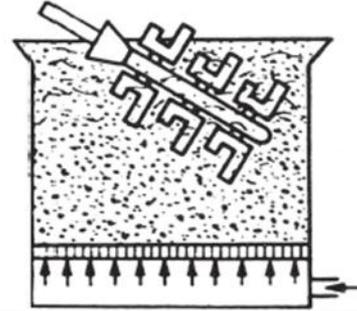
# Wachsausschmelzverfahren



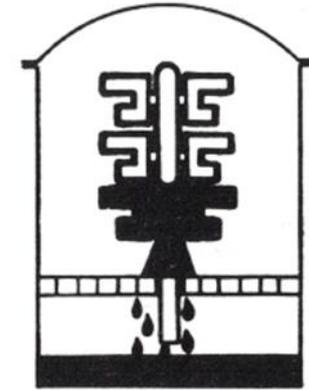
Wachsmodell



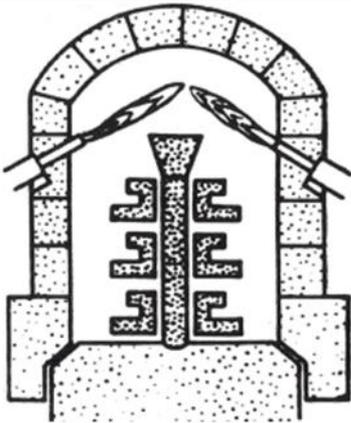
Tauchbeschichtung



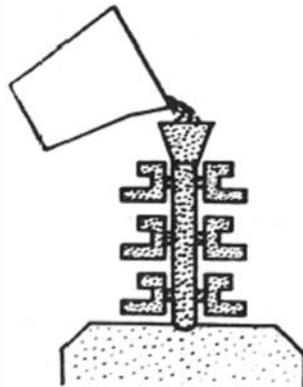
Besandung



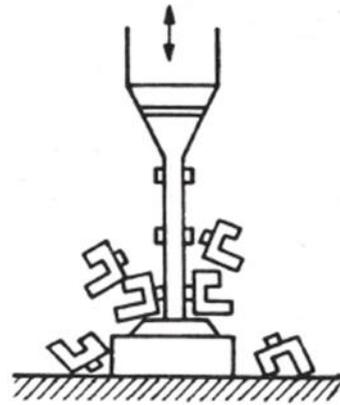
Wachsausschmelzen



Brennen



Abguss

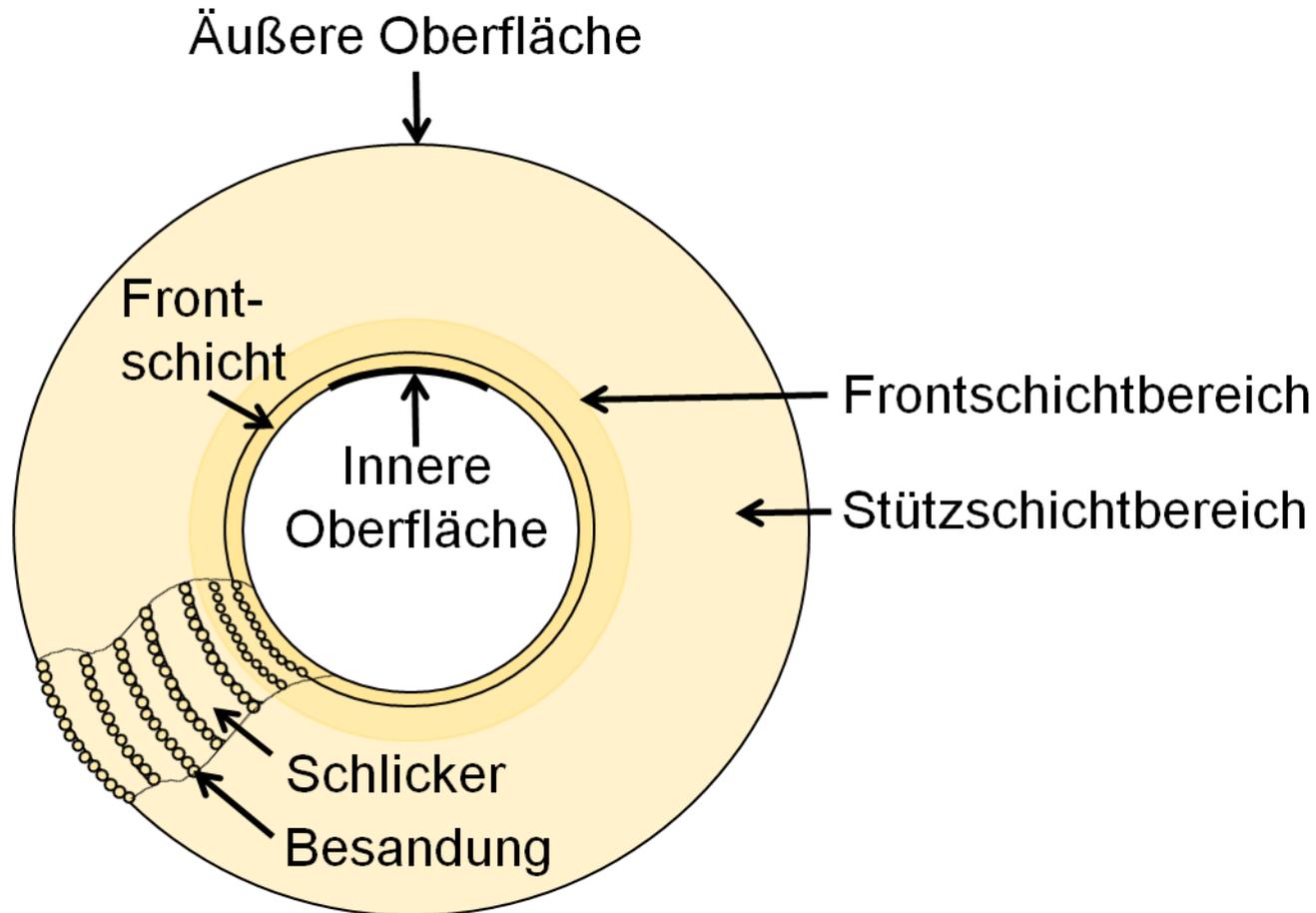


Entformung



Nachbearbeitung

## Modell Feingussform mit Begriffserklärung



Ziel 1:  
Korrosionsbeständige  
Formschalen aus  $\text{CaZrO}_3$

Tauchen

REFERENZ

Ziel 2:  
Funktionalisierung

Tauchen

Zentrifugieren

REPLICA

Sprühen

Tauchen

Zentrifugieren

ALGINAT

Gelieren

Sprühen

Funktional gradierte  $\text{CaZrO}_3$ -Formschalen

Ziel 1:  
Korrosionsbeständige  
Formschalen aus  $\text{CaZrO}_3$

Tauchen

**REFERENZ**

Ziel 2:  
Funktionalisierung

Tauchen

Zentrifugieren

**REPLICA**

Sprühen

Tauchen

Zentrifugieren

**ALGINAT**

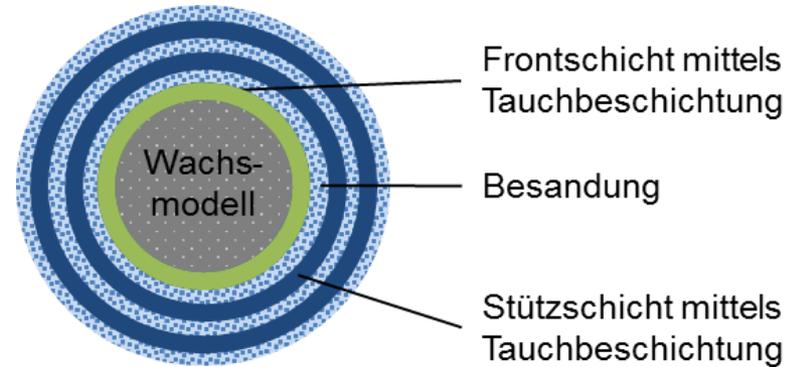
Gelieren

Sprühen

Funktional gradierte  $\text{CaZrO}_3$ -Formschalen

# Formschalenherstellung mittels Tauchbeschichtung (Referenz)

Feststoff:	S <sub>1</sub> [Ma.%]	S <sub>0,5</sub> [Ma.%]
CaZrO <sub>3</sub> Imerys 0,5 – 1 mm	25	0
CaZrO <sub>3</sub> Imerys 0 – 0,5 mm	30	59,00
CaZrO <sub>3</sub> Imerys 0 – 0,045 mm	25	12,00
CaZrO <sub>3</sub> stöchiometrisch synthetisiert < 0,063 mm	20	29,00
<b>Bezogen auf Feststoff:</b>		
Xanthan Axilat RH50MD	0,05	0,02
Guarkernmehl	0,05	0,02
Wasser	6,38	6,73
Dispergiermittel BYK LP-C 22134	2,00	2,00
