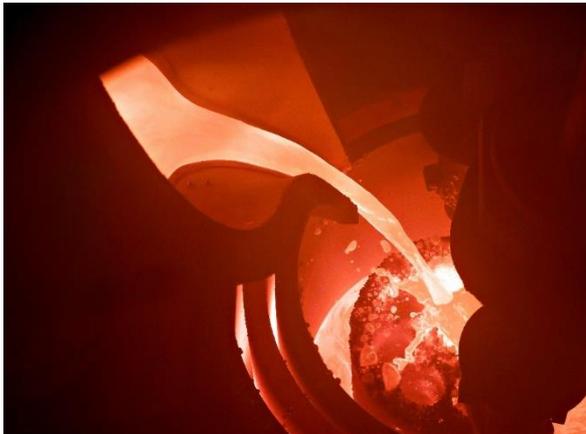


# Keramik, Feuerfest und metalkeramische Verbundwerkstoffe: Ansätze für Nachhaltigkeit und strategische Souveränität



**Institute of Ceramics, Refractories and Composite Materials**  
**Zentrum für effiziente Hochtemperatur Stoffwandlung**

Professorship of Ceramics, Refractories and metal-ceramic Composites | Agricolastrasse 17 | 09599 Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. habil. Christos G. Aneziris | [aneziris@ikfww.tu-freiberg.de](mailto:aneziris@ikfww.tu-freiberg.de)  
Phone: 0049 (0) 37 31 / 39-2505 | Fax: 0049 (0) 37 31 / 39-2419 | [www.ikfww.de](http://www.ikfww.de)

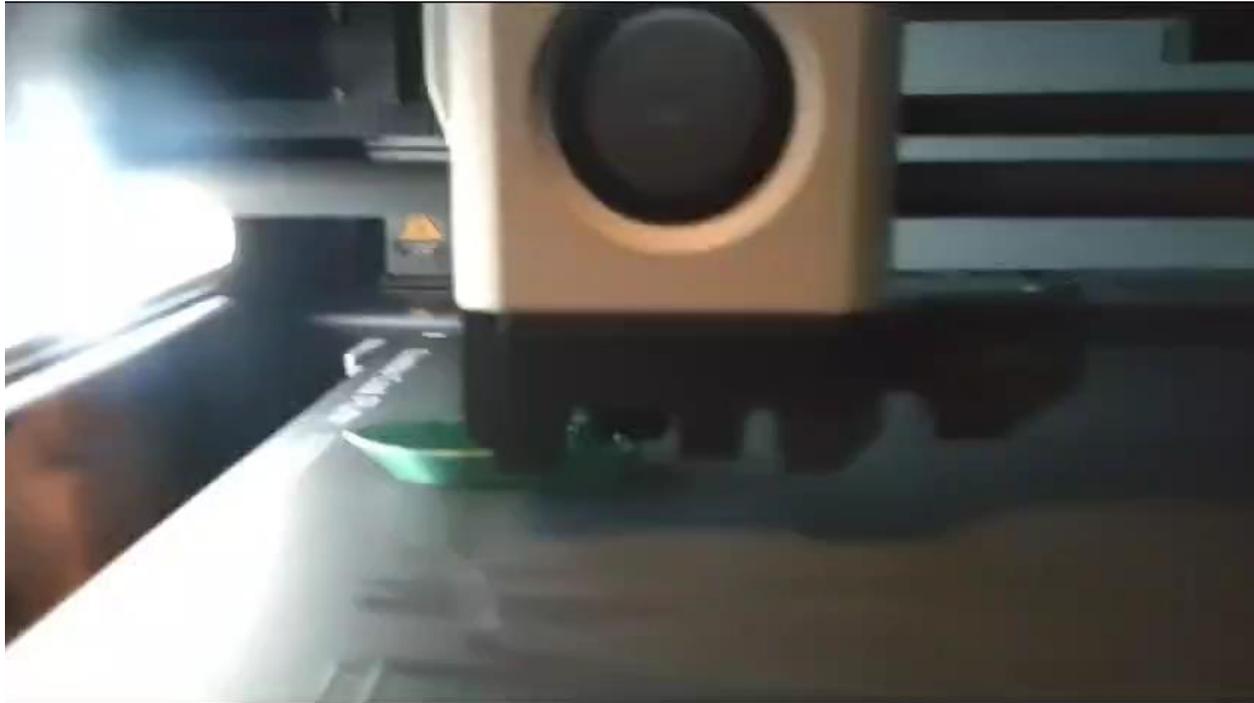
# Keramik, Feuerfest und metallokeramische Verbundwerkstoffe: Ansätze für Nachhaltigkeit und strategische Souveränität

Knappe Ressourcen und die Notwendigkeit zur Senkung des Energiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen fordern die Feuerfestforschung heraus

- a) deutlich **leistungsfähigere** und dennoch **material- und energieeffiziente** Werkstoffe zu entwickeln,
- b) die Kombination von umweltfreundlicheren Brenntechnologien u.a. **Hybrid-Elektrifizierungsansätze** mit der Nutzung von Mikrowellen, elektrischen Heizern, Plasmabrennern anzuwenden,
- c) neuartige Herstellungsverfahren und Geometrien, die zu einer **Art-Leichtbauweise** beitragen zu erforschen und
- d) insbesondere **Recycling-Konzepte** effizient einzusetzen.

# Eine Werkstoffreise für klimaschonende Beiträge in Hochtemperaturprozessen

Recycling



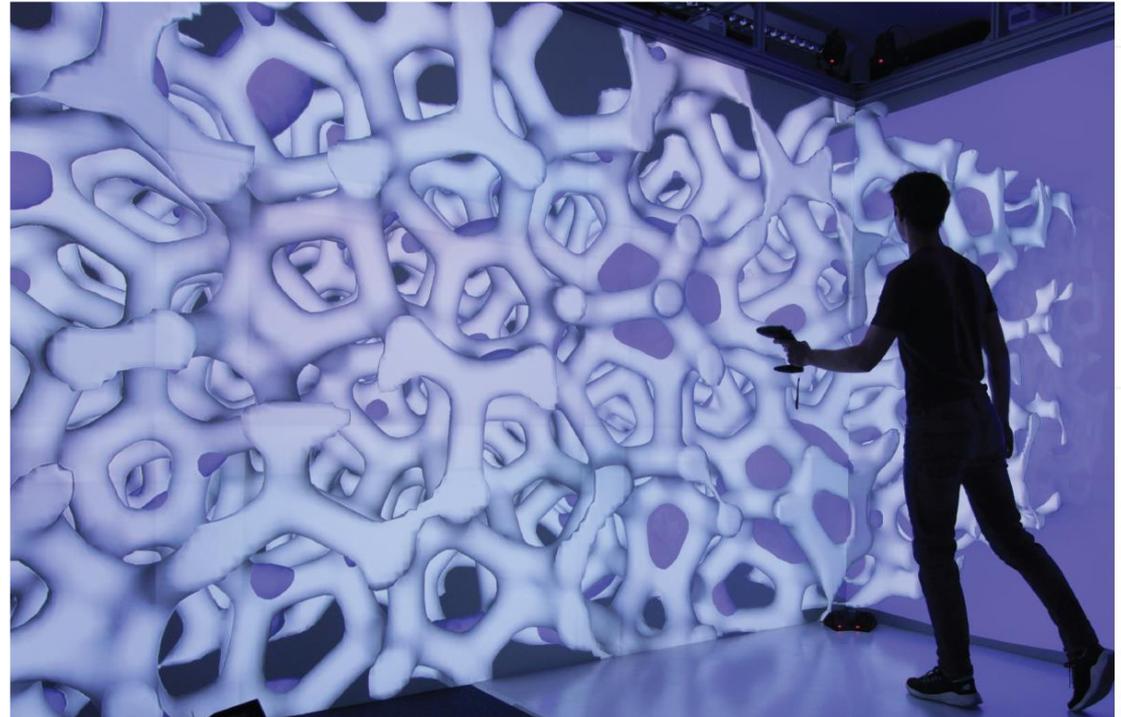
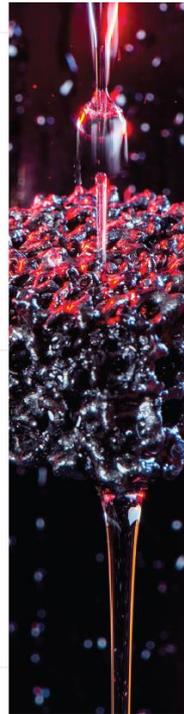
Elektrifizierung

"Wenn Du ein Schiff bauen willst, so trommle nicht Menschen zusammen, um Holz zu beschaffen, Werkzeuge vorzubereiten, Aufgaben zu vergeben und die Arbeit einzuteilen, sondern **lehre die Menschen die Sehnsucht nach dem weiten endlosen Meer**"

Saint-Exupéry

## „umweltfreundlich, nachhaltig, effizient“

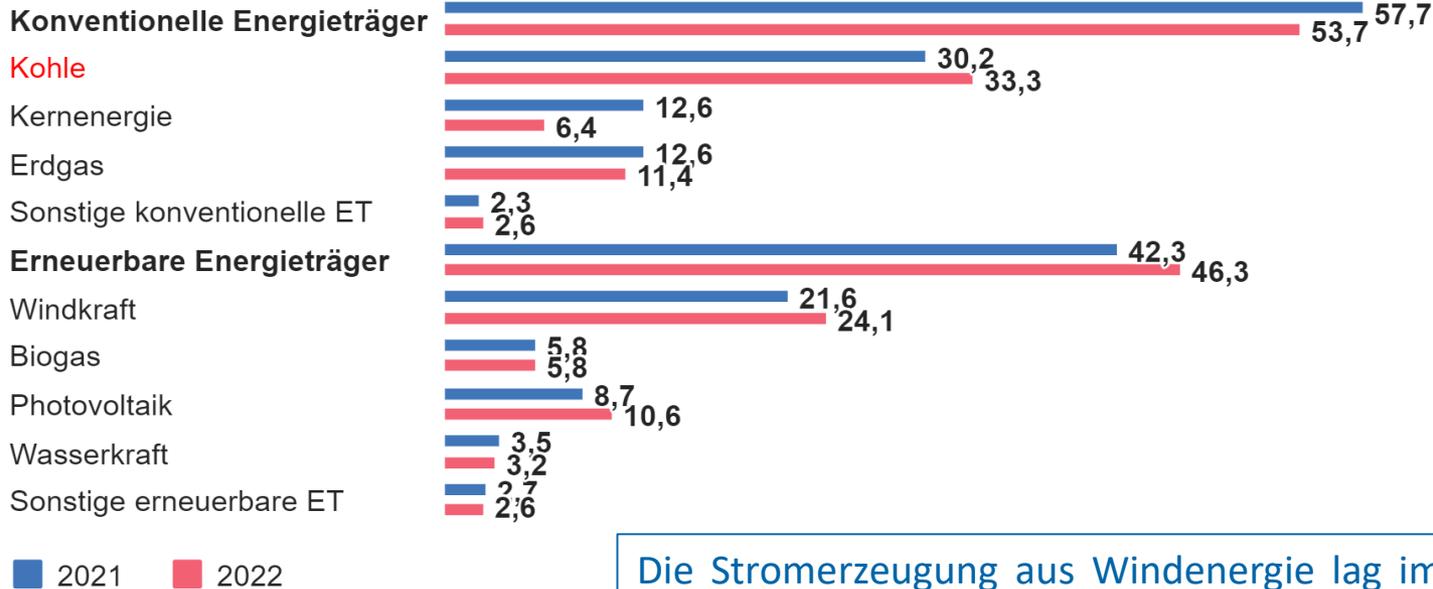
*Alles  
fließt...*



*Kein Labyrinth...sondern mehrere Wege  
nach Ithaka*

## Stromeinspeisung durch konventionelle und erneuerbare Energieträger

in %



Die Stromerzeugung aus Windenergie lag im Jahr 2023 mit knapp 138 TWh (davon ca. 114 TWh aus Windenergieanlagen an Land und ca. 24 TWh aus Windenergieanlagen auf See) 10 Prozent höher als im windärmeren Vorjahr.

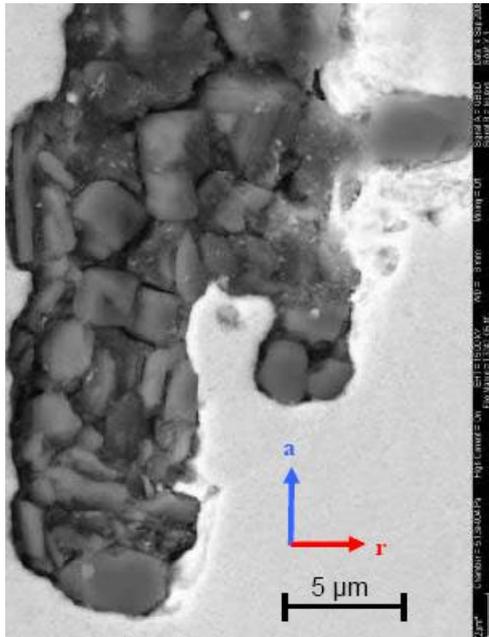
## Gondelgewicht 150 t, 450 t , 700 t ...



## Höchste Belastungen, höchste Materialanforderungen

*Allerdings können kleine Partikel einen Zug stoppen  
...oder zur Zerstörung der Gondel führen!*

## Schadensanalyse Radsatzwelle ICE-3



Bruchstelle

Radscheibe

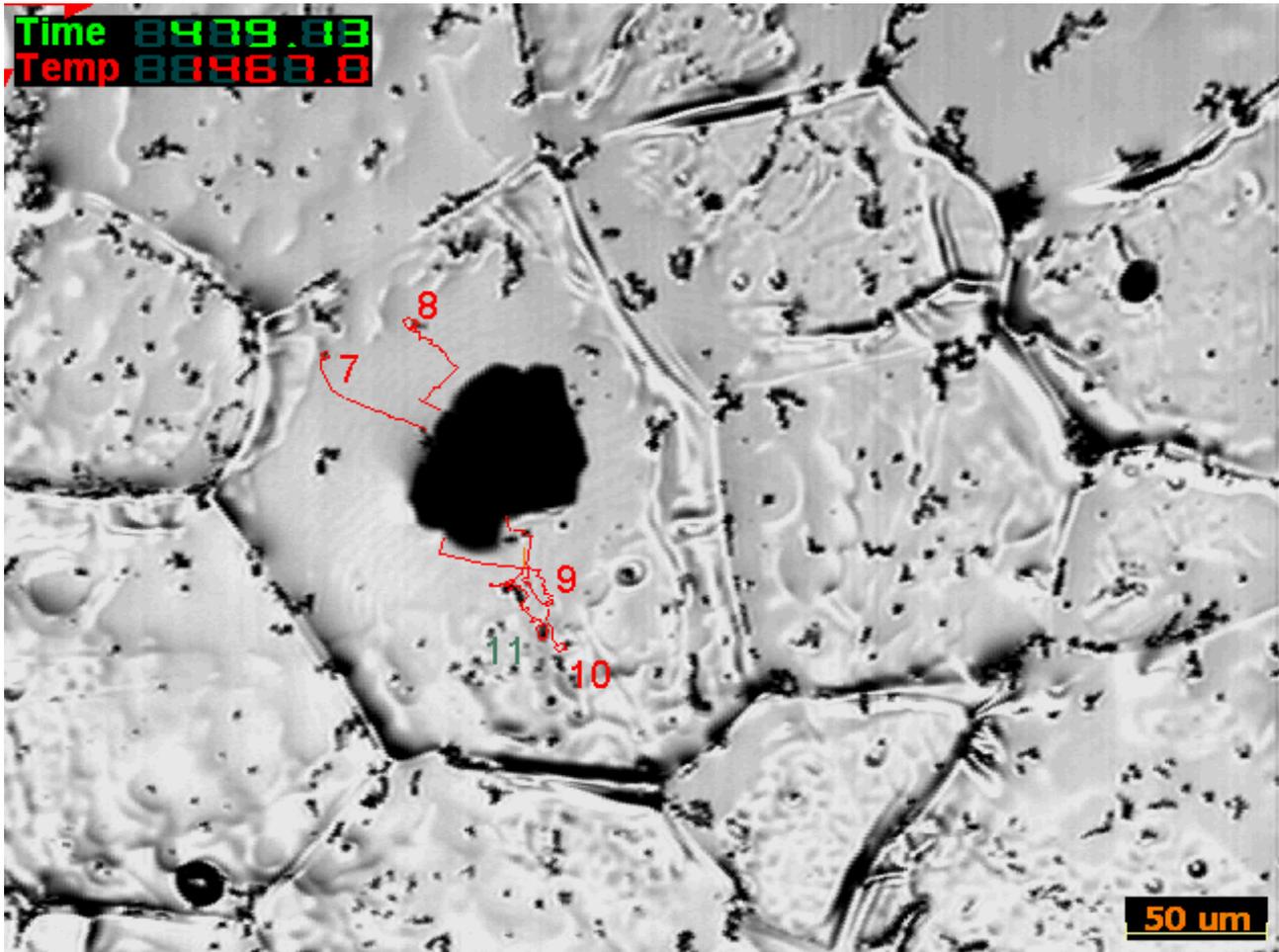


## Typische Reinheitsgrade von Stahlqualitäten in Stahlprodukten

Stahlprodukt	Maximal zulässige Einschlussgröße
Autoblech	100 µm
Dosen	20 µm
Stahlrohre	100 µm
Kugeln für Kugellager	15 µm
Dünnbramme	Einzel-Einschluss 13 µm Cluster 200 µm
Draht	20 µm

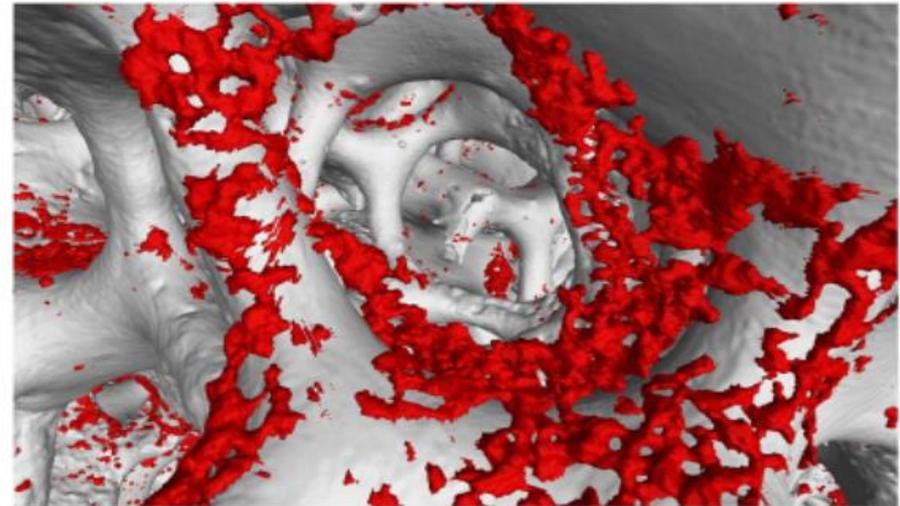
Zhang et al., *Ironmaking Steelmaking*, 2003