Entschäumer BYK LP-C 22787	0,05	0,05
Urethanacrylat-Binder BYK LP-C 22893	4,00	4,00



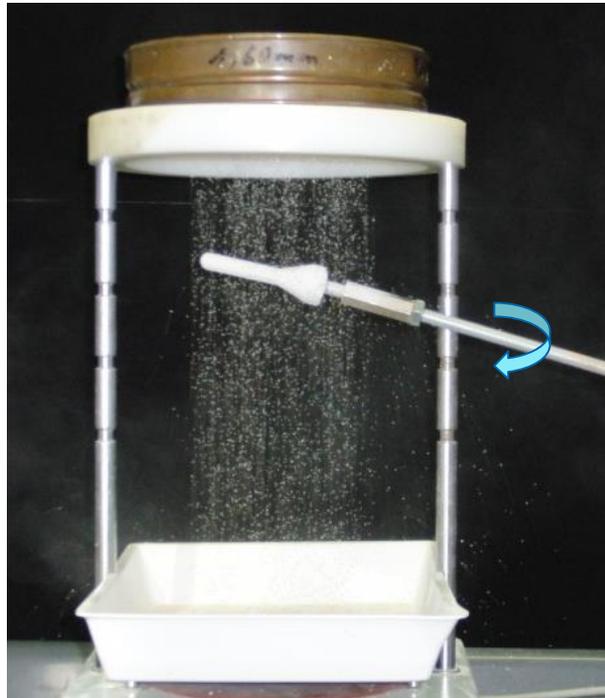
- Tauchbeschichtung und Besandung
- Trocknung: T: 30 °C, rel. Luftfeuchte: 60 %, 1. Schicht: 2 h, weitere Schichten: 5 h, letzte Schicht: 7 Tage + 7 Tage Exsikkator
- Wachsausschmelzen bei 240 °C
- Sintern bei 1500 °C

# Formschalenherstellung mittels Tauchbeschichtung (Referenz)

Tauchbeschichtung



Besandung



# Formschalenherstellung mittels Tauchbeschichtung (Referenz)

CaZrO<sub>3</sub>-Feingussform



REM-Querschnitt, Innere Oberflächen S<sub>1</sub> und S<sub>0,5</sub>



Ziel 1:  
Korrosionsbeständige  
Formschalen aus  $\text{CaZrO}_3$

Tauchen

REFERENZ

Ziel 2:  
Funktionalisierung

Tauchen

Zentrifugieren

REPLICA

Sprühen

Tauchen

Zentrifugieren

ALGINAT

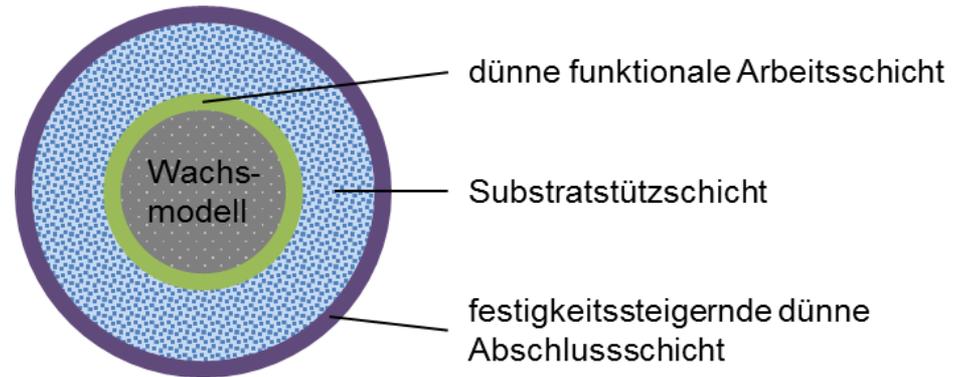
Gelieren

Sprühen

Funktional gradierte  $\text{CaZrO}_3$ -Formschalen

# Beschichtung mittels Replica-Verfahren

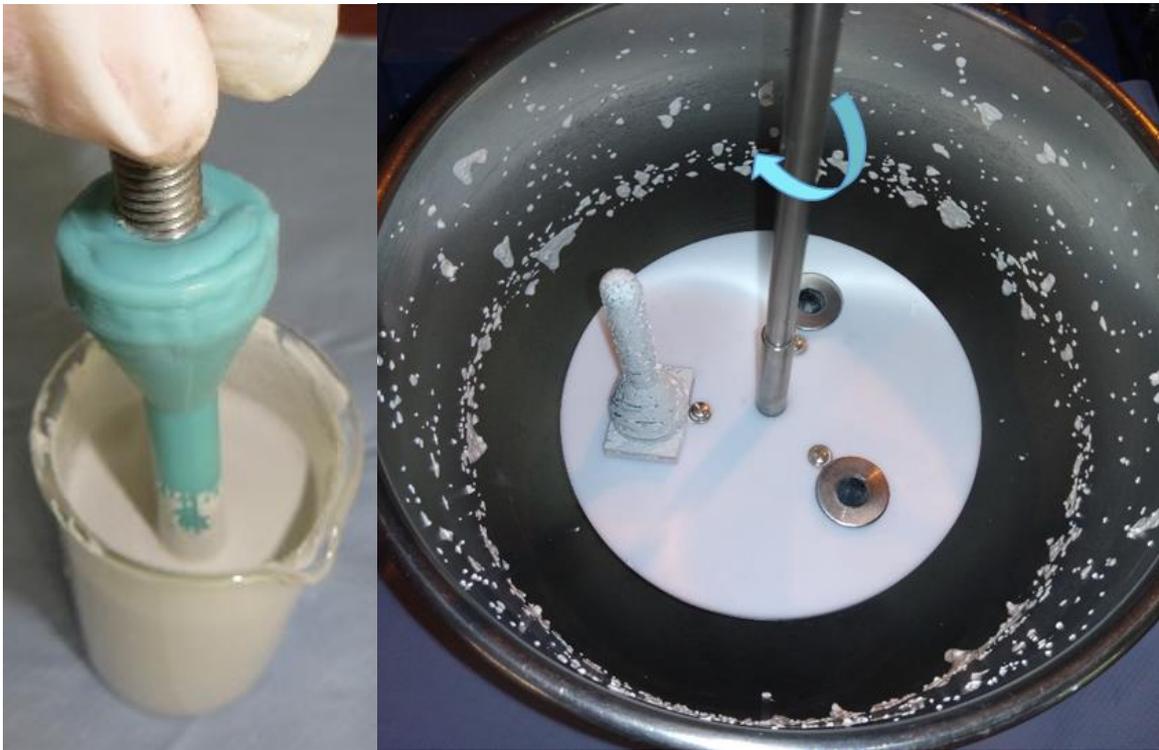
<b>Feststoff:</b>	<b>A</b> [Ma.%]	<b>B</b> [Ma.%]	<b>C</b> [Ma.%]
<b>CaZrO<sub>3</sub> Imerys</b> <b>0 – 0,045 mm</b>	70	70	70
<b>CaZrO<sub>3</sub> stöchiometrisch</b> <b>synthetisiert &lt; 0,063 mm</b>	30	30	30
<b>Bezogen auf Feststoff:</b>			
<b>Xanthan Axilat RH50MD</b>	0,05	0,1	0,1
<b>Wasser</b>	14	15	15
<b>Dispergiermittel</b> BYK LP-C 22134	2,00	2,00	2,00
<b>Entschäumer</b> BYK LP-C 22787	0,05	0,05	0,05
<b>Urethanacrylat-Binder</b> BYK LP-C 22893	4,00	4,00	0
<b>Polyacrylat-Binder</b> BYK LP-C 22346	0	0	4,00