# Einschlüsse in der Stahlschmelze



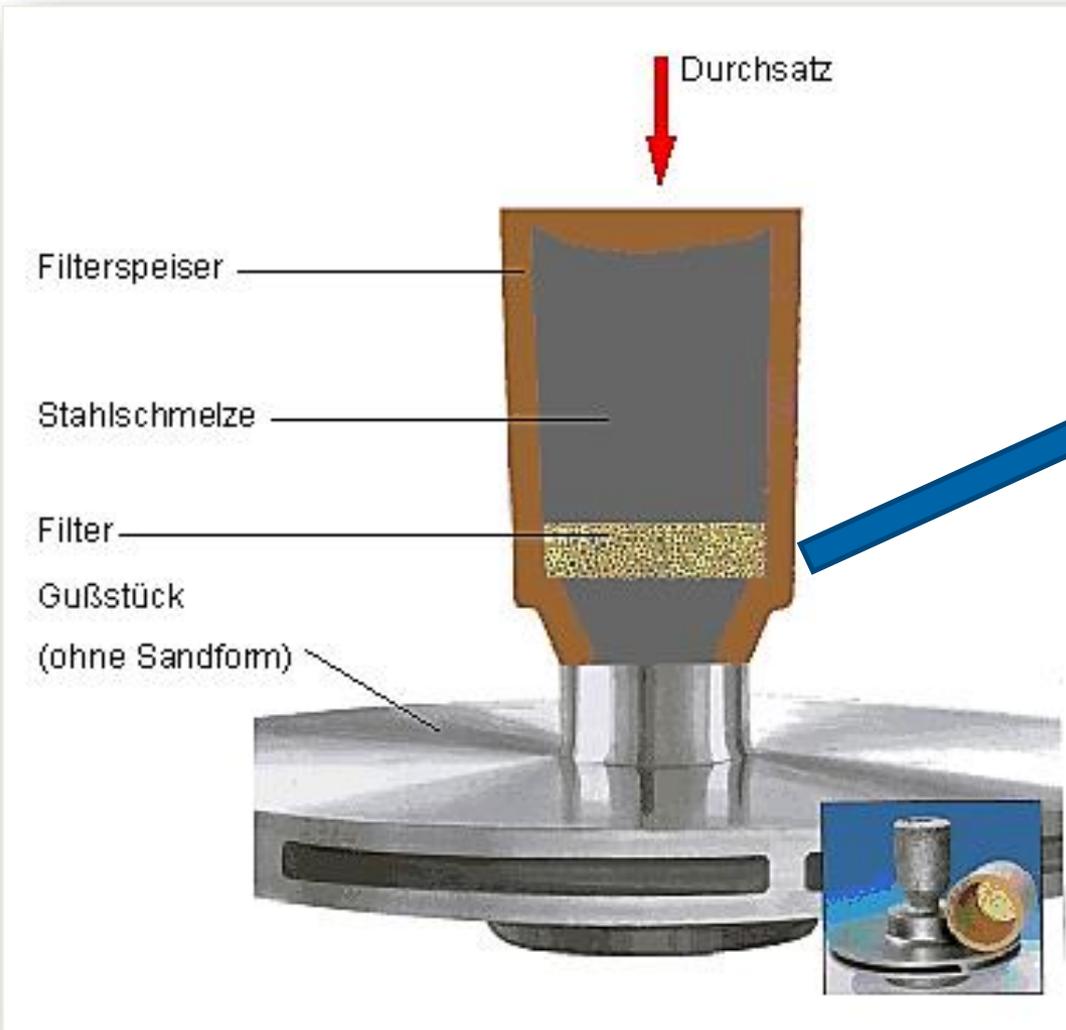
# Keramischer Filterkosmos

## Recycling von Metallen und mehr



# Keramischer Filterkosmos

## Recycling von Metallen (Stahl, Aluminium, Si, Cu etc.) und mehr

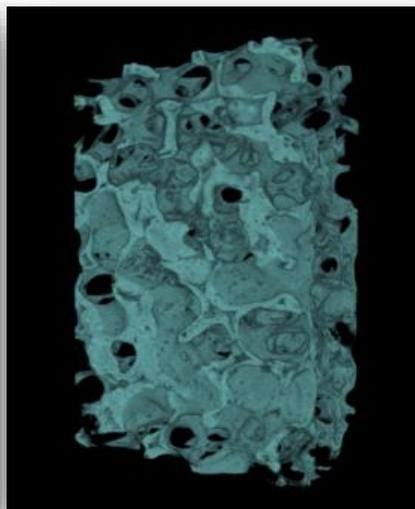
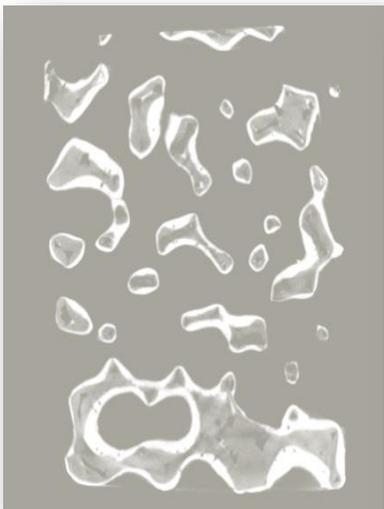


# Replika Technologie:



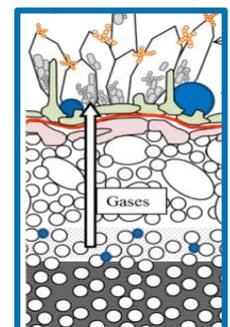
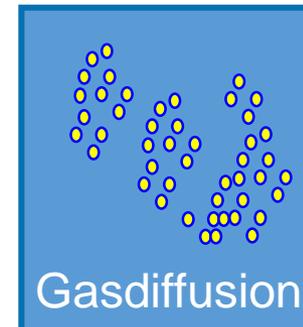
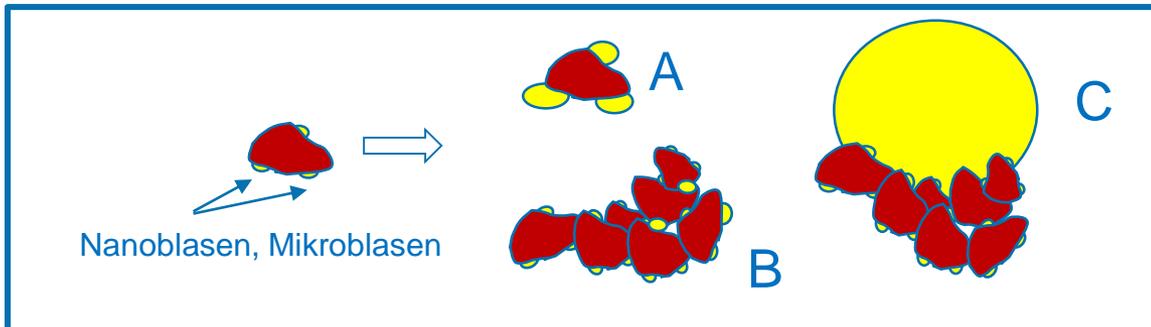
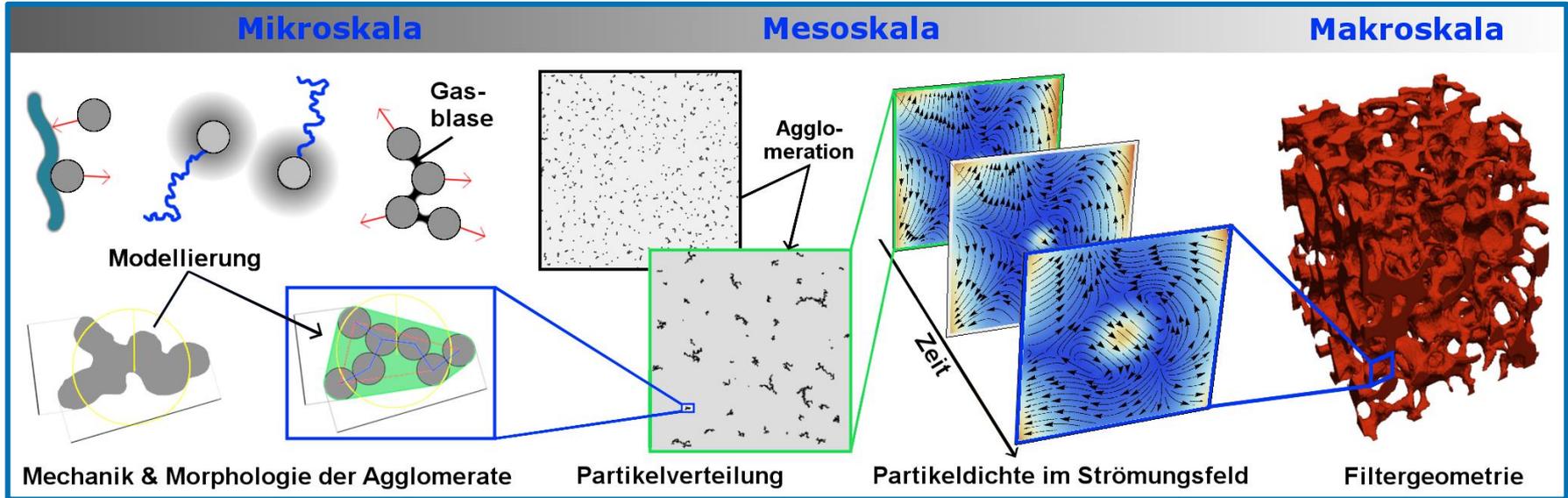
**Kunststofffilter in einen  
keramischen Schlicker bei  
Raumtemperatur imprägnieren**

**Getrockneten, vorbeschichteten  
Kunststofffilter mit keramischem  
Schlicker besprühen**

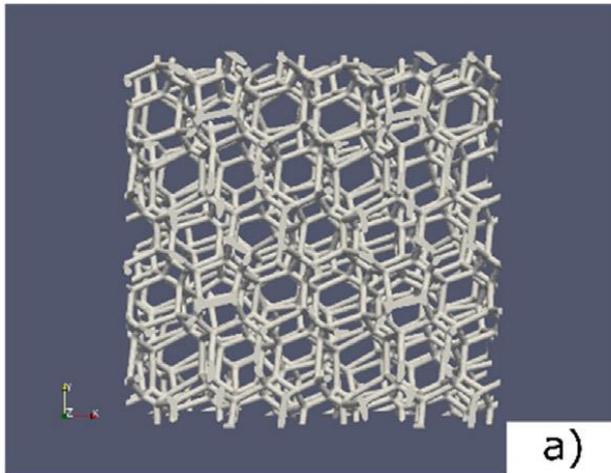


Jung, Institute of Informatics, Freiberg, CAVE

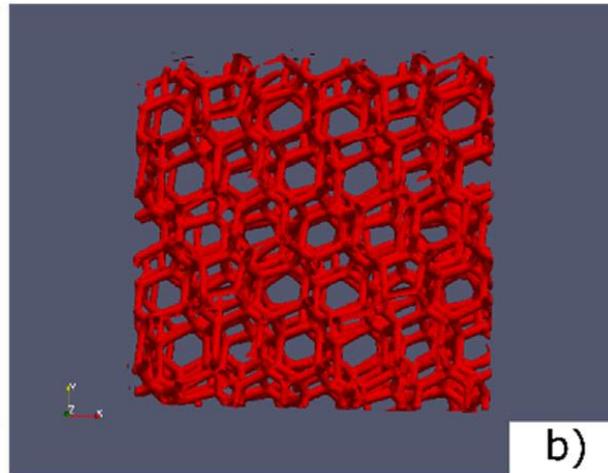
# Modellunterstützte Filtermechanismen für das modellunterstützte Filter-Systemdesign



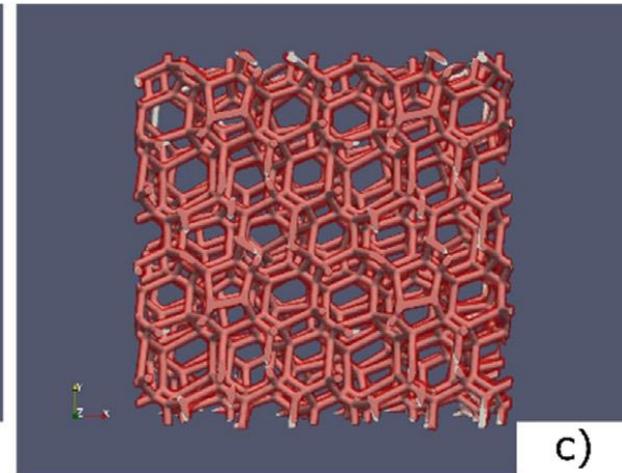
# Selektives Laser Sintering - erzeugte Polyamidschäume- Virtual Prototyping



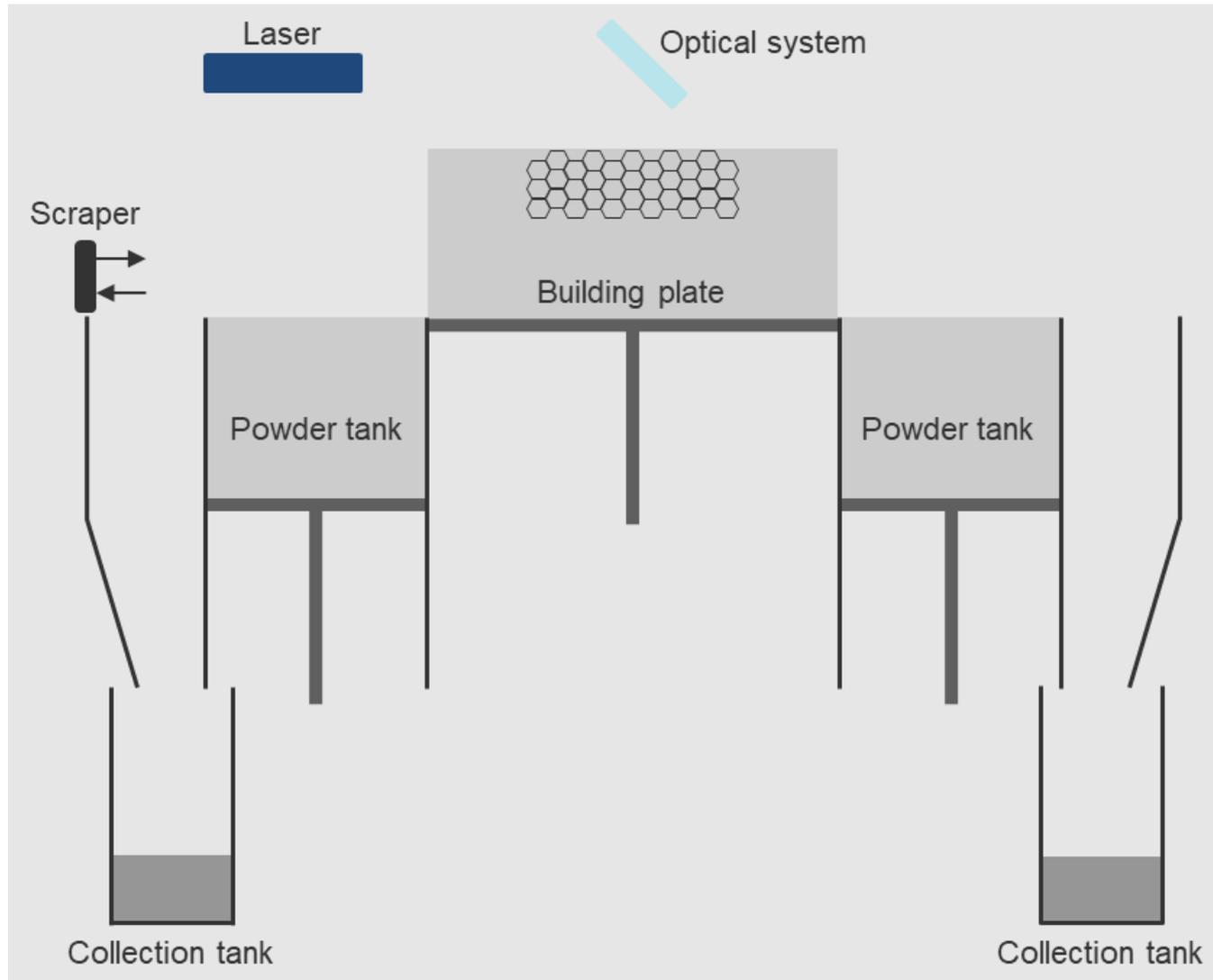
a) computergeneriertes  
Modell



b) computertomo-  
graphisches Bild des  
erzeugten PA-Schaums

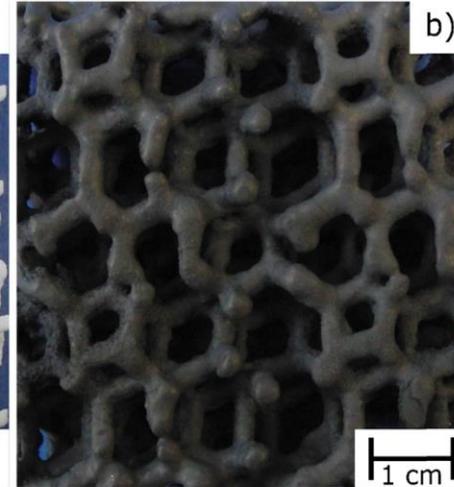
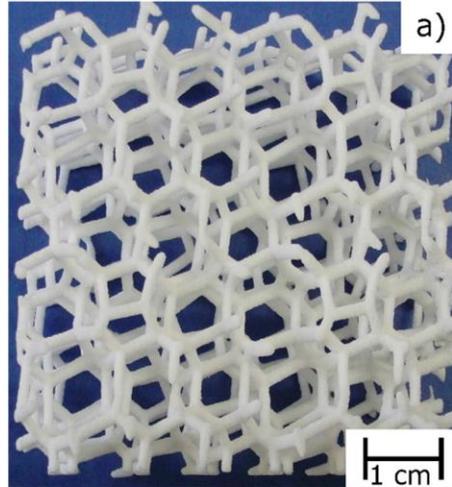


c) Vergleich des  
erzeugten PA-Schaums  
mit dem Modell



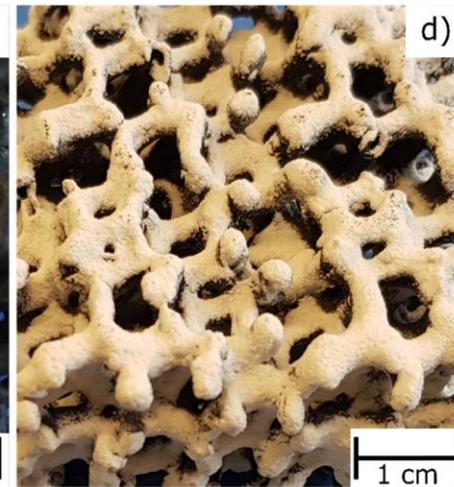
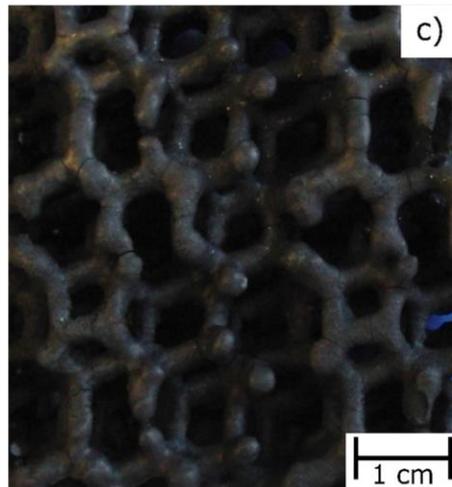
# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C-Filter auf der Basis von Polyamidschäumen

a) über SLS erzeugter PA-Schaum



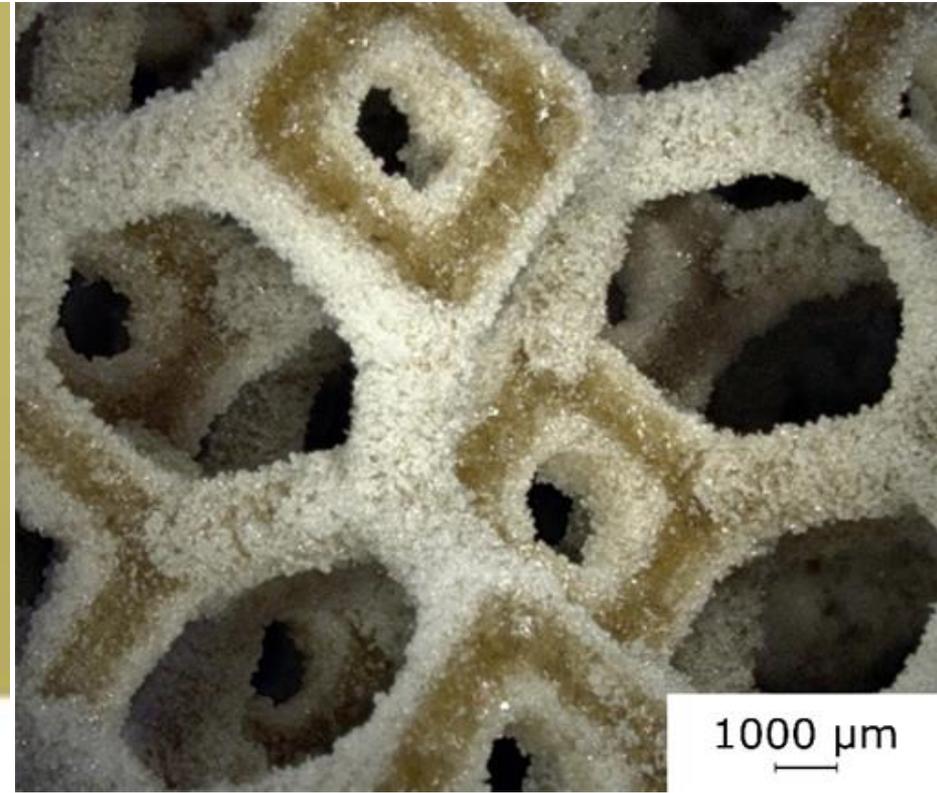
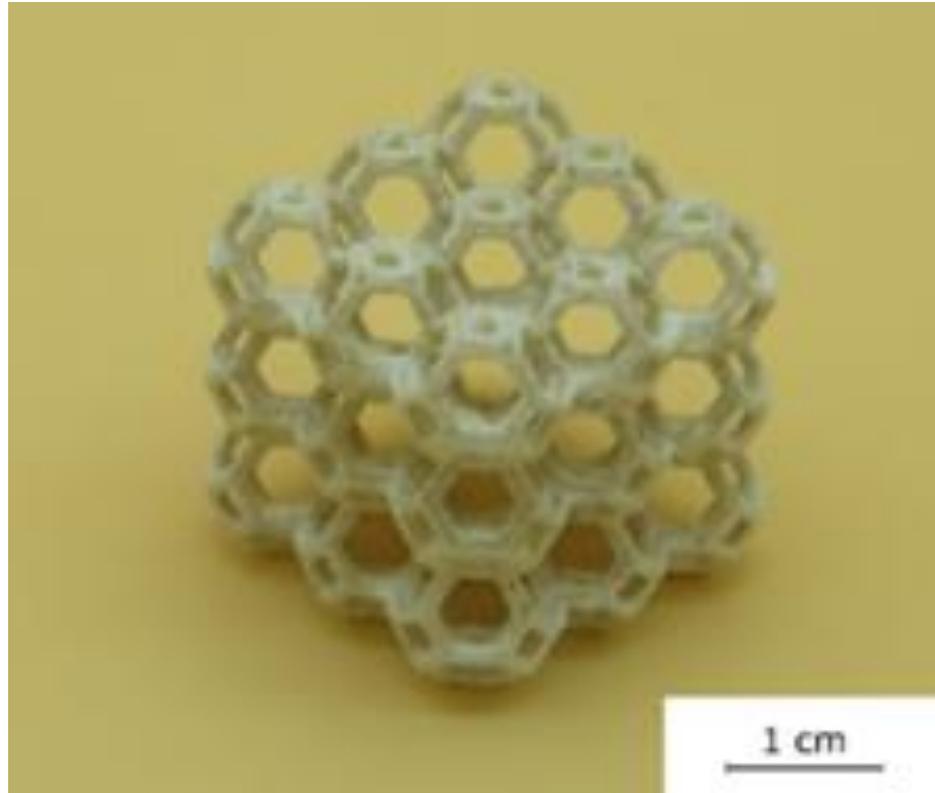
b) über Imprägnier- und Sprühschlicker beschichteter Schaum nach der Trocknung

c) erzeugter Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C-Schaumfilter nach der Pyrolyse

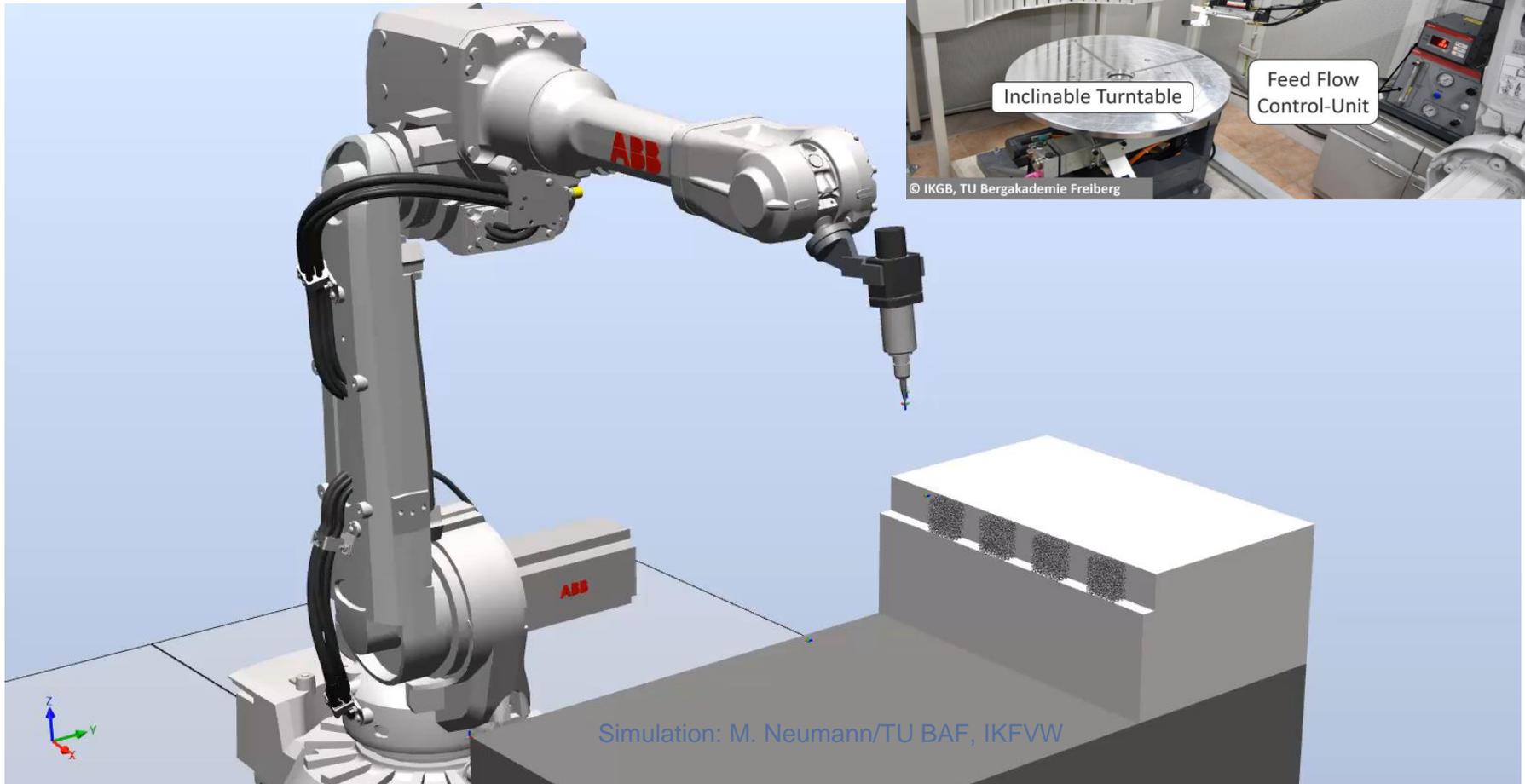


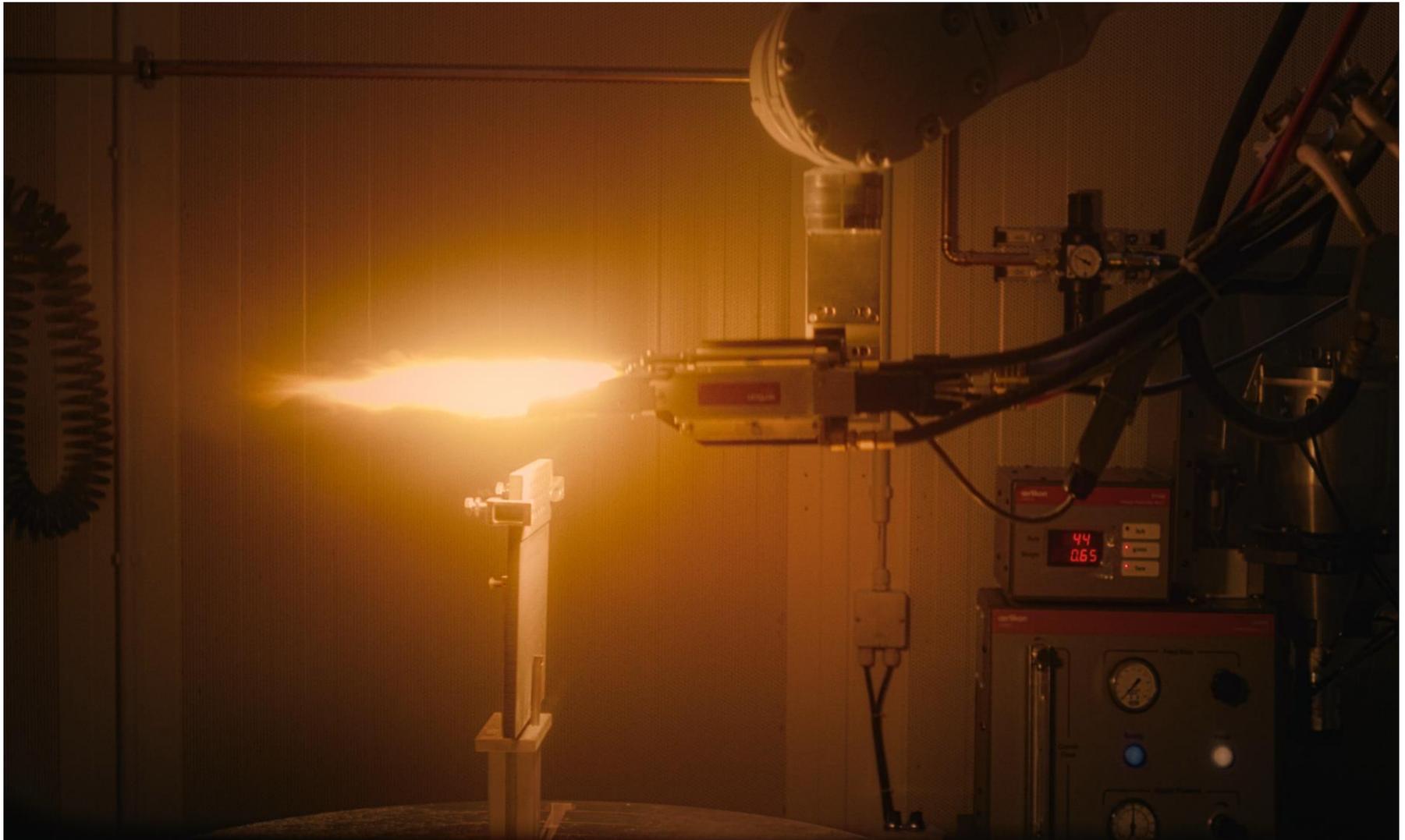
d) Filter mit zusätzlicher flammgespritzter Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung

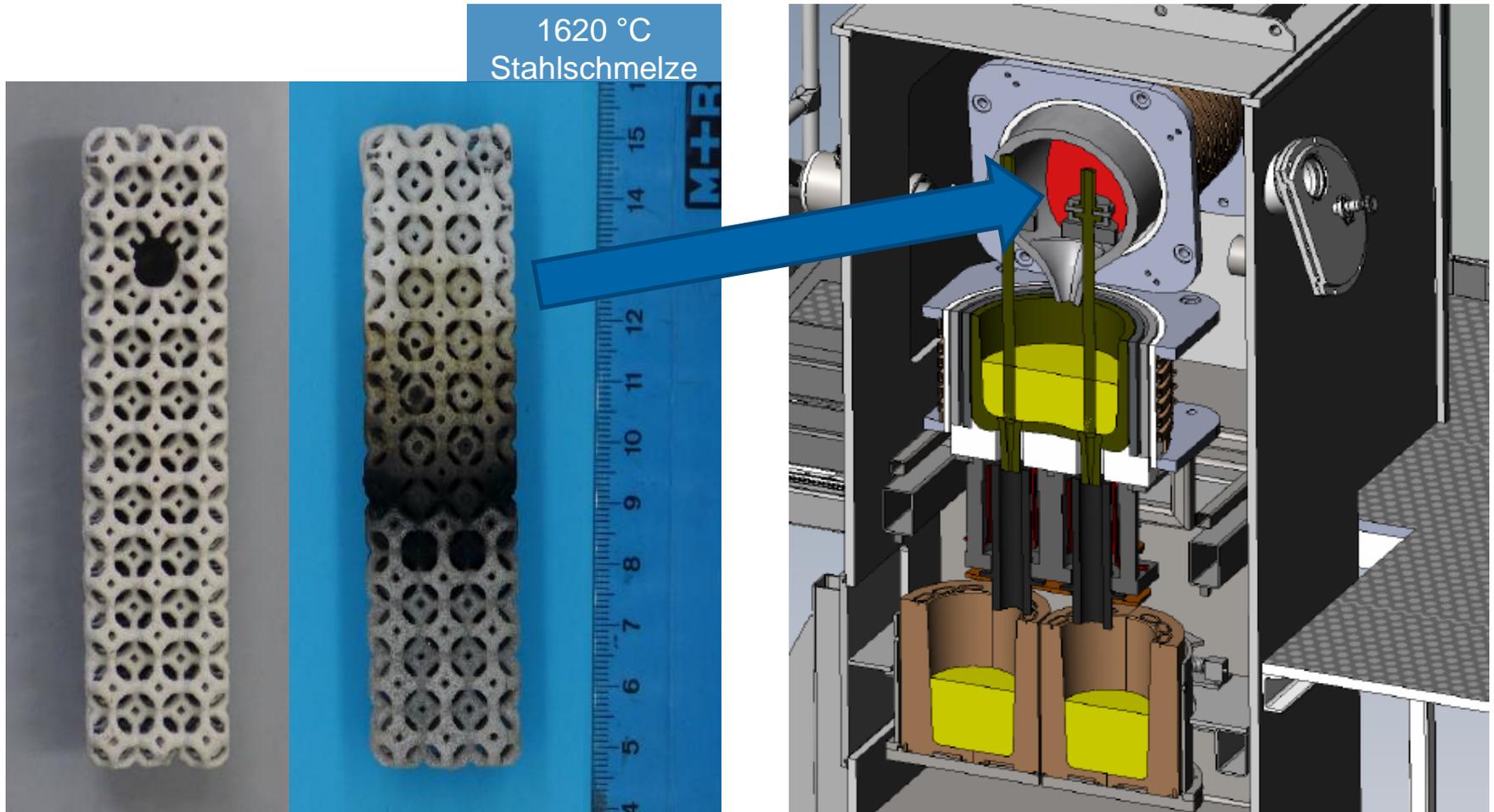
# SLS von Zucker- oder Salz- Schäumen / Flamm-spritzen



## Automatisierte Beschichtung mehrerer Filter - Simulation

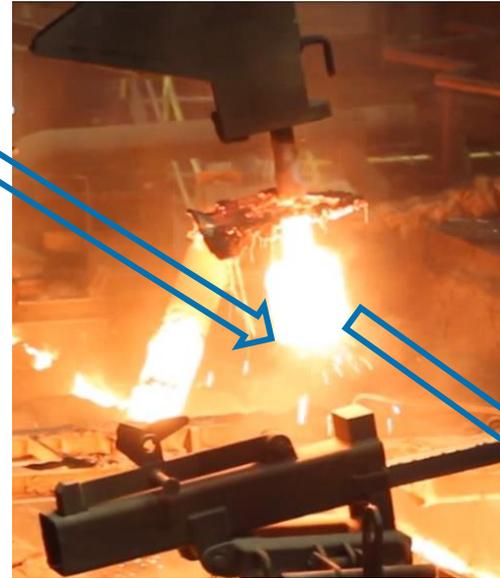








L: 200 mm, D: 200 mm



Thyssenkrupp in Duisburg



Thyssenkrupp:  
45 min  
408 t Stahlschmelze

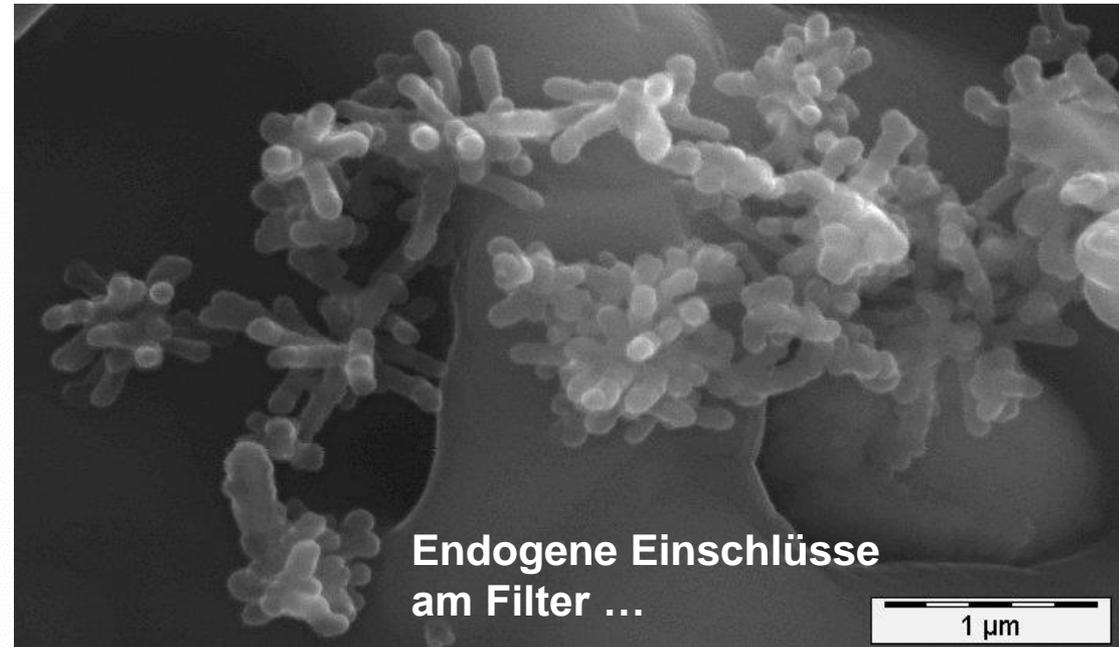
**Deutsches Patent 10 2016 106 708**

Wetzig, Baaske, Karrasch, Brachhold, Rudolph, Aneziris *Ceramics Int.*, 44(18), 2018