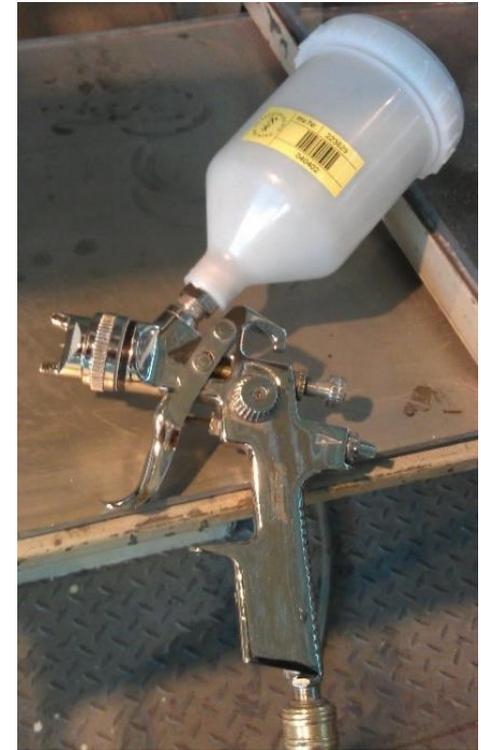
- Neuartige Beschichtungstechnologien: Sprühen und Zentrifugieren, Tauchbeschichtung als Referenz
- Max. Partikelgröße: 63 µm
- Ziel: Strukturviskose Schlicker, verbesserte Beschichtungsqualität (Adhäsion, Kohäsion, Homogenität, geringe Schichtdicke)

## Beschichtung mittels Replica-Verfahren

Tauchen und Zentrifugieren

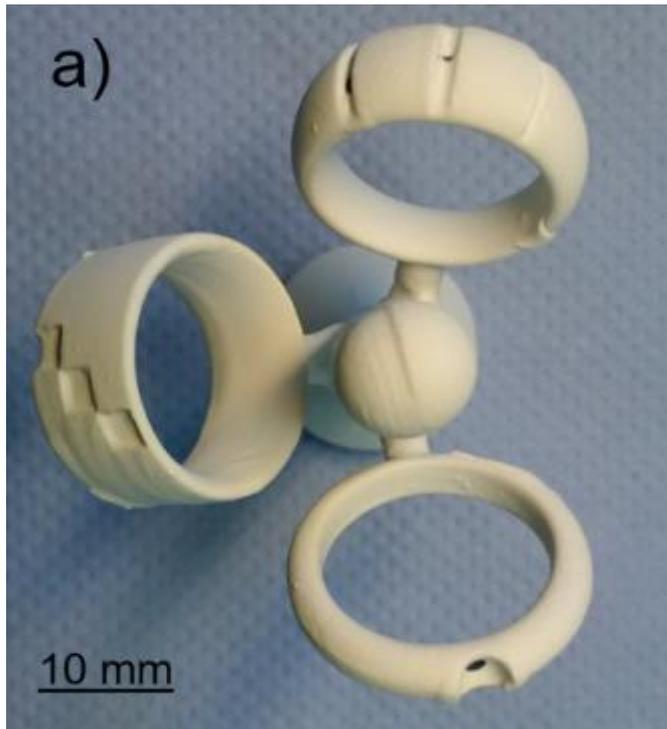


Sprühen



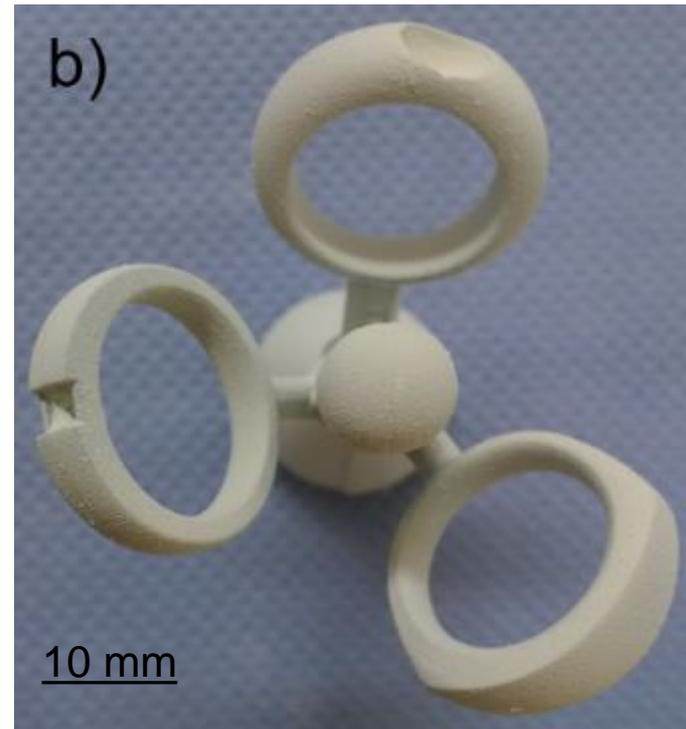
## Beschichtung mittels Replica-Verfahren