**DE 10 2016 106 708**

## ***In situ* gebildete Schichten Focused Ion Beam + Rasterelektronenmikroskopie**



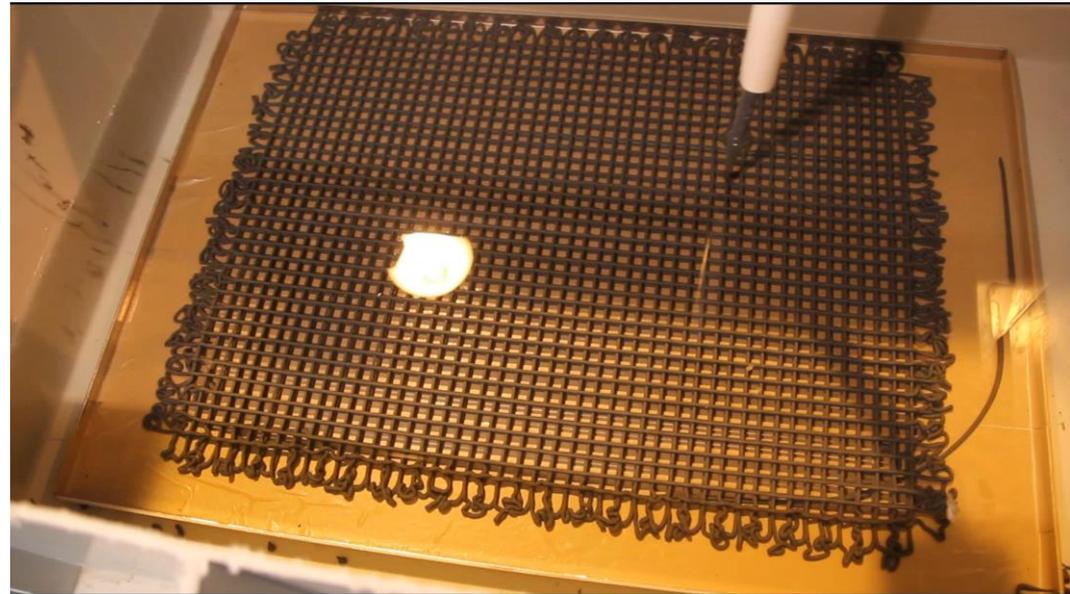
Storti et al., *Ceram. Int.*, 2018

Gehre et al., *J. Am. Ceram. Soc.*, 2018

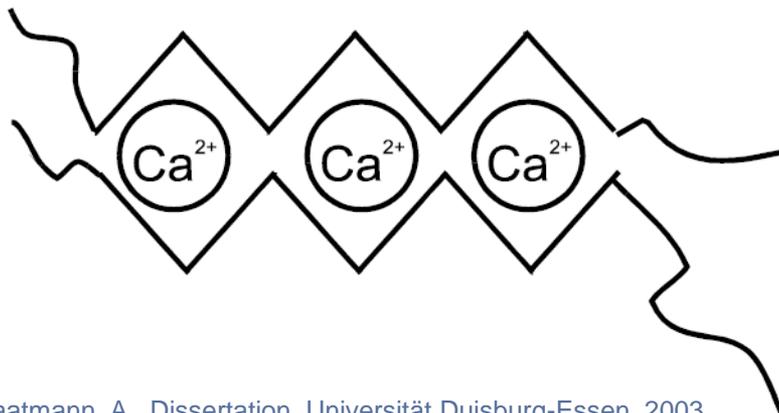
# Mozart Schokoladen Kugeln:

## Gelierung von Alginaten - Feste Strukturen -

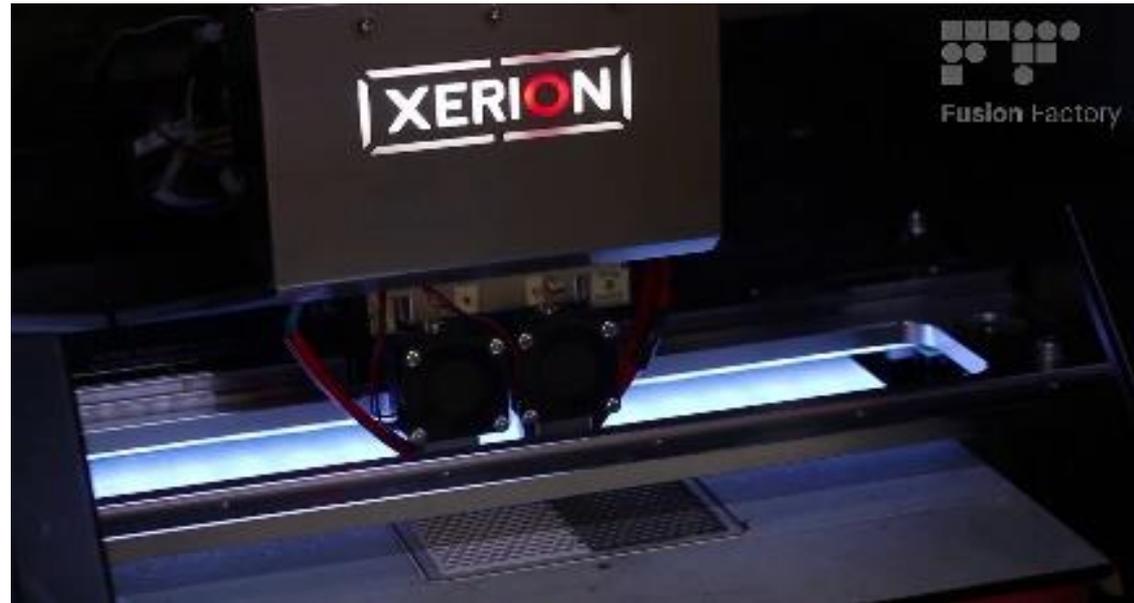
Zickzackstruktur der Guluronat-Blöcke ermöglicht Gelbildung in Gegenwart zweiwertiger Kationen, wie  $\text{Ca}^{2+}$  oder  $\text{Ba}^{2+}$  (Guluronatblöcke müssen aus mindestens 20 Guluronat-Monomer-Einheiten aufgebaut sein)



„Egg-Box-Modell“

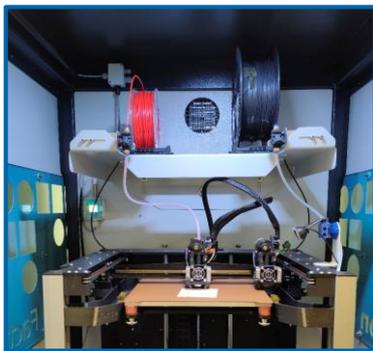
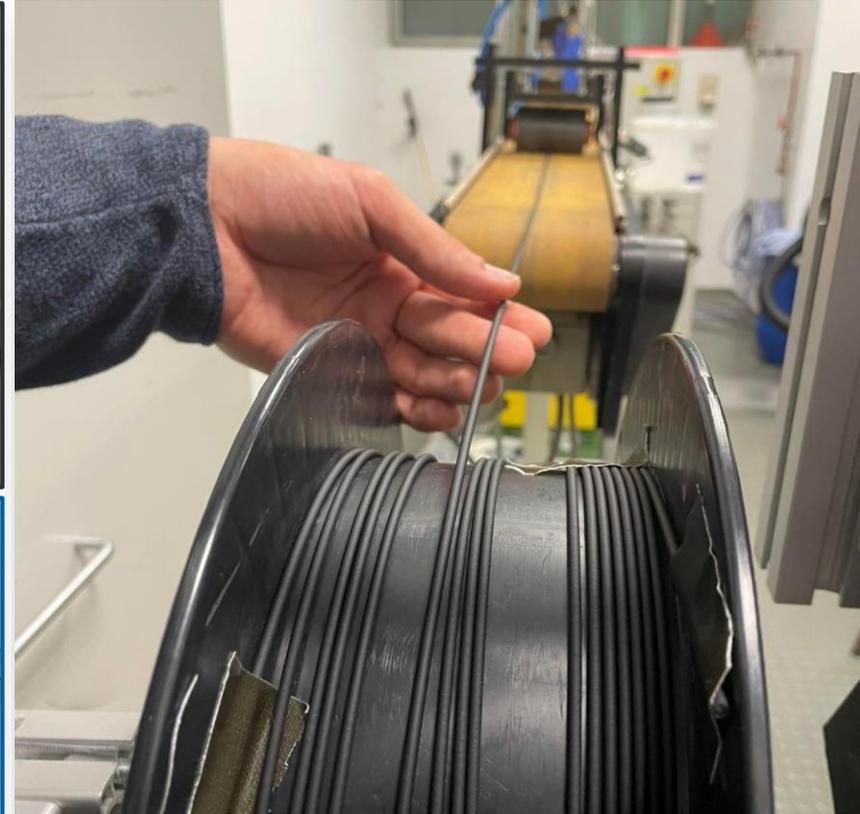


# Fused Filament Fabrication „Hochzeit von Kunststoff mit Keramik und/oder Metall“

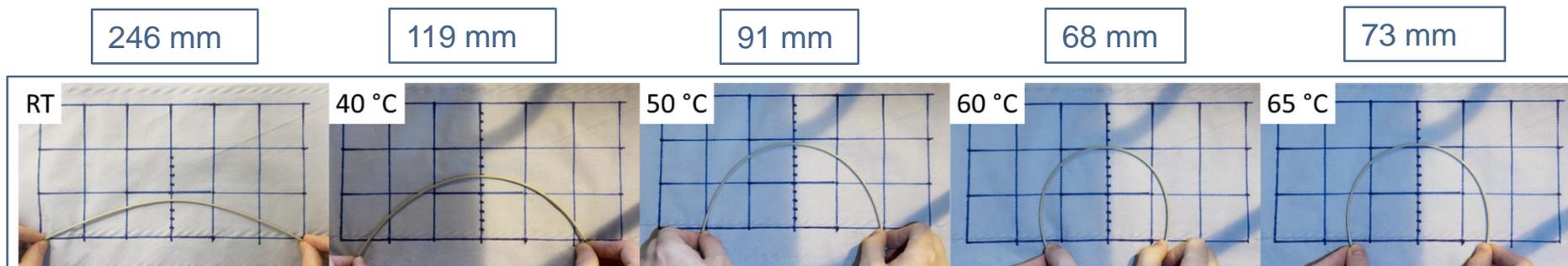
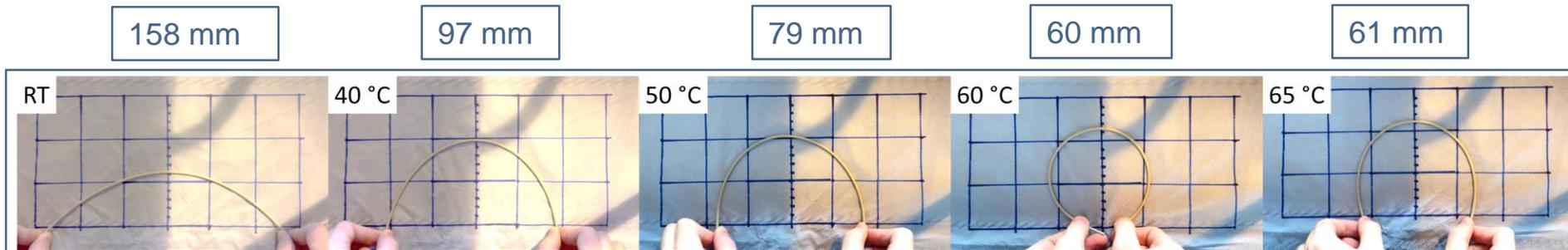


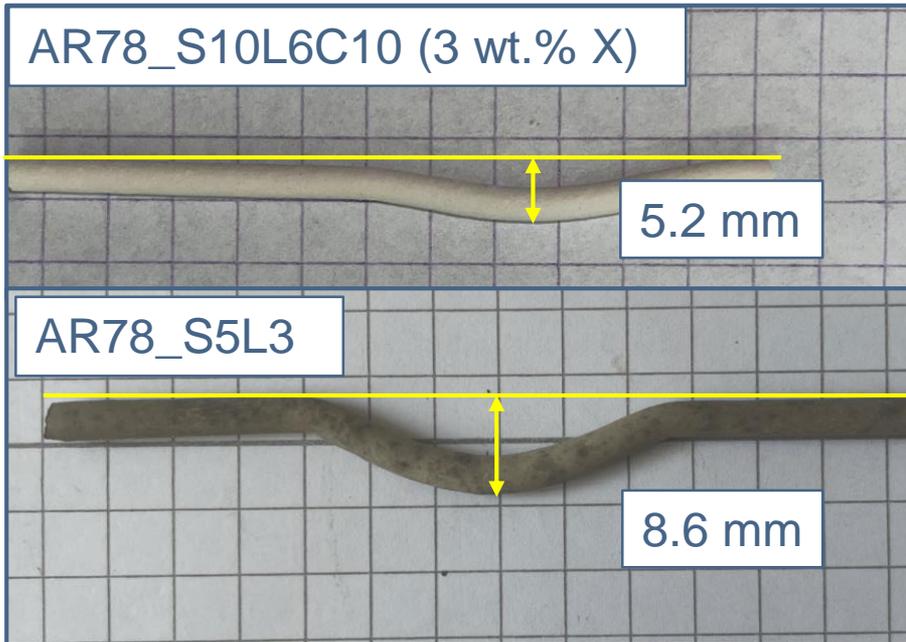
# FILAMENT: Flexibel!

48 Vol.% Keramik/Metall, 52 Vol.% Kunststoff  
Oder **GRANULAT!!!**



## 48 Vol.% Keramik/Metall, 52 Vol.% Kunststoff

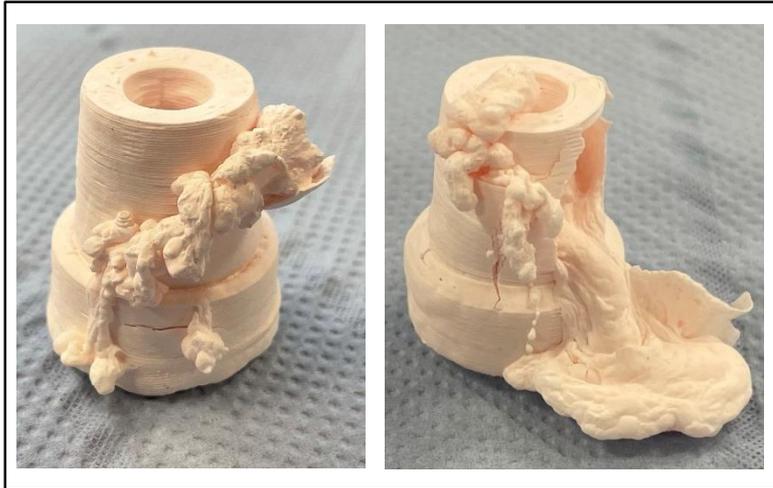




**Titel:** Thermoplastisches Bindemittelsystem und Verfahren für die 3D-Fertigung von keramischen Bauteilen, metallischen Bauteilen bzw. Bauteilen auf der Basis von metallokeramischen Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden

Deutsche Patentanmeldung und PCT  
Aneziris, Malczyk, Yaroshevskiy, 10 2022 001 070.4, 29.03.2022

# FILAMENT: Entbinderung / Sinterung!



AR78\_L3C5



AR78\_L3MC5



AR78\_L3C5W10



AR78\_S10L6C10

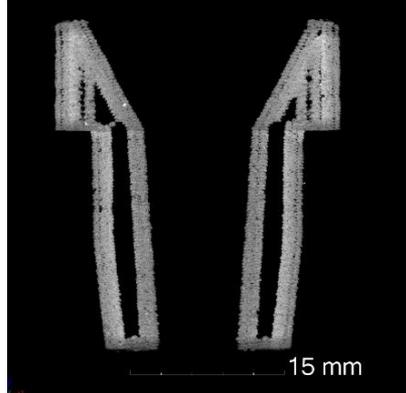
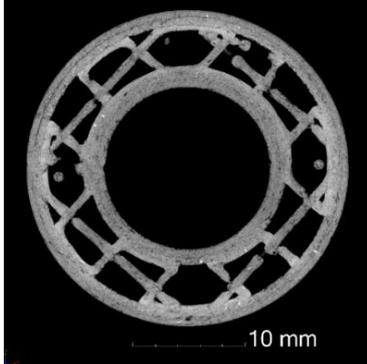


# Bauteil:

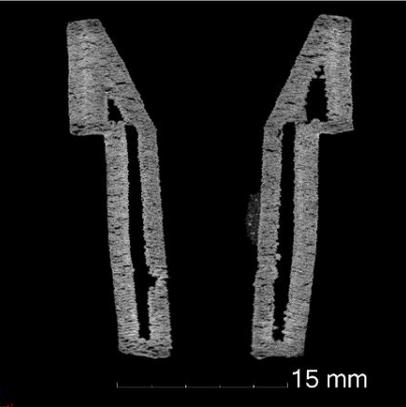
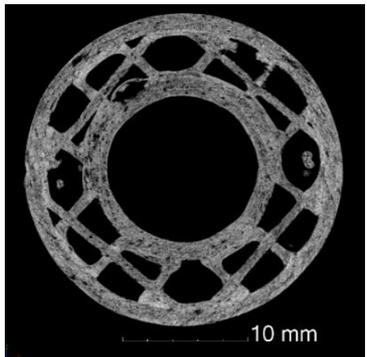
- a) **Schwindung,**
- b) **perlmutterartige Struktur**