**Zentrifugieren** (Schlicker B)



- dichte, kohäsive, stabile Schicht
- Details unzureichend abgebildet

**Sprühen** (Schlicker B)

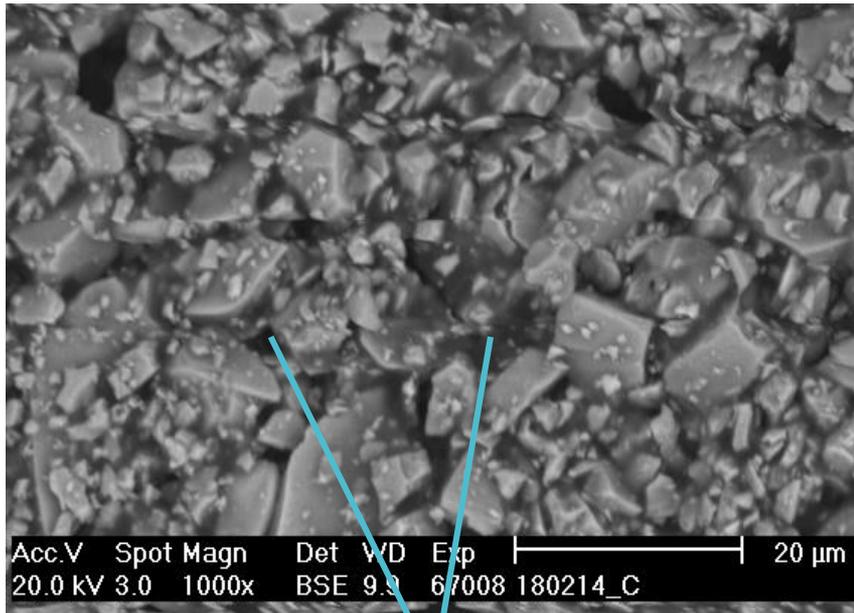


- geringere kohäsive Bindung
- bessere Abbildungsgüte für komplexe Geometrien

## Beschichtung mittels Replica-Verfahren

### Zentrifugierte Schicht (Schlicker B)

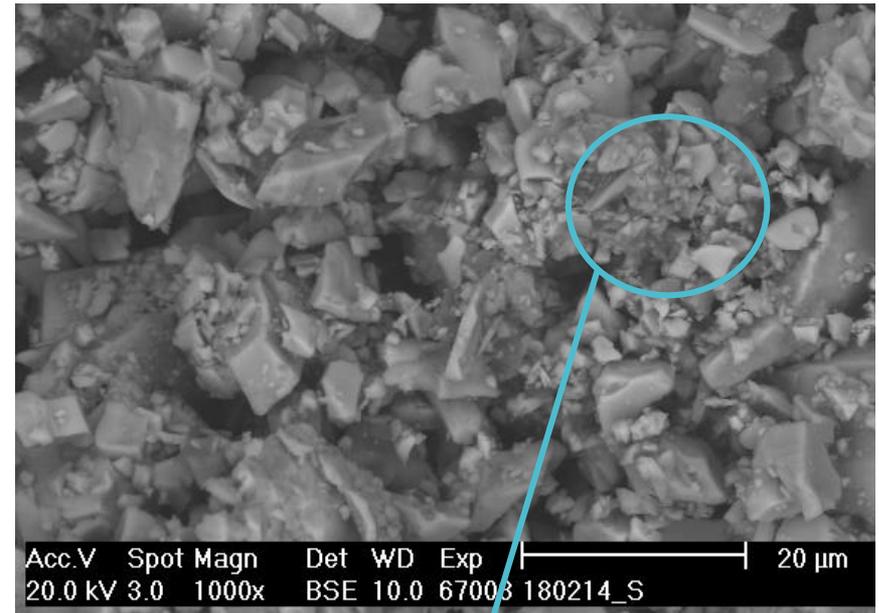
→ dichte, kohäsive Schicht



Binder

### Gesprühte Schicht (Schlicker B)

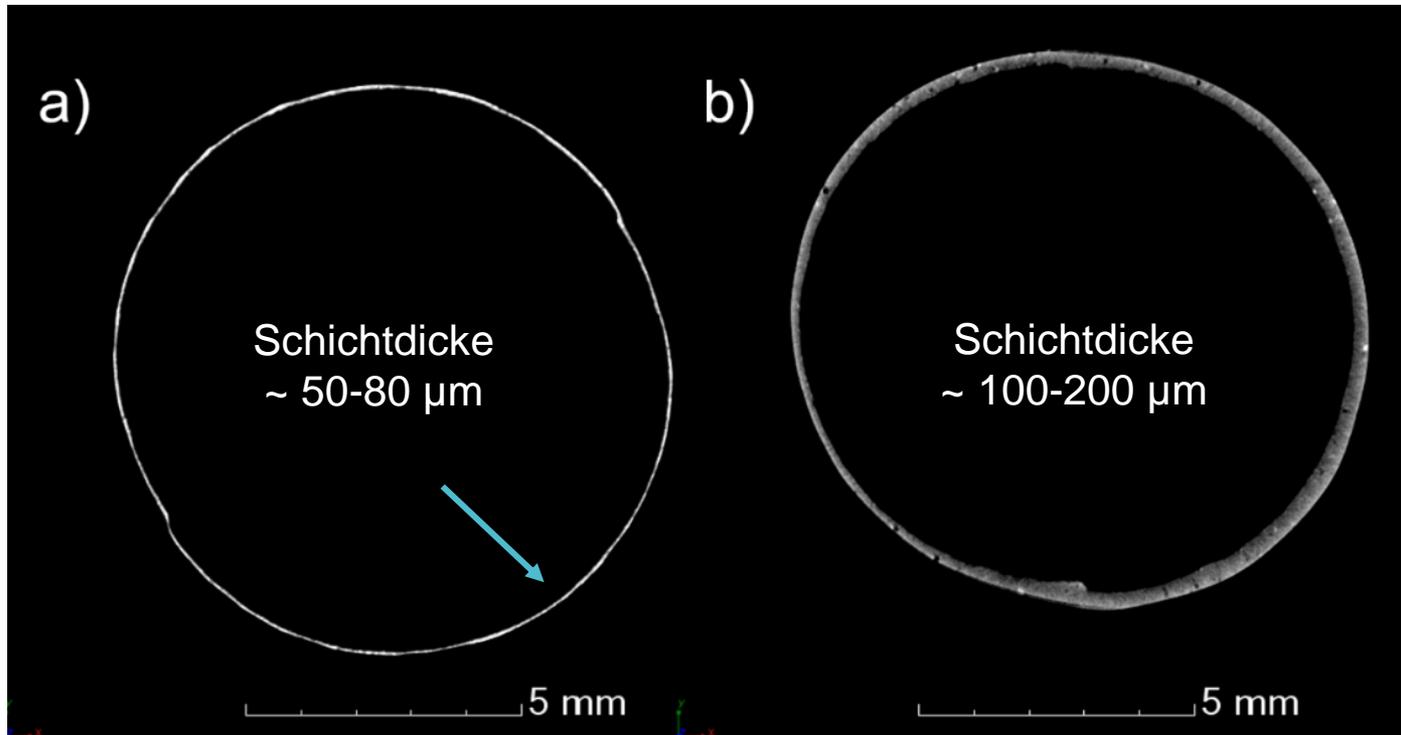
→ lockere Struktur



Agglomerate sehr  
feiner Partikel

## Beschichtung mittels Replica-Verfahren

2D CT-Querschnittsaufnahmen **zentrifugierter Schichten** (Schlicker B)



a) 1 Beschichtungsschritt

b) 2 Beschichtungsschritte

Ziel 1:  
Korrosionsbeständige  
Formschalen aus  $\text{CaZrO}_3$

Tauchen

REFERENZ

Ziel 2:  
Funktionalisierung

Tauchen

Zentrifugieren

REPLICA

Sprühen

Tauchen

Zentrifugieren

**ALGINAT**

Gelieren

Sprühen

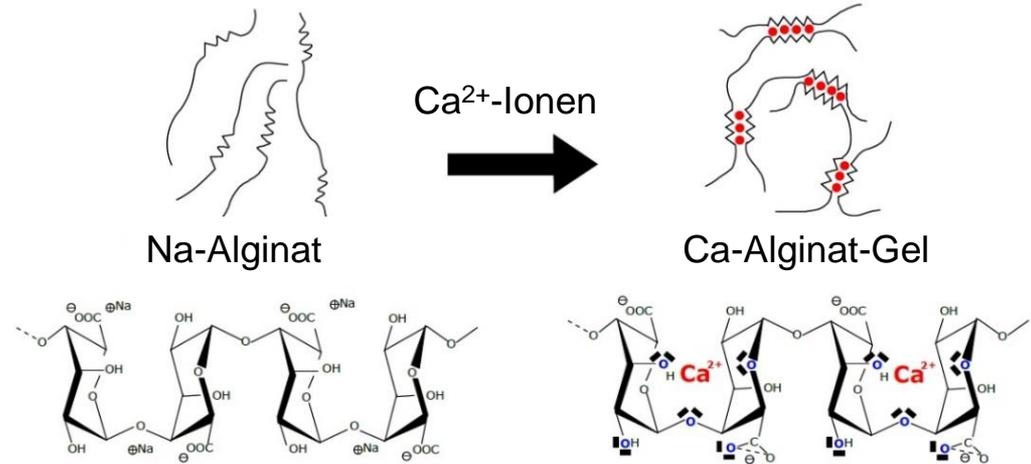
Funktional gradierte  $\text{CaZrO}_3$ -Formschalen

# Beschichtung mittels Alginat-Verfahren

**Sprühen und Zentrifugieren**  
analog zum Replica-Verfahren

**Alginatgelierung**  
Tauchen in  $\text{CaCl}_2$ -Lösung (1 %) für 2 s  
nach Beschichtung

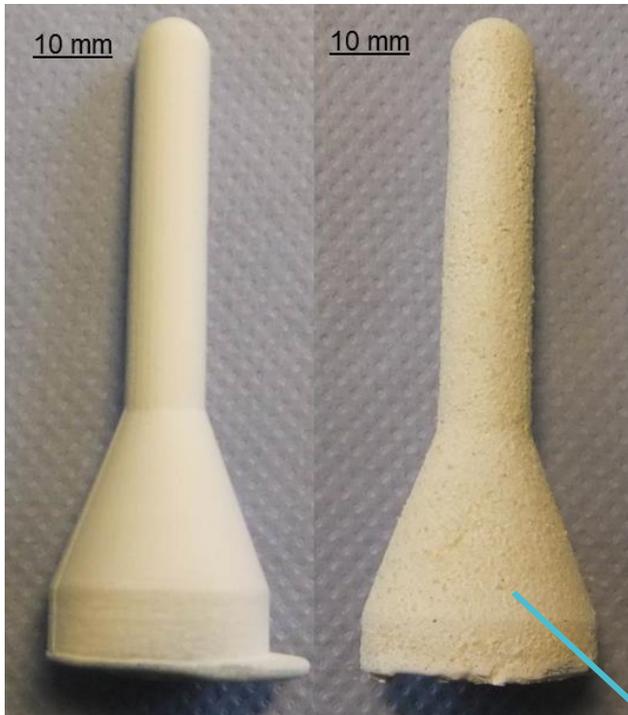
Feststoff:	A [Ma.%]	B [Ma.%]	C [Ma.%]
<b>CaZrO<sub>3</sub> Imerys 0 – 0,045 mm</b>	70	70	70
<b>CaZrO<sub>3</sub> stöchiometrisch synthetisiert &lt; 0,063 mm</b>	30	30	30
<b>Bezogen auf Feststoff:</b>			
<b>Natriumalginat</b>	0,1	0,3	0,3
<b>Wasser</b>	15	15	20
<b>Dispergiermittel BYK LP-C 22134</b>	2,00	2,00	2,00
<b>Entschäumer BYK LP-C 22787</b>	0,05	0,05	0,05
<b>Urethanacrylat-Binder BYK LP-C 22893</b>	4,00	4,00	4,00



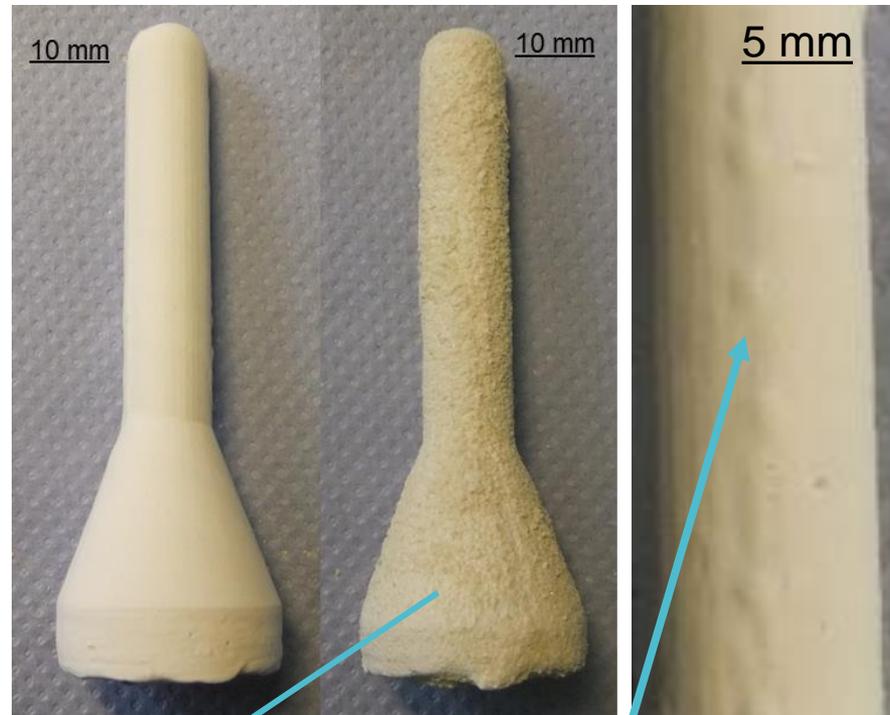
Bildquelle: nach Oppelt, M.: Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2018.

## Beschichtung mittels Alginat-Verfahren

**Gesprühte Schicht** mit (Schlicker C)  
→ sehr gute Oberflächenqualität



**Zentrifugierte Schicht** (Schlicker C)  
→ Materialanhäufung



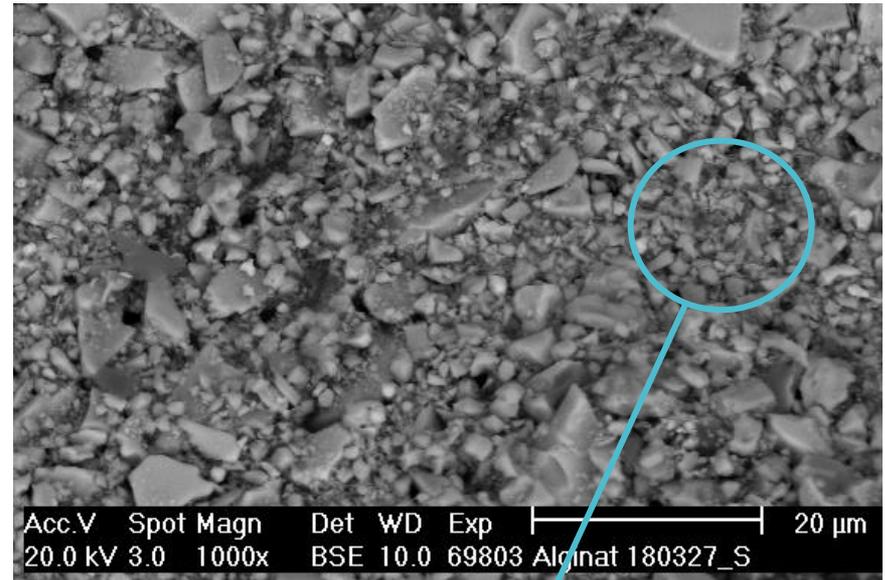
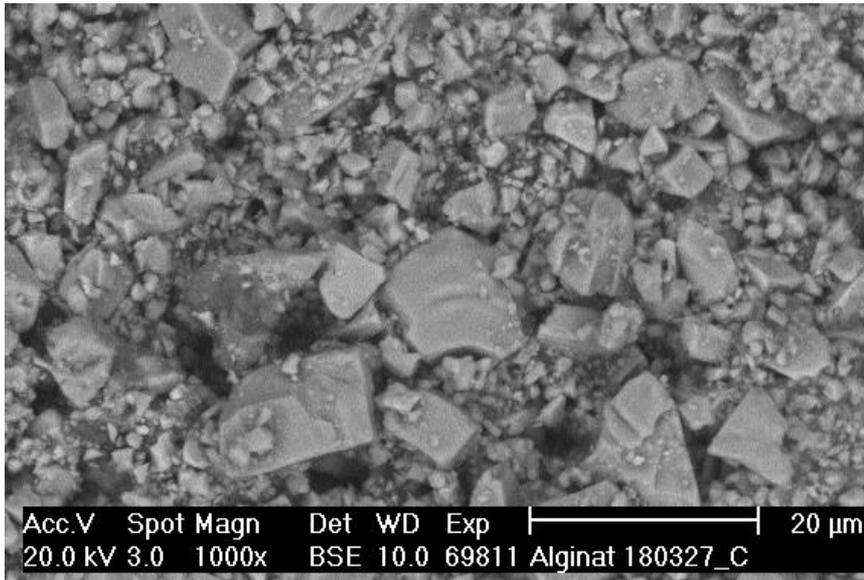
Besandungskörnung