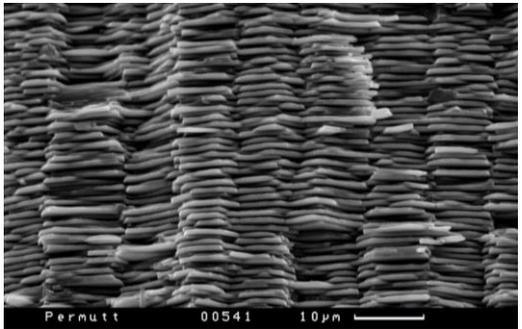
AR78\_S10L6C10 grün



AR78\_S10L6C10 gesintert



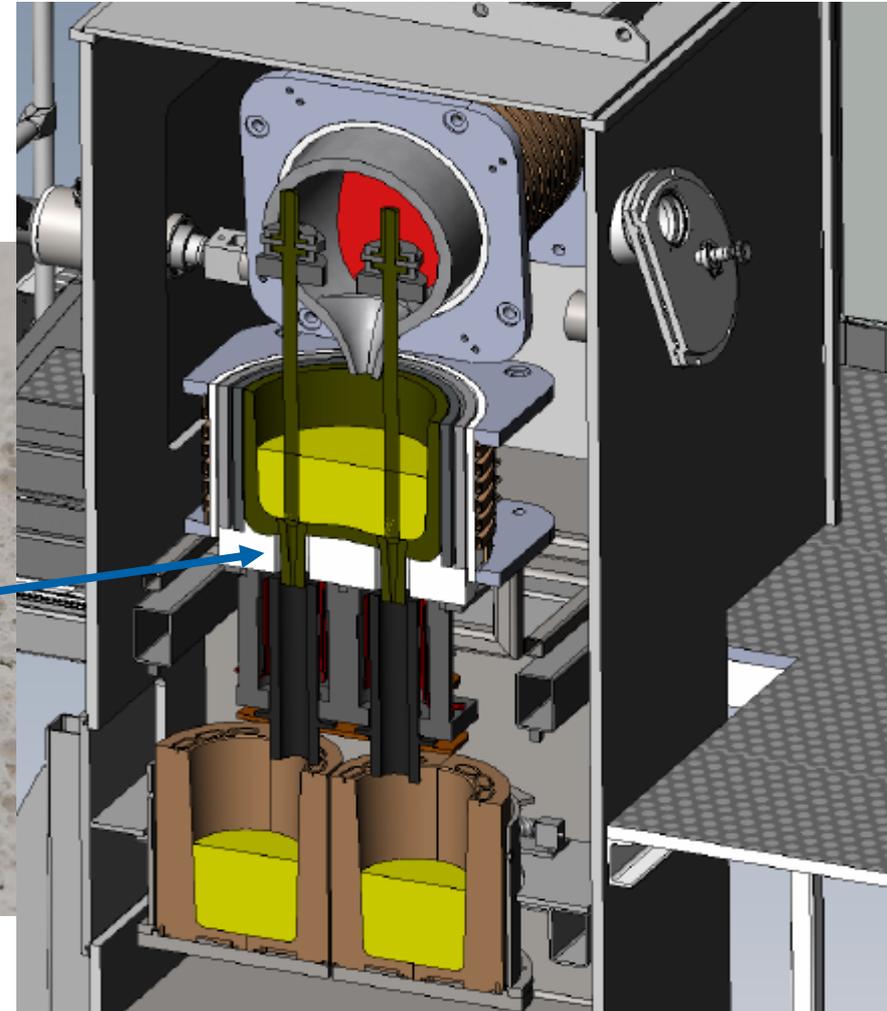
Perlmutter: Aragonitplättchen  
( $\text{CaCO}_3$ ) in organischer  
Netzwerkmatrix

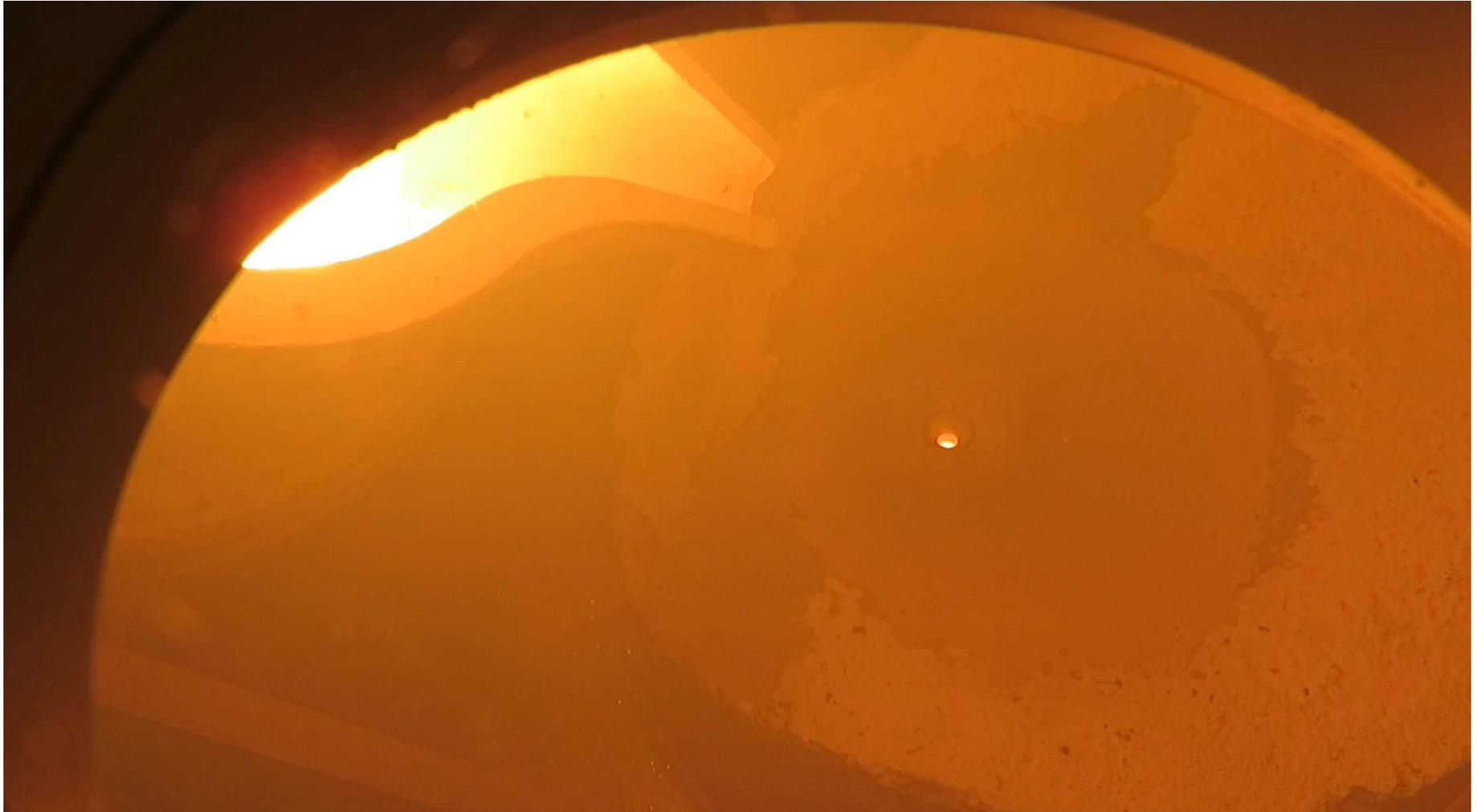


*Ceramics* **2023**, 6, 475 491. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010027>

Patent appl. DE 10 2022 001 271.5, Aneziris, Malczyk, Yaroshevskiy, Dudczig, Hubalkova

# Bauteil: Gießdüse



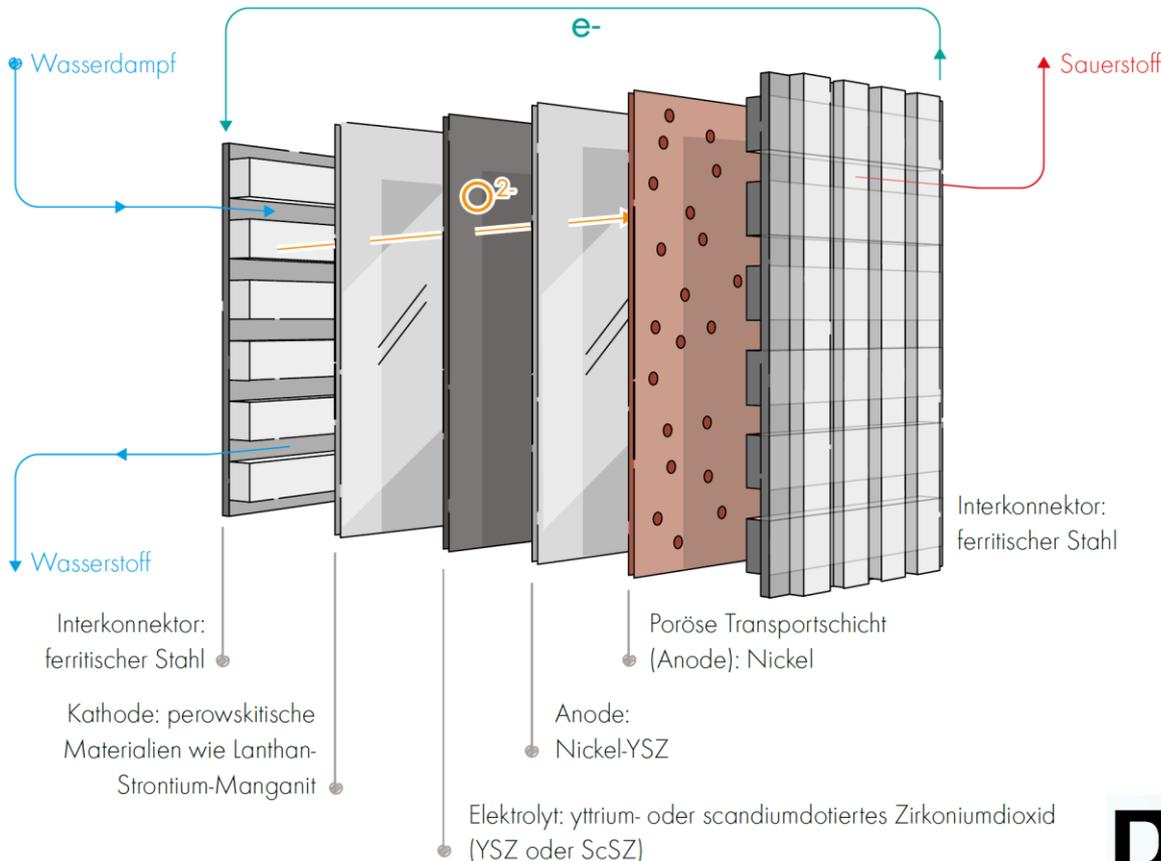


# Bauteil: Gießdüse

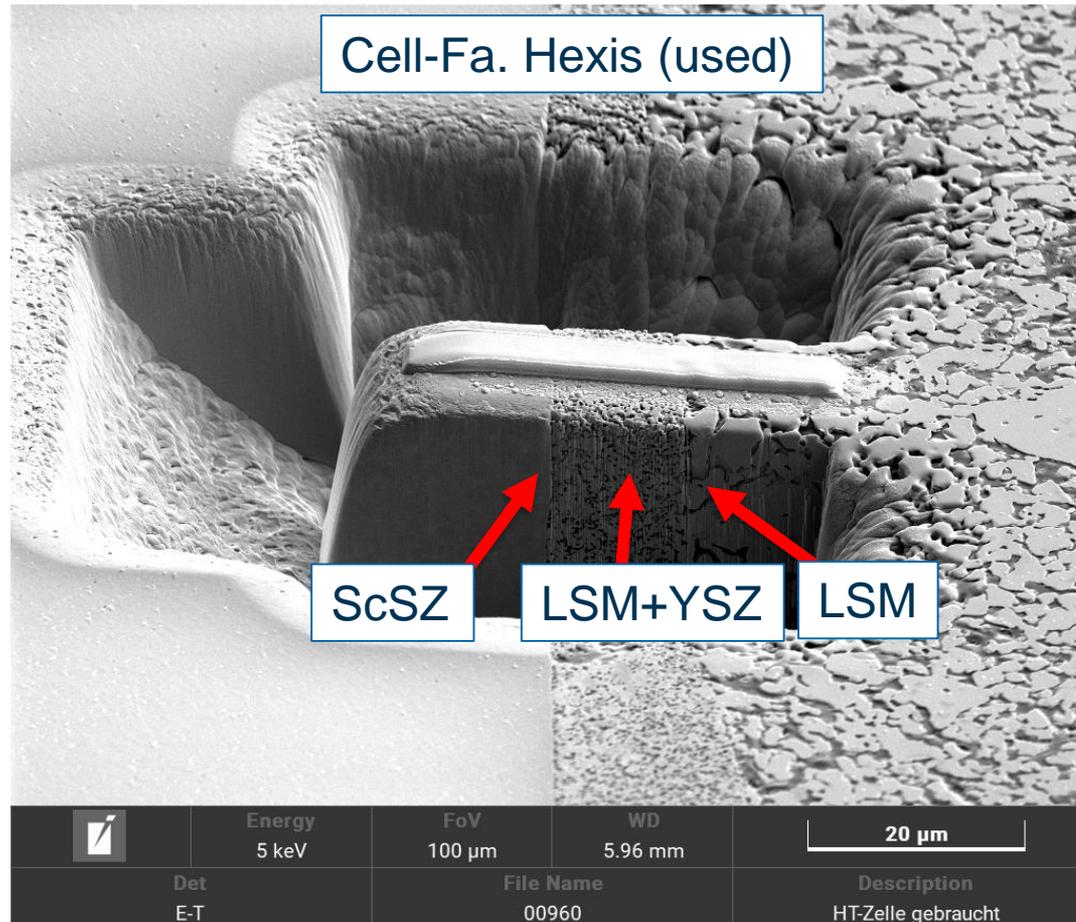


**Funktionskeramiken** und **metallokeramische Verbundwerkstoffe** tragen als Energiewandler oder Energiespeicher zur Energiewende und zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft bei.

## FESTKÖRPEROXID-ELEKTROLYSE (SOEL)



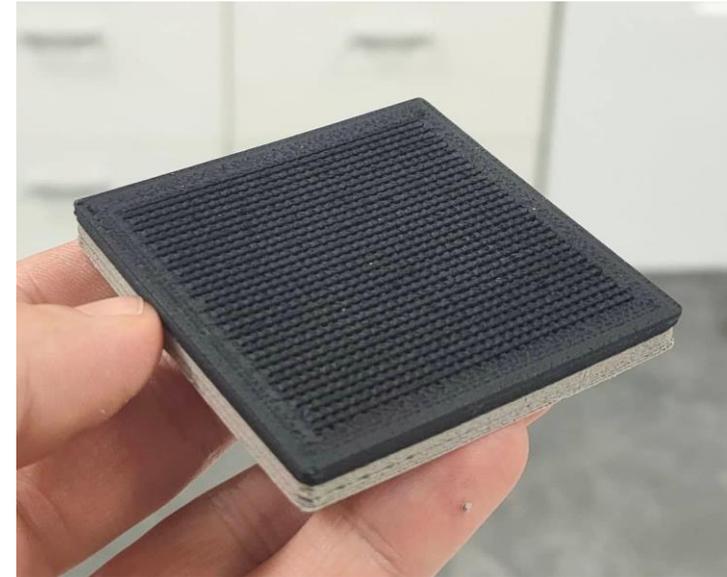
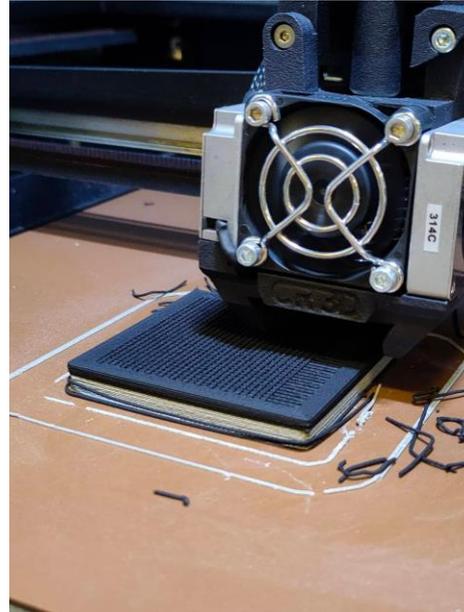
# Circular Economy



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



## Recycling oder als Additive in die Feuerfestindustrie

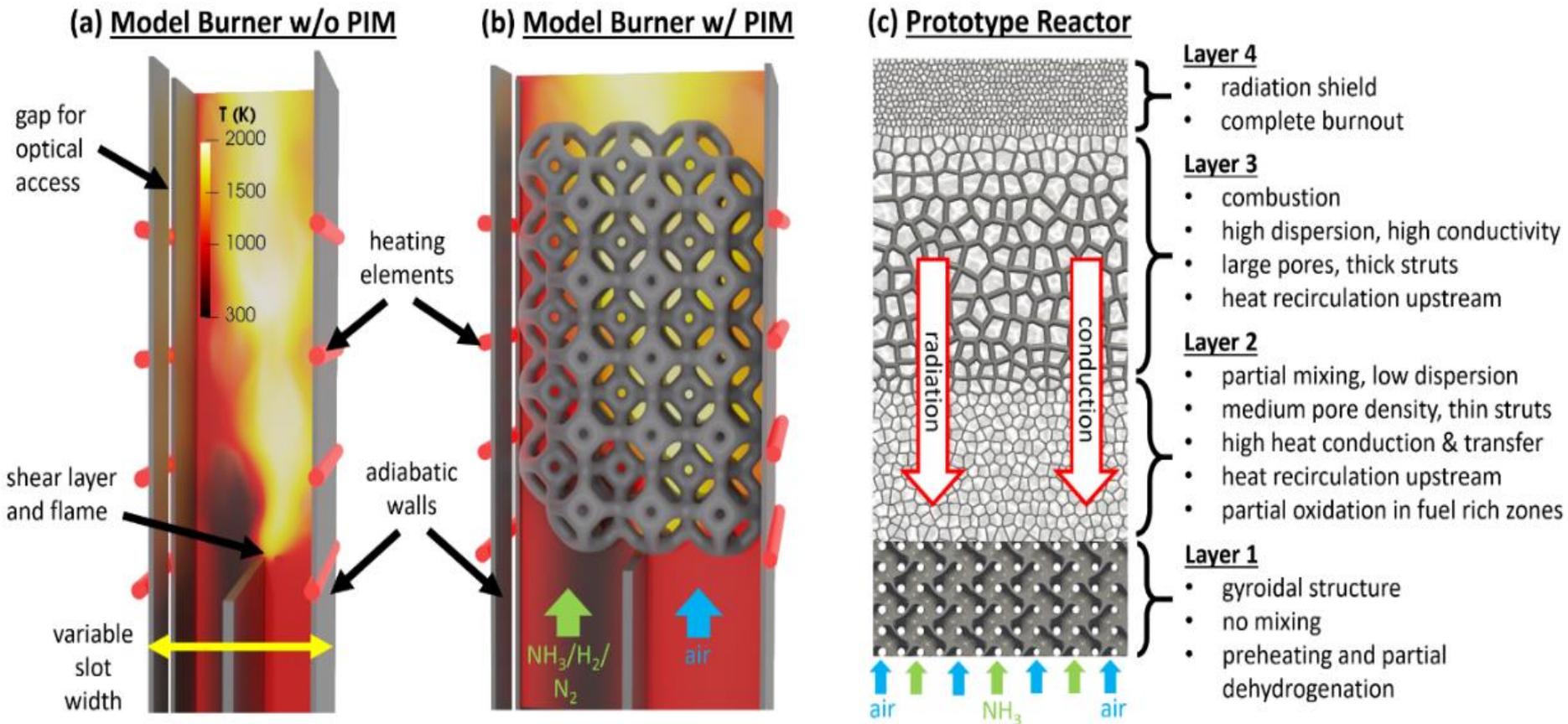
GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Nicht-vorgemischte Ammoniakverbrennung in maßgeschneiderten keramischen inertem porösen Medien

Koordinator: Prof. Dimosthenis Trimis, KIT, *DFG* 523876164



Die Sinterung ist der energieintensivste Prozess mit ca. 70 % des gesamten Energieverbrauches, heutzutage in der Regel **konventioneller Gasbrennereinsatz!**

Produkt	Produktionsmenge Deutschland in Mio. t	Emissionen in Mio.t CO <sub>2</sub>	Energieverbrauch in TWh/a	Beinhaltete Prozessschritte
Fliesen	0,9	0,3	2,0	Rohmaterial gewinnen, Masseaufbereitung, Formgebung, trocknen, Oberflächenbehandlung, Brennen / Sintern, Nachbehandlung
Technische Keramik	0,1	0,2	0,73	
Feuerfeste Keramik	1,4	1	1,8	
Ziegel	8,7	1,6	6	

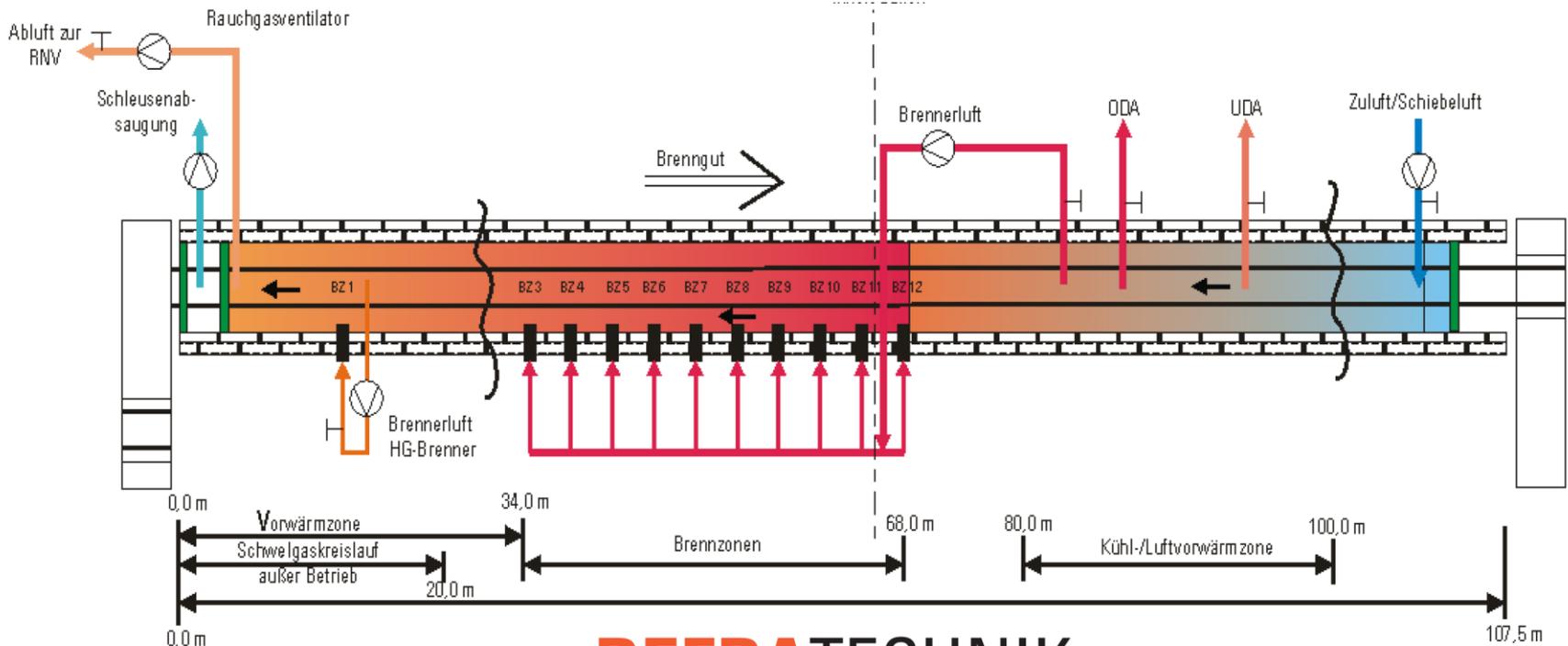
Übersicht der wichtigsten Zwischen- und Endprodukte in der Keramikindustrie für das Jahr 2016 (Bericht BMW, Hübner, Guminski, von Roon, Energiewende in der Industrie; Branchensteckbrief der Keramikindustrie, 2019)

# Hybrid FIRE



## Elektrifizierung: keine H<sub>2</sub>-Brenner, CH<sub>4</sub>-Brenner sukzessiv ersetzen

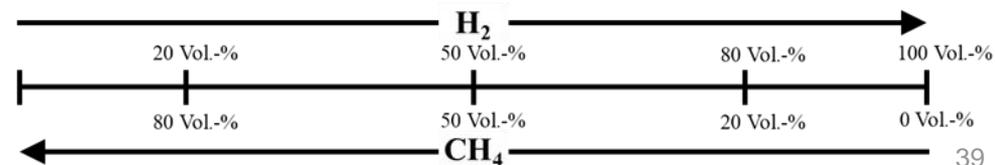
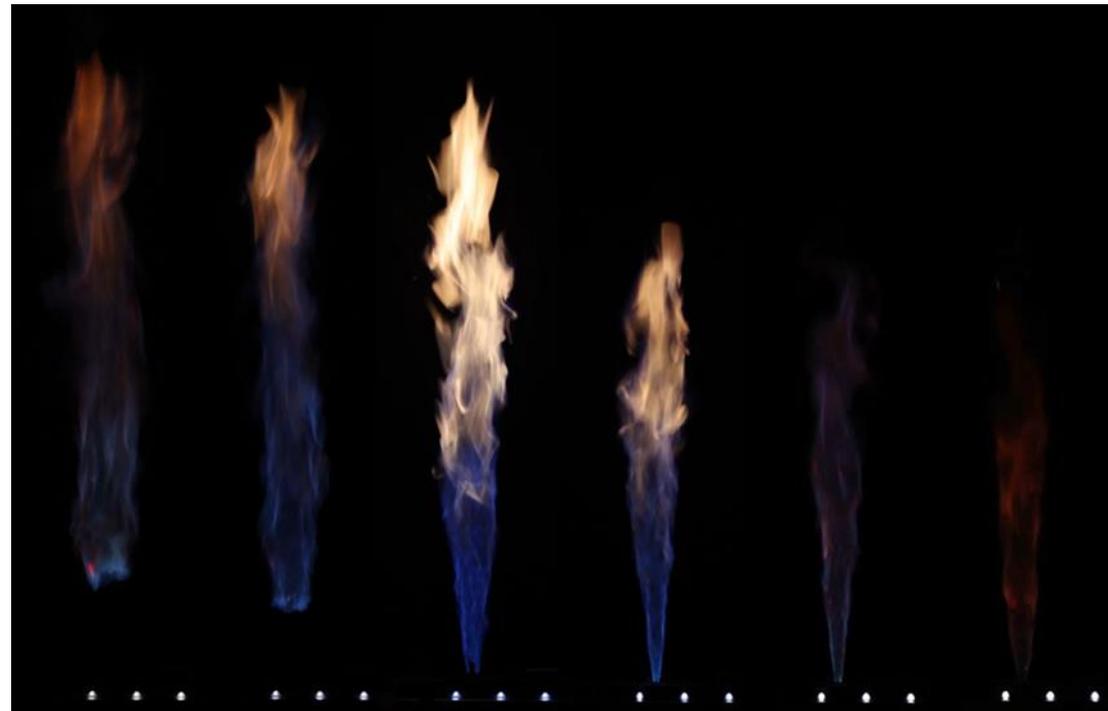
➔ Feuerfest / Durchlauföfen,  
Feuerfestspezialist in Zement, Metallurgie, Chemie



**Prof. Dimosthenis Trimis**, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut Für Technologie  
(im Rahmen des Freiburger Feuerfest Forums 2023)

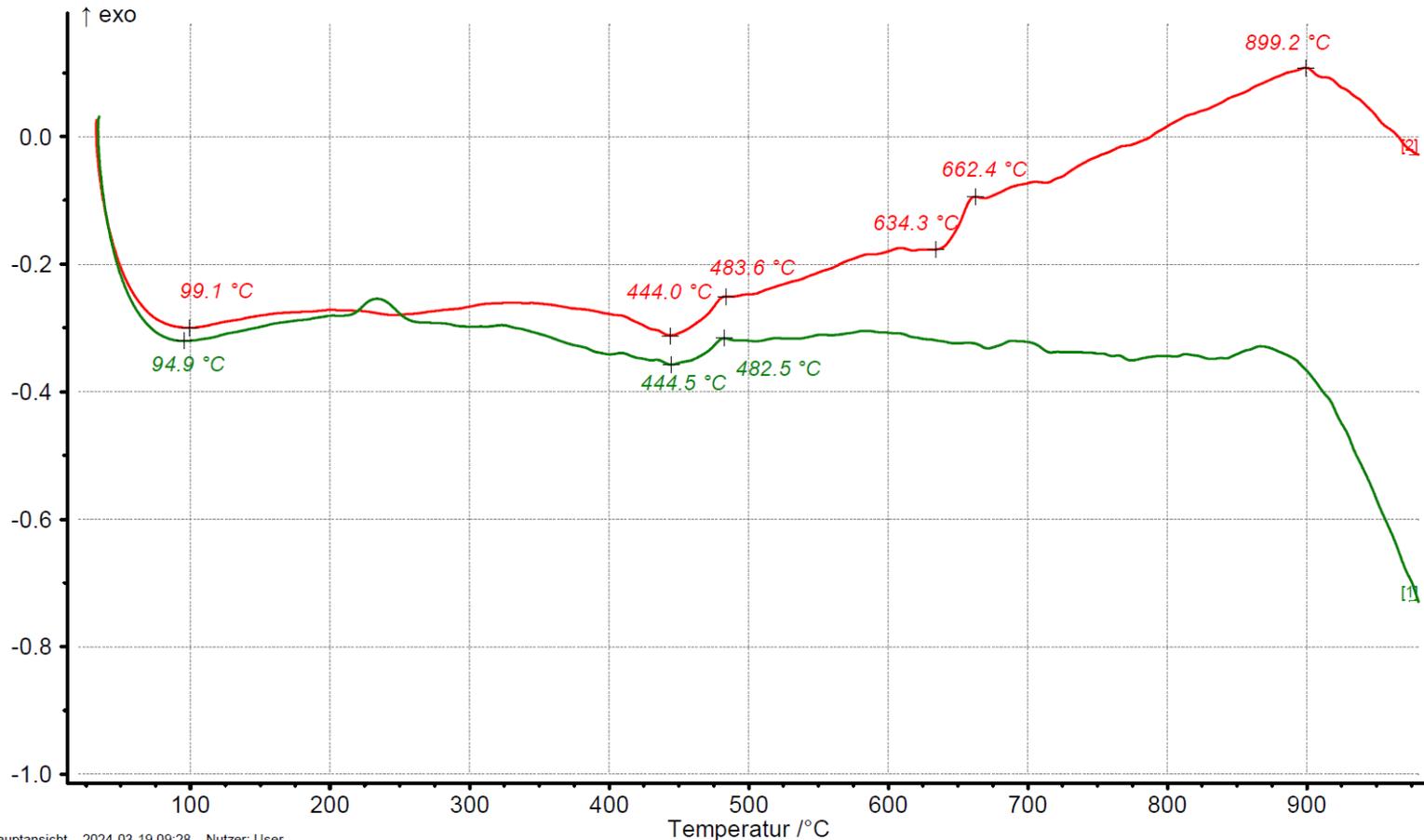
Beispiel: Turbulente Diffusionsfreistrahlf Flamme

- Änderung der Flammenform
  - Verschiebung der Abhebehöhe
- Änderung der optischen Erscheinung
  - Chemilumineszenz
  - Rußleuchten
- Änderung der Strahlungseigenschaften



# MgO fein bei 600 °C in CH<sub>4</sub>(grün), in H<sub>2</sub> (rot) getempert und anschließend in einer DSC bei 1200 °C in Luft gesintert

DSC /(mW/mg)

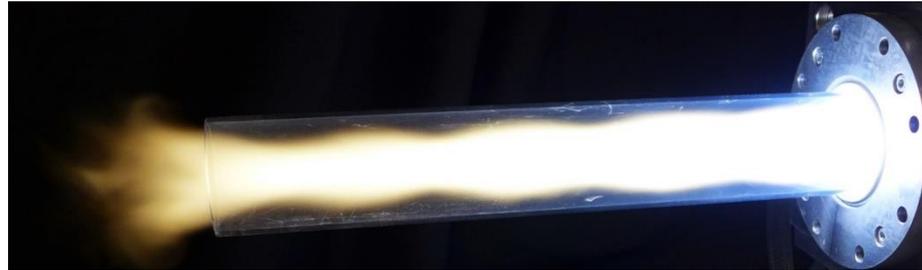


Hauptansicht 2024-03-19 09:28 Nutzer: User

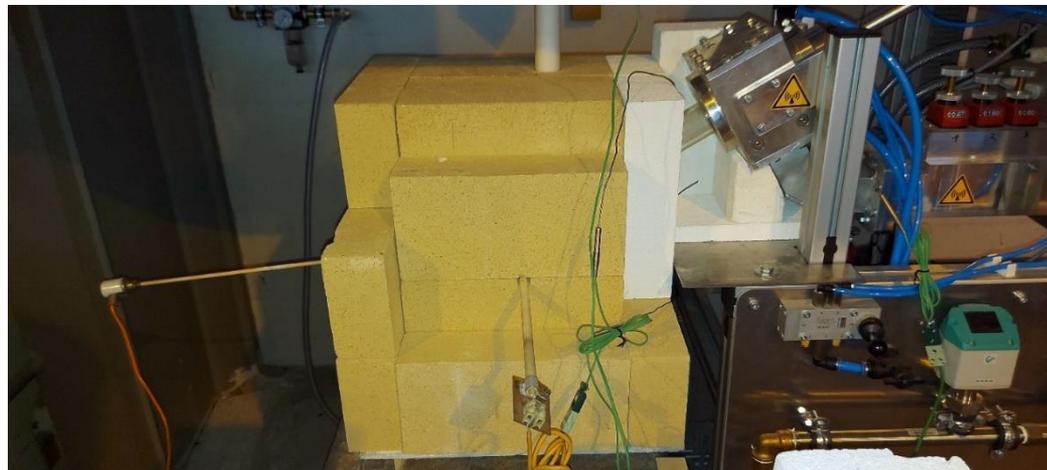
[#]	Gerät	Datei	Datum	Versuchs-ID	Probe	Mas...	S...	Bereich	Atmosphäre	K...
[1]	STA 409 PC/PG	5010 S 17 E 600°C Rand.ngb-dsv	2024-02-23	J.Hubalkova DL	S17 E 600°C Rand	31.675	1/1	20°C/10.0(K/min)/1200°C	AIR(80/20)/70 / <kein Gas>/--- / <kein Gas>/---	820
[2]	STA 409 PC/PG	5012 S 33 100% H2 600°C Rand.ngb-dsv	2024-02-26	J.Hubalkova DL	S33 100% H2 600°C Rand	30.230	1/1	20°C/10.0(K/min)/1200°C	AIR(80/20)/70 / <kein Gas>/--- / <kein Gas>/---	820

## ❖ MIKROWELLENPLASMA BRENNER!

### Bauteil: Gießdüse als MWP-Brenner-Rohr



**Keine Kathode,  
die verschleißt.**



**Keine Mikro-  
wellen-  
ankopplung  
notwendig.**

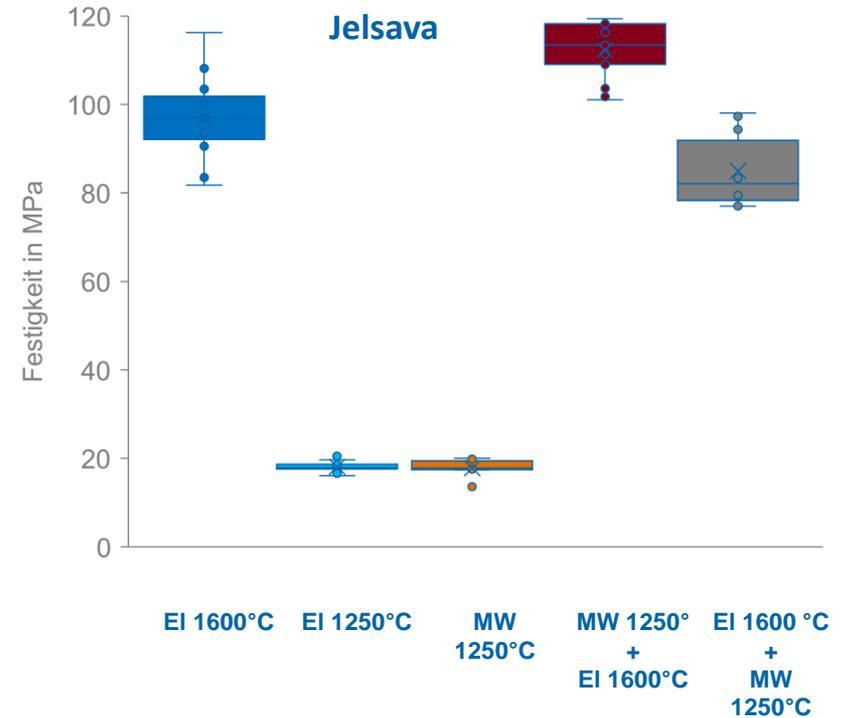
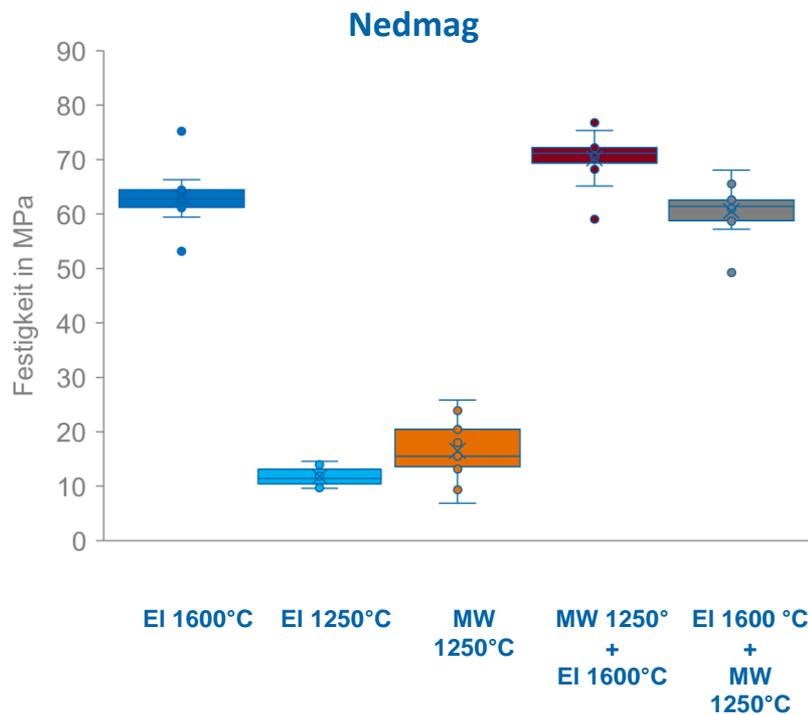
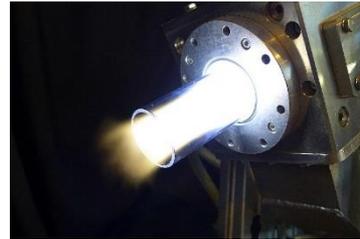
Gefördert durch:



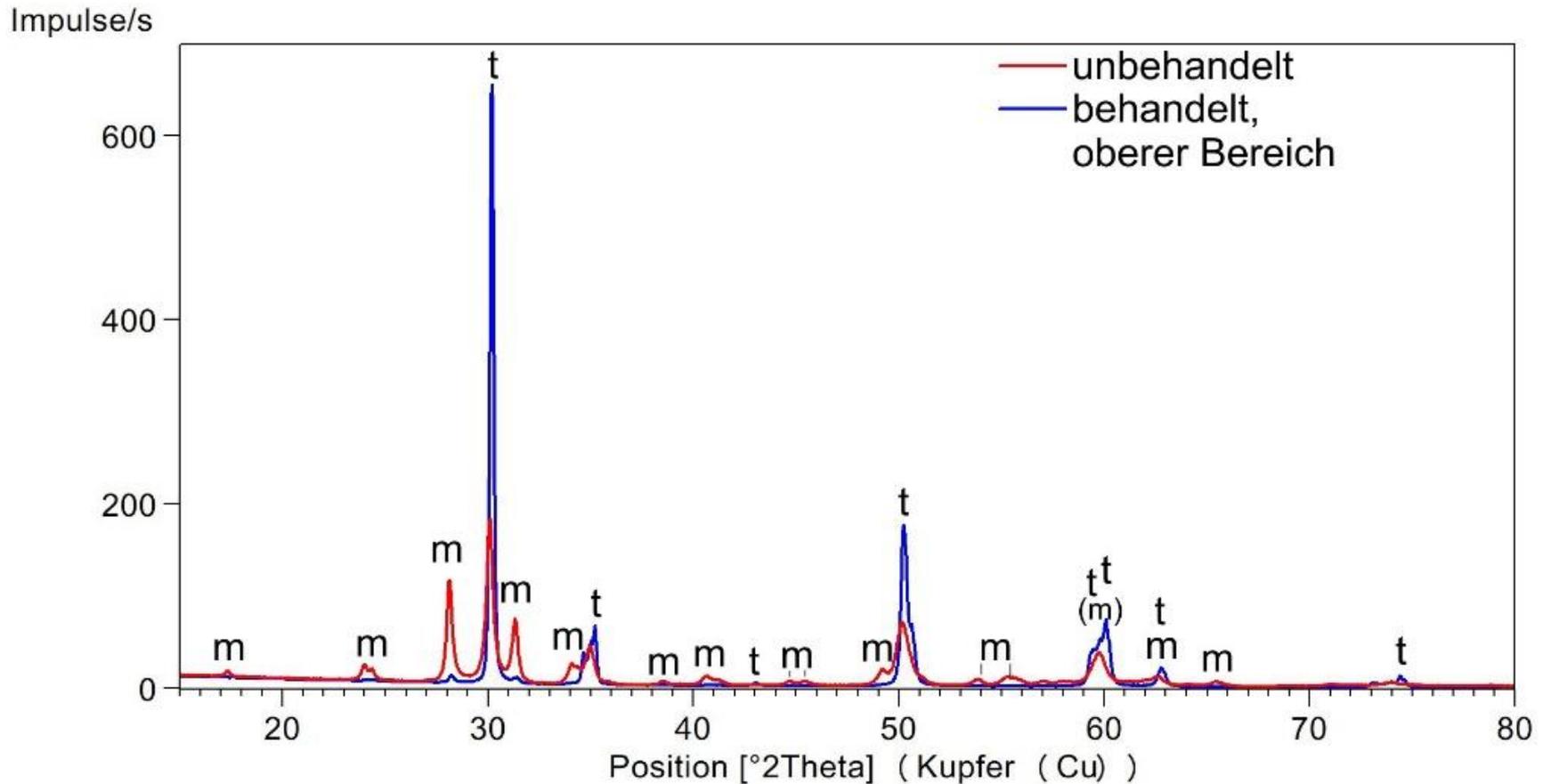
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## ❖ MIKROWELLENPLASMA BRENNER!



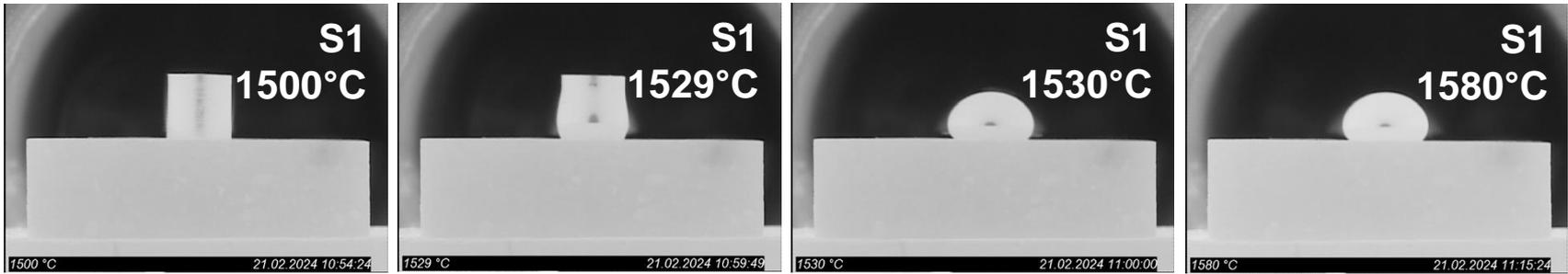
## ❖ MIKROWELLENPLASMA BRENNER!



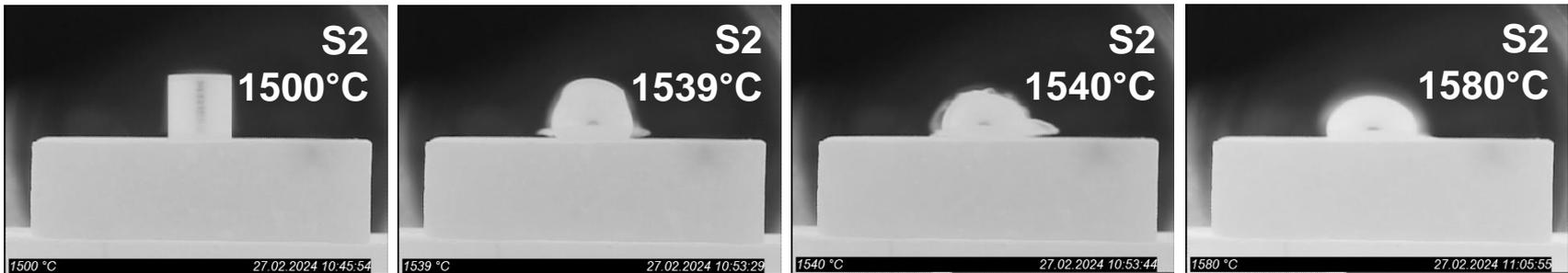
## ❖ MIKROWELLENPLASMA BRENNER!



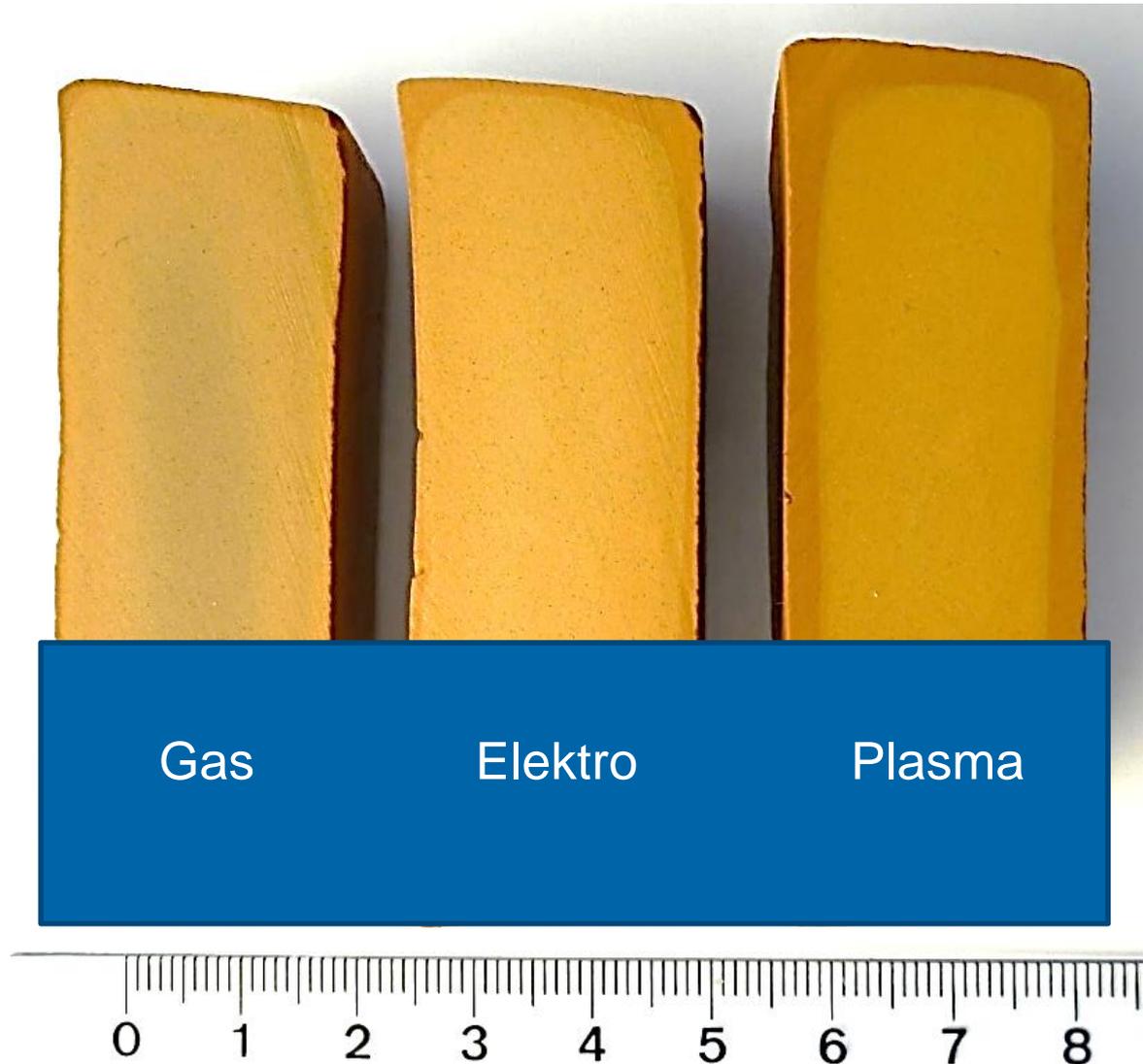
MWPB  
bei 1150  
°C



El. Ofen  
bei 1150  
°C

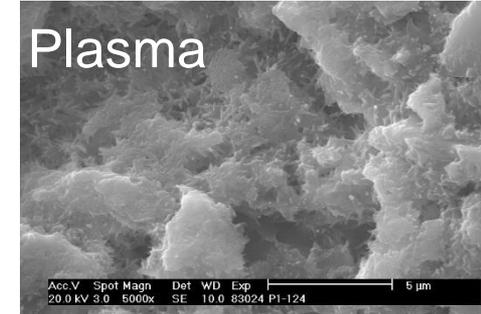
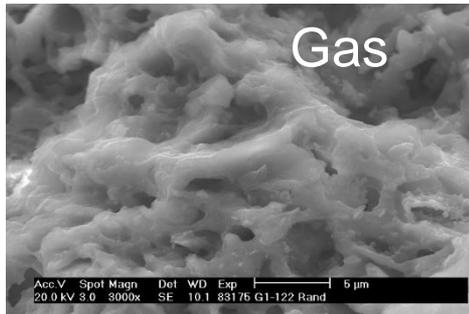


## ❖ MIKROWELLENPLASMA BRENNER!

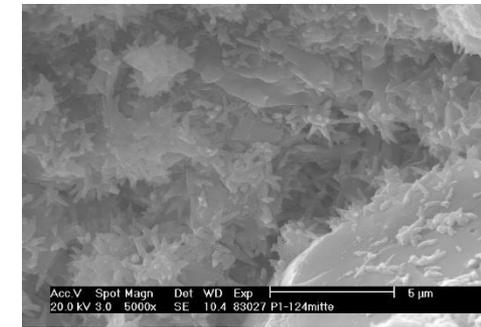
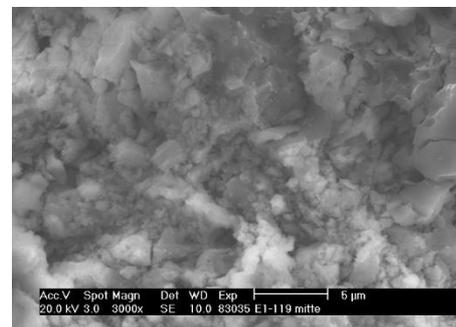
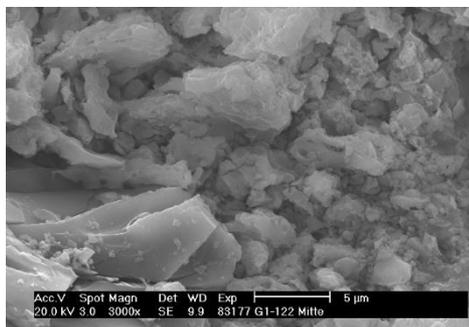


## ❖ MIKROWELLENPLASMA BRENNER!

Rand

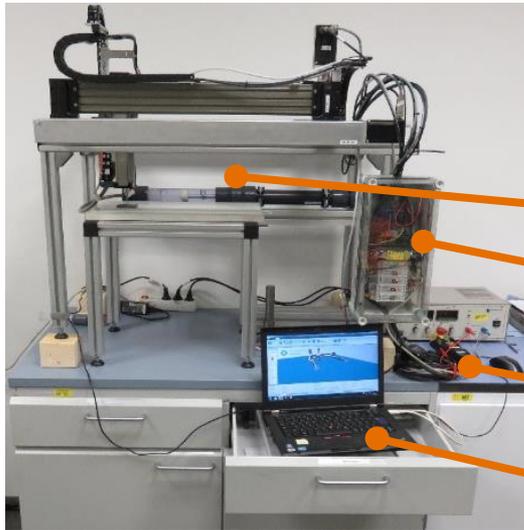


Mitte



# Elektrisch leitfähige Verbundwerkstoffe aus Metall und Keramik: Elektroden, Heizelemente

## 3D BILDSAME EXTRUSION



Druckplattform

Steuereinheit

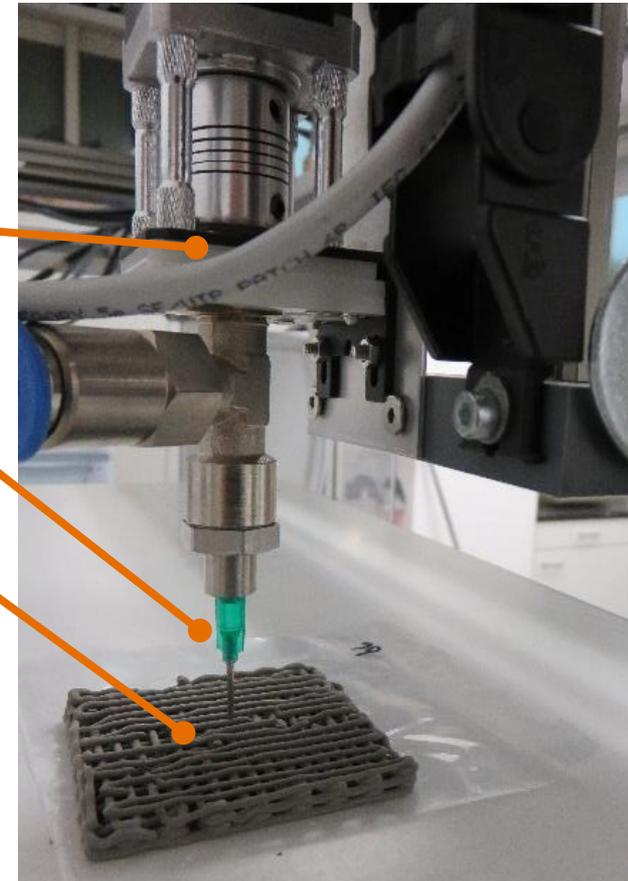
Stromquelle

Computer

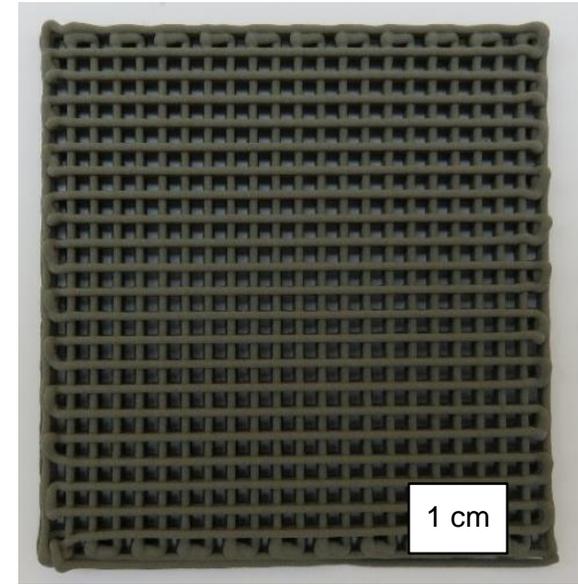
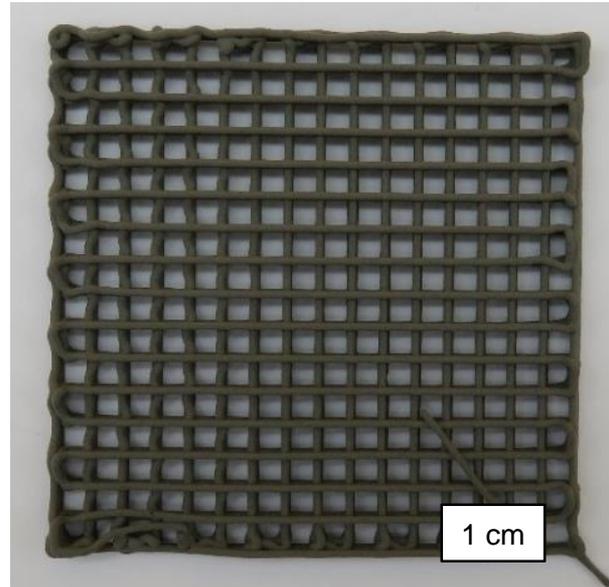
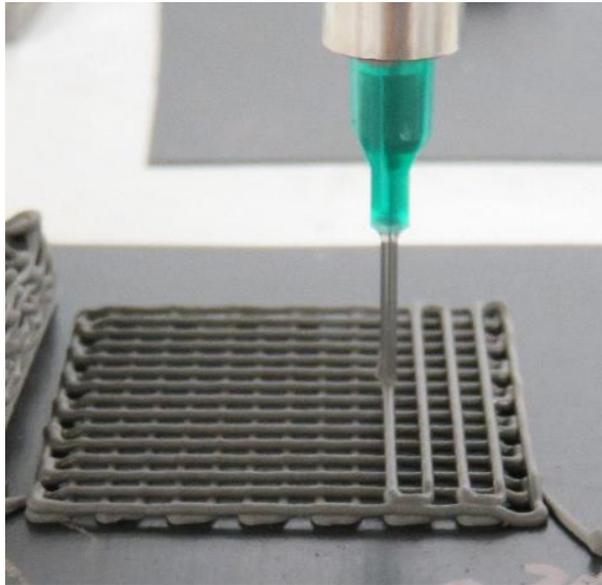
Druckerkopf