Materialanhäufung

## Beschichtung mittels Alginat-Verfahren

**Zentrifugierte Schicht (Schlicker C)**

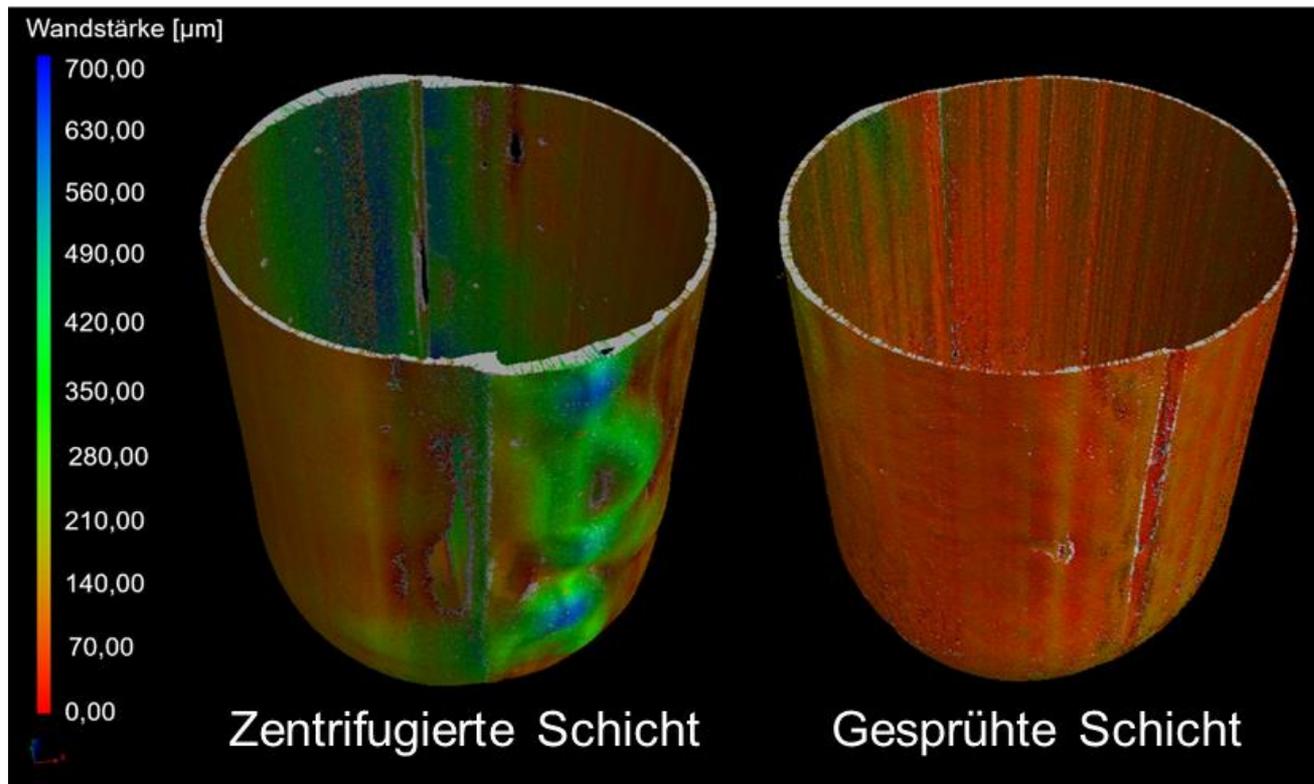
**Gesprühte Schicht (Schlicker C)**  
→ hoher Feinkornanteil



Feinkornmatrix, dichteres Gefüge als  
Replica-Schichten ohne Gelierung

## Beschichtung mittels Alginat-Verfahren

3D CT-Aufnahmen zentrifugierter und gesprühter Schichten (Schlicker C)



- homogener Bereich: ca. 100-200  $\mu\text{m}$
- Materialanhäufung: ca. 250-400  $\mu\text{m}$
- Schichtdicke ca. 50-150  $\mu\text{m}$

## Vergleich der neuartigen Beschichtungsverfahren

	Replica (B)		Alginate (C)	
	Sprühen	Zentrifugieren	Sprühen	Zentrifugieren
Schichtdicke [mm]	0,04 ± 0,02	0,08 ± 0,03	0,10 ± 0,04	0,17 ± 0,05
Masse [g]	0,33 ± 0,10	0,82 ± 0,07	0,63 ± 0,07	1,58 ± 0,25
Adhäsion	--	++	+	-
Kohäsion	-	++	++	++
Homogenität	+	++	+	--
<b>Komplexe Geometrien</b>	++	-	++	--
<b>Besandung</b>	Nicht möglich, zu trocken		<b>möglich</b>	

- Replica-Schlicker geeigneter für Zentrifugieren, Alginate-Schlicker für Sprühen
- Für komplexe Geometrien ist Sprühen zielführender

Ziel 1:  
Korrosionsbeständige  
Formschalen aus  $\text{CaZrO}_3$

Tauchen

REFERENZ

Ziel 2 :  
Funktionalisierung

Tauchen

Zentrifugieren

REPLICA

Sprühen

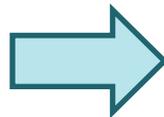
Tauchen

Zentrifugieren

**ALGINAT**

**Gelieren**

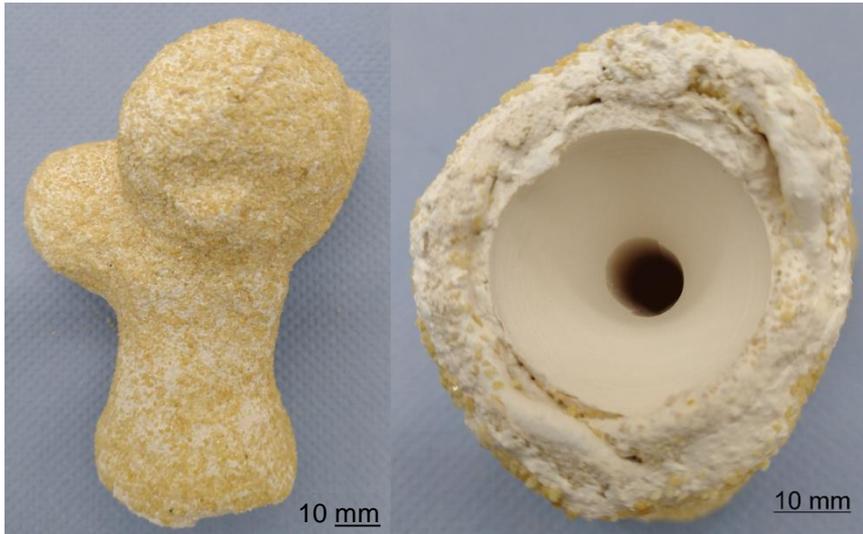
**Sprühen**



**Funktional gradierte  $\text{CaZrO}_3$ -Formschalen**

## Funktional gradierte Feingussformen

### Frontschicht Alginat-Sprüschlicker und funktional gradierter Schichtaufbau, 1200 °C



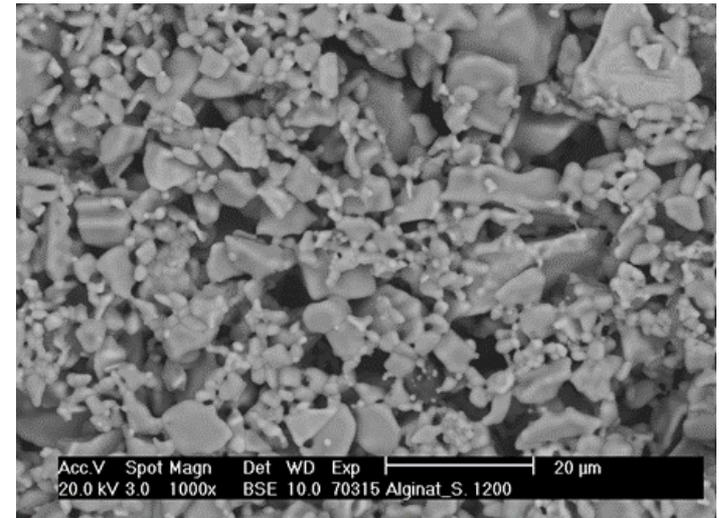
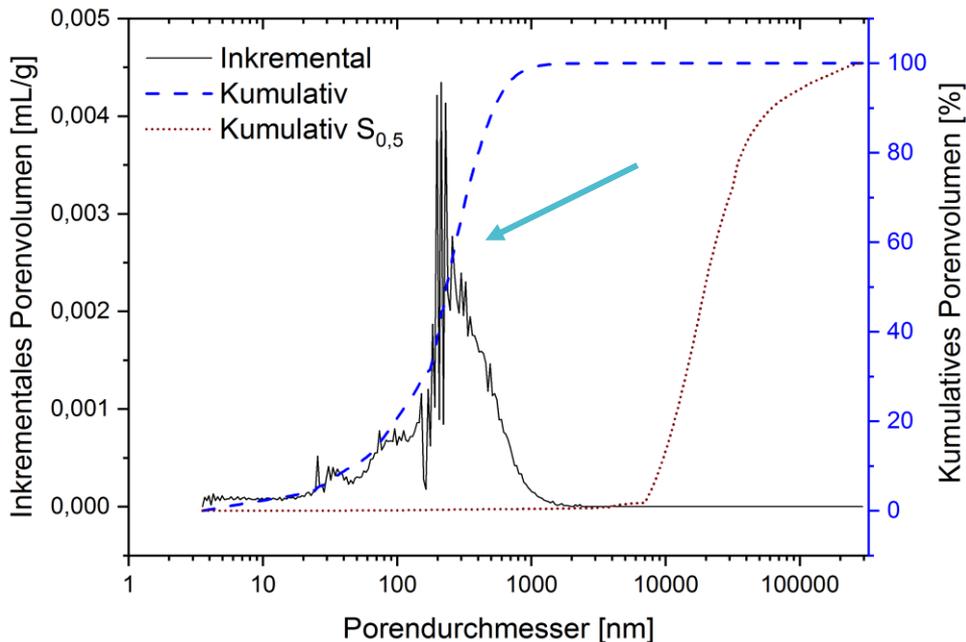
- Frontschicht Alginat-Sprüschlicker
- Zwischenschicht Tauchbeschichtung Replica-Schlicker + 1 mm Besandungskörnung
- Stützsichten abwechselnd Tauchschlicker  $S_{0,5}/S_1$
- Sintertemperatur 1200°C

- Rissfreie Formschale sowohl beim Wachausschmelzen als auch Sintern

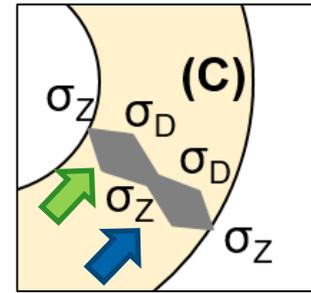
## Funktional gradierte Feingussformen

	<b>S<sub>1</sub> (1500 °C)</b>	<b>S<sub>0.5</sub> (1500 °C)</b>	<b>Alginat* (1200 °C)</b>
Offene Porosität [%]	23,7 ± 0,4	29,7 ± 0,0	27,7 ± 0,6
Porendurchmesser d <sub>50</sub> [µm]	16,0	19,7	4,2

\*Front- u. letzte Schicht alginatbasiert, gradierter Schichtaufbau

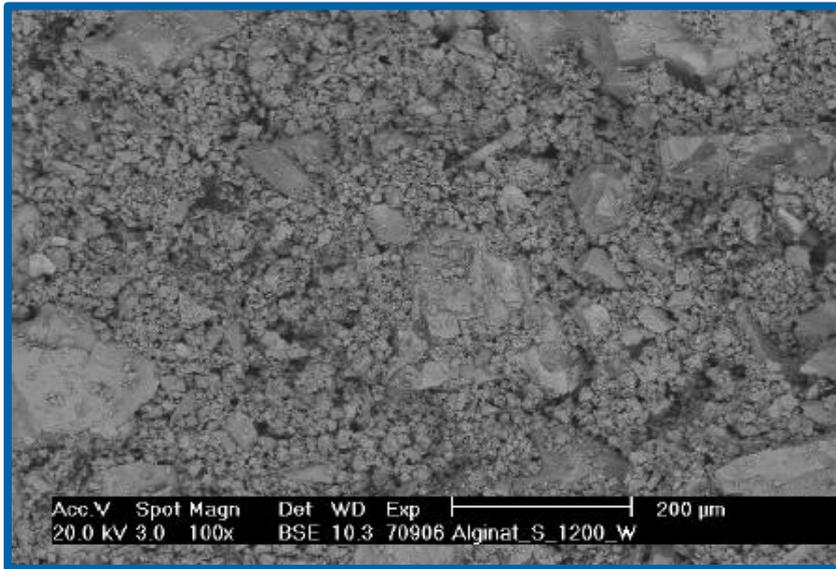


# Funktional gradierte Feingussformen



## Feingussform, 1 mm Zwischenschicht, wechselnder Schichtaufbau

Stützschiebtbereich



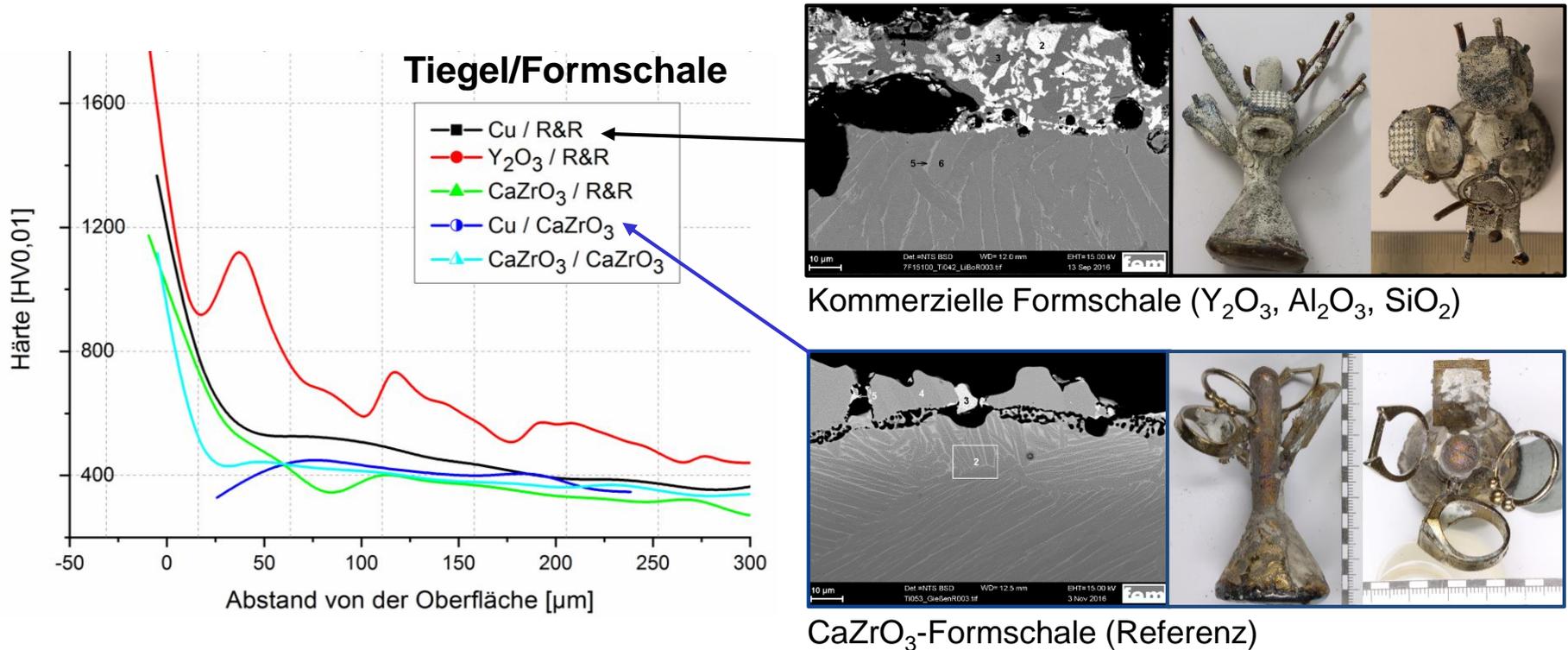
➤ **homogen verteiltes Grobkorn** in der Feinkornmatrix

Frontschichtbereich



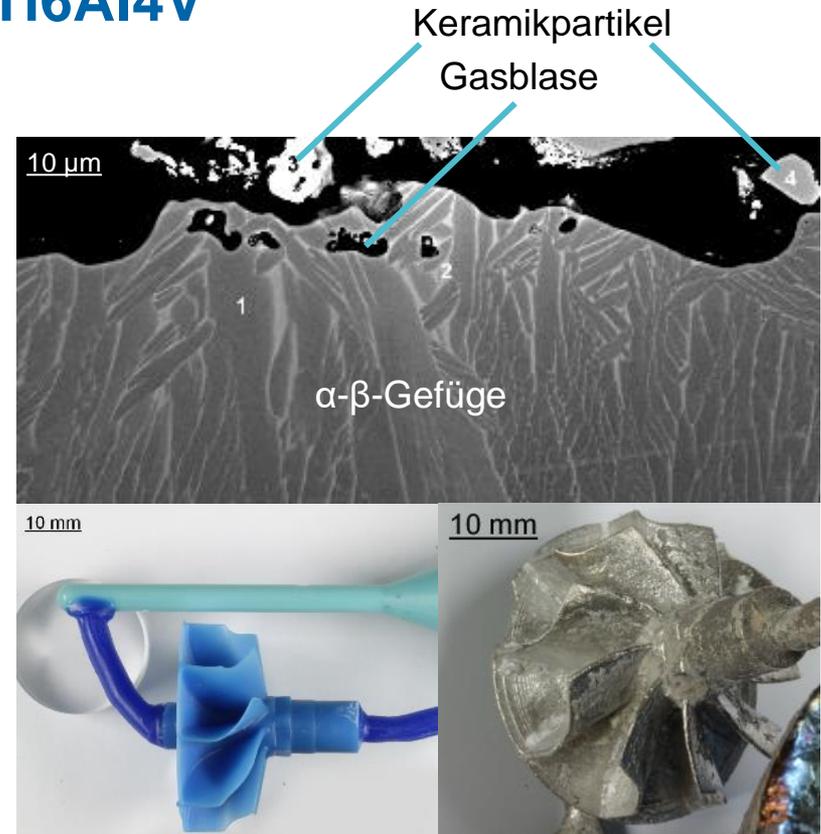
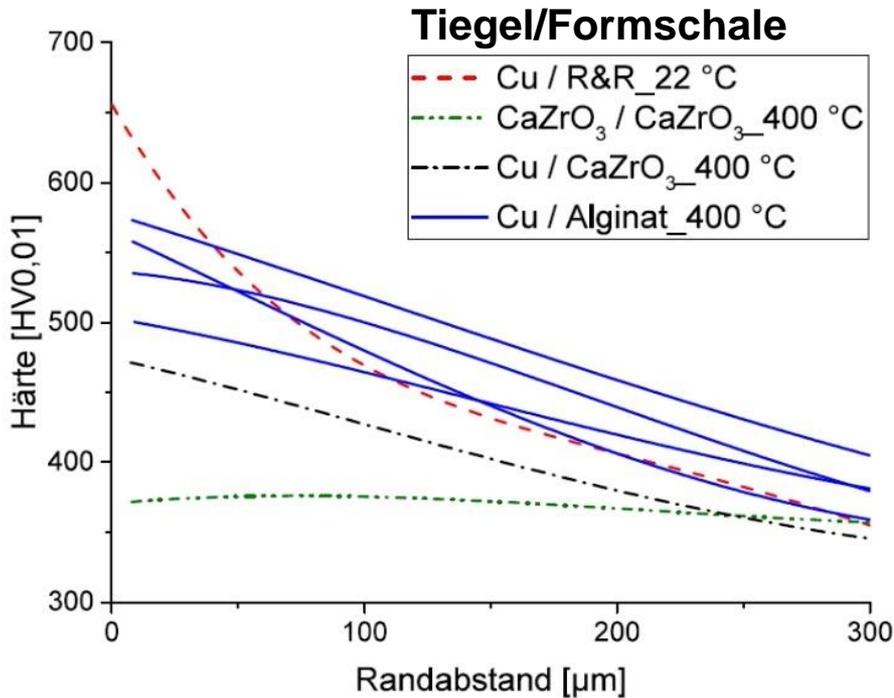
➤ Verbindung von Front- und **Zwischenschicht** mit Stützschiebt über **Brückenbildung**

## Feinguss mit Titanlegierung Ti6Al4V (Referenz)



**Keine harte/spröde α-case-Schicht mit CaZrO<sub>3</sub>-Feingussform**

## Feinguss mit Titanlegierung Ti6Al4V



- Aufhärtung stärker als bei Referenz-CaZrO<sub>3</sub>-Formschalen, geringer als bei kommerziellen R&R-Formschalen (keine  $\alpha$ -case-Schicht)
- Komplexe Gussteile, z.B. Turbinenrad, wurden endkonturnah abgebildet

### Zusammenfassung

- **SiO<sub>2</sub>-freie CaZrO<sub>3</sub>-Formschalen**
- Neue Beschichtungstechnologien für CaZrO<sub>3</sub>-basierte Schlicker:  
**Zentrifugieren und Sprühen** mittels **Replica- und Alginat-Verfahren**
- Identifizierung geeigneter Beschichtungsparameter und angepasster  
**Mehrschicht-Struktur** für **funktional gradierte CaZrO<sub>3</sub>-Formschalen**
- Hohe **Korrosionsbeständigkeit in Kontakt mit Ti6Al4V**;  
keine  $\alpha$ -case-Bildung auf der Gussteiloberfläche
- **Ausblick:** weitere Funktionalisierung z.B. Fasern, Recycling, Überführung in industrielle Anwendung

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand

Diese Arbeit wurde finanziell gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über das IGF-Programm.



Institut für Keramik,  
Feuerfest und  
Verbundwerkstoffe



forschungsinstitut  
edelmetalle +  
metallchemie



**IMERYS**  
*Fused Minerals*

  
**INDUTHERM**  
Erwärmungsanlagen GmbH



**PORZELLANFABRIK  
HERMSDORF GMBH**  
- TECHNISCHE KERAMIK -



**NRU**<sup>®</sup>

Expect the best. **REFRA**TECHNIK



**FGF**  
Forschungs-  
Gemeinschaft  
Feuerfest e.V.



**KESSEL**  
KUNST&FEINGUSS



**HAGENBURGER**  
Feuerfeste Produkte GmbH

**LE MARCHANT**



TITANFACTORY



**Nonnenmacher**  
MICROBUS WERZUGBAU

Vielen Dank an die beteiligten Industriepartner für die Unterstützung im laufenden Projekt AiF IGF 21706BG.