Düse

gedruckte Struktur



- **Kolbenextruder**
- Stoneflower Ceramic-3D-printing kit - 3-axis system DLE-RG-0001 (Commonplace Robotics)
- X-axis: 450 mm / Y-axis 200 mm / Z-axis: 200 mm
- CPRog-programming



*Poren 3.5 mm / 47 cpsi*

- 50 µm 316L Stahlpulver + 20 µm MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>
- **0,5 Gew.% MC**, 7 Gew. % Wasser
- Düsendurchmesser 0,8 mm, Düsen-Substrat-Abstand 0,9 mm

*C. Weigelt, CellMAT 2020.*



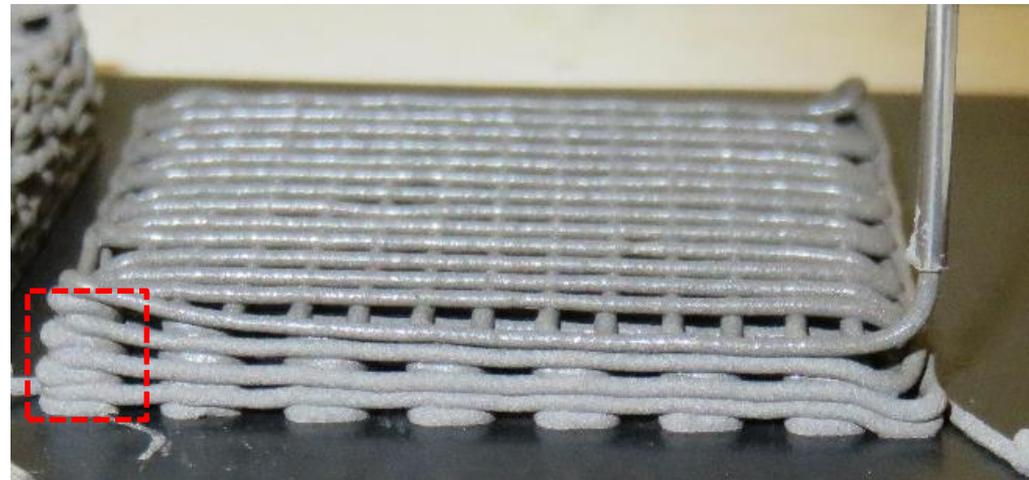
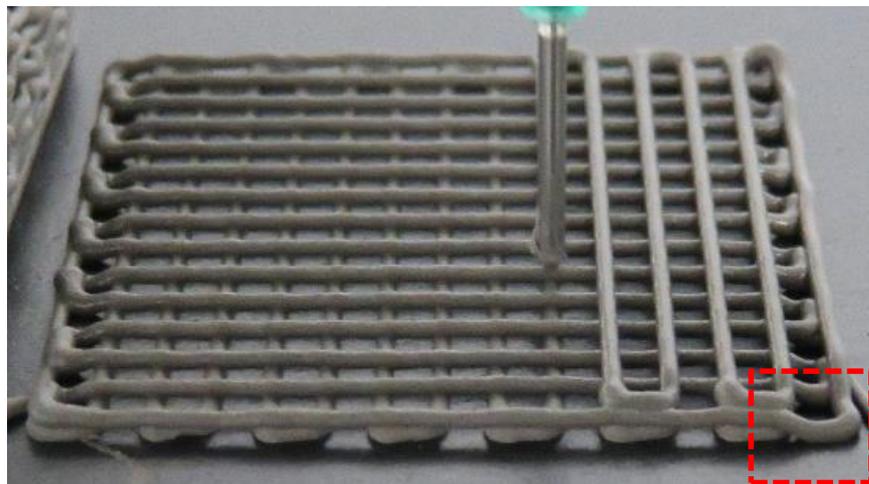
# 3D BILDSAME EXTRUSION



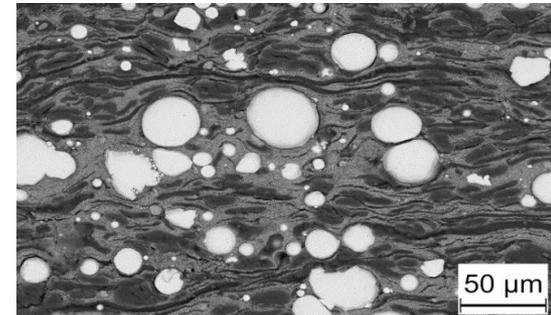
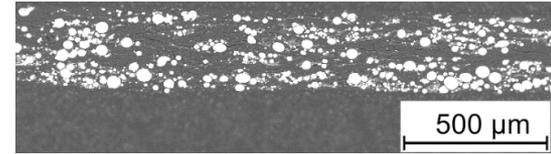
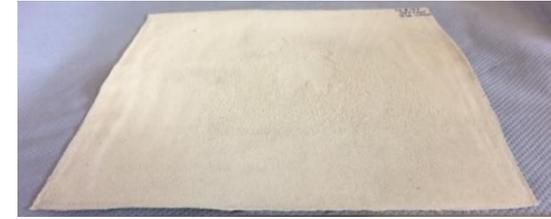
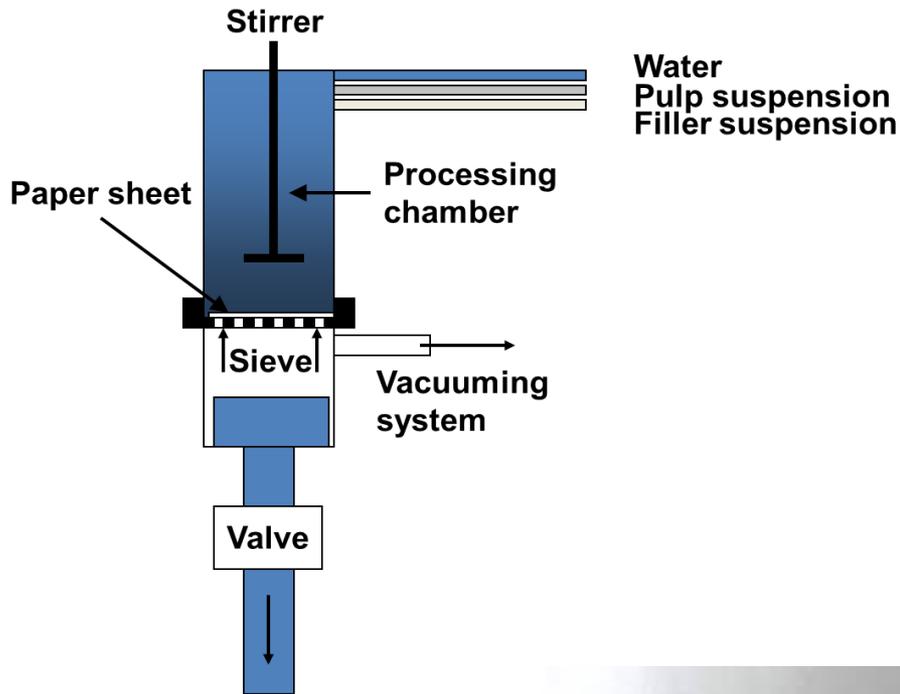
Geschwindigkeit



Smoothing

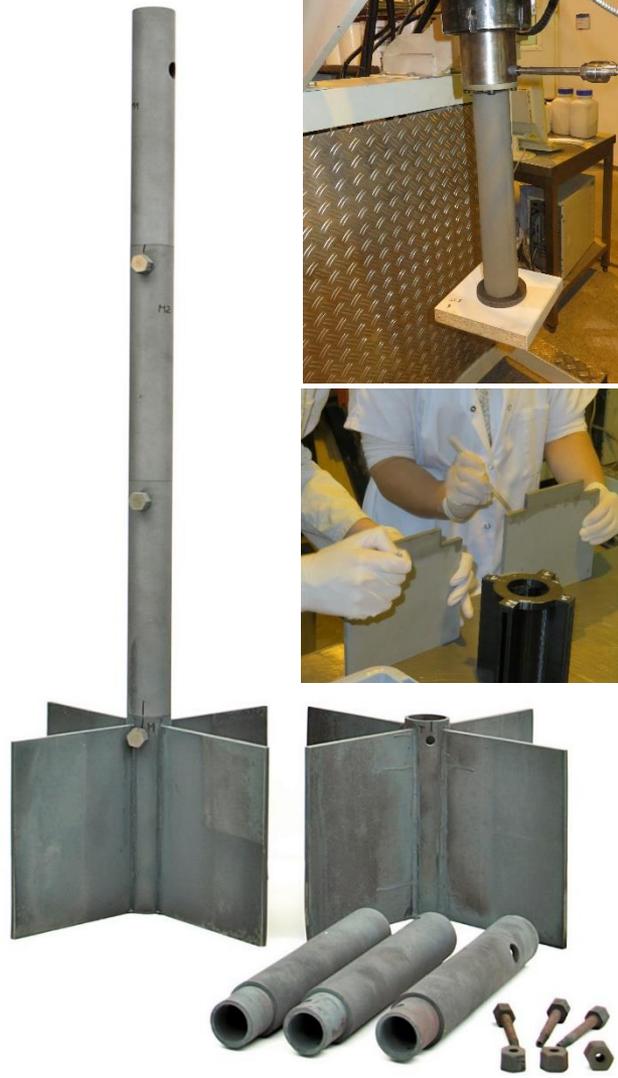


# Metallokeramisches Papier



## FELGENFERTIGUNG Pilotbauteil Rührer für Al-Späneschmelzofen / Recycling

**Elektrisch beheizbar in Al-Schmelze;  
durch die Hochzeit  
Keramik (MgO)/Metall (Stahl)  
auch korrosionsbeständig in  
Al-Schmelzen!**



(L 950 mm, d 350 mm)



## Feuerfest Recycling

**2,5 kg MgO-C Feuerfestmaterialien werden pro Tonne Stahl !**

Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen in t CO <sub>2</sub> /t MgO	A	B
Dekarbonatisierung: MgCO <sub>3</sub> → MgO + CO <sub>2</sub>	0,996	1,06
Direkte Kalzinierung	0,349	0,591
<b>Gesamtsumme</b>	<b>1,344</b>	<b>1,655</b>

### KERNIDEE I – RECYCLING

Feuerfest-Rezyklate für neuartige Feuerfestwerkstoffe

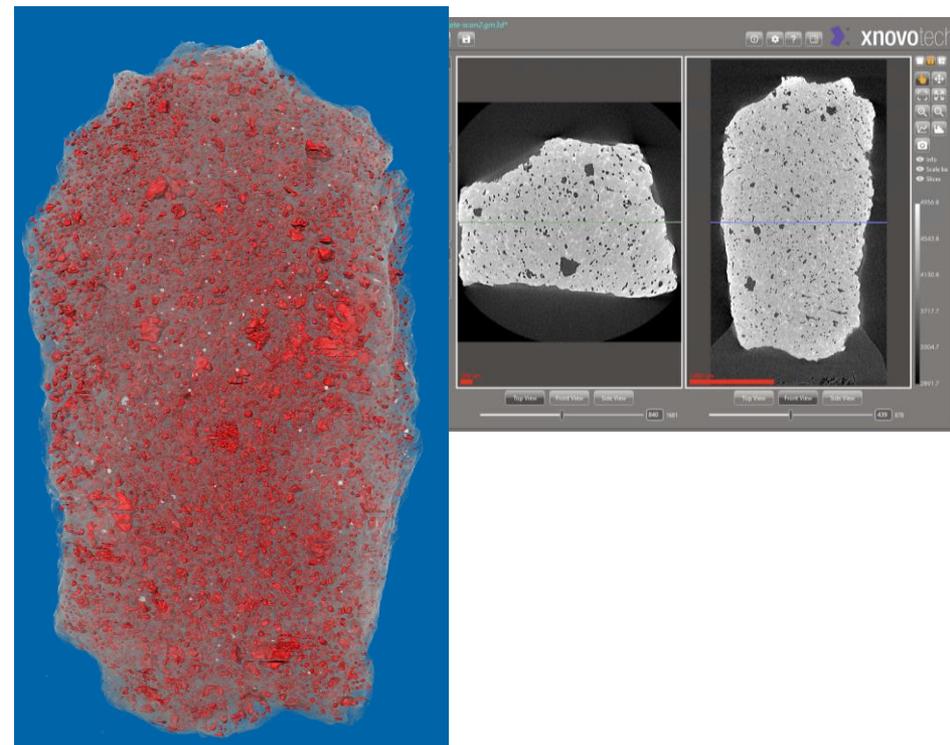
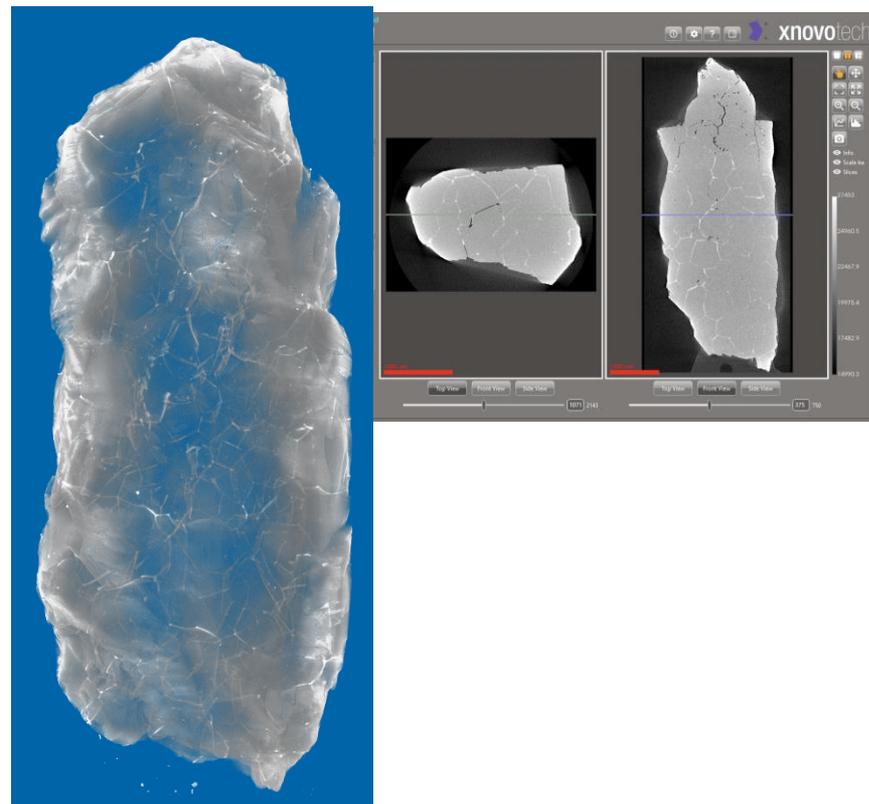
### KERNIDEE II – UPCYCLING

Feuerfest-Rezyklate für neuartige, metallokeramische  
Verbundwerkstoffe für **CO<sub>2</sub>-ärmere metallurgische Prozesse**

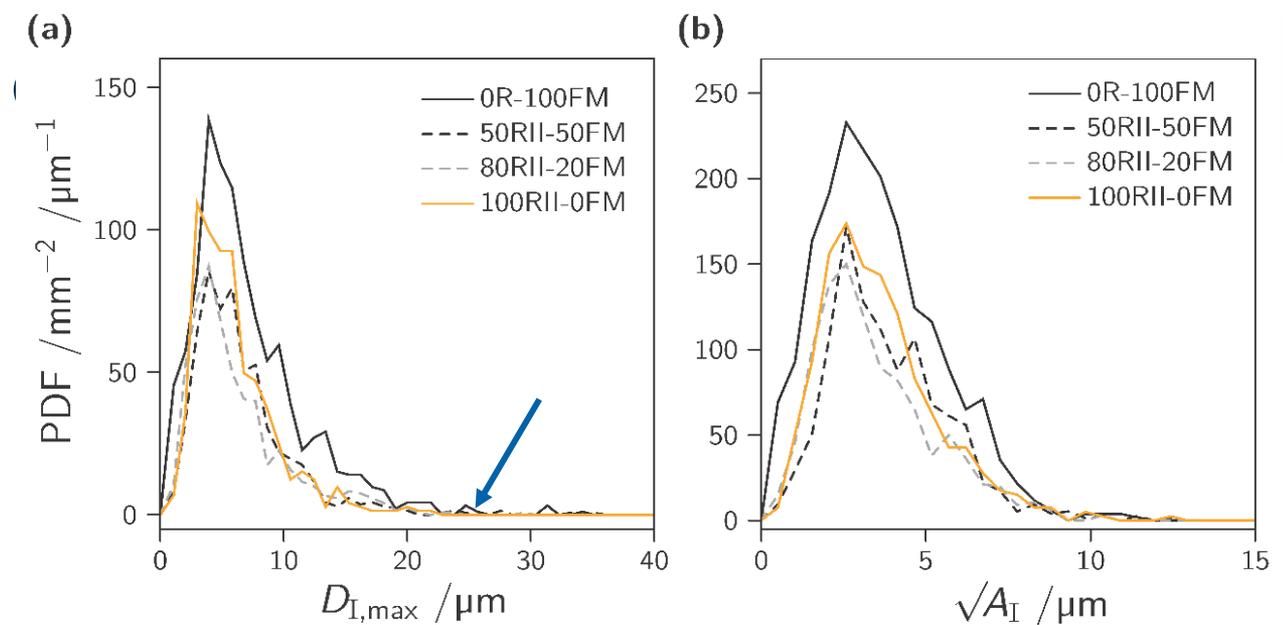
## Absorption Contrast Tomography (ACT)

“Frisches” MgO, 3.02  $\mu\text{m}$  Voxels

MgO-C Rezyklat, 2.33  $\mu\text{m}$  Voxels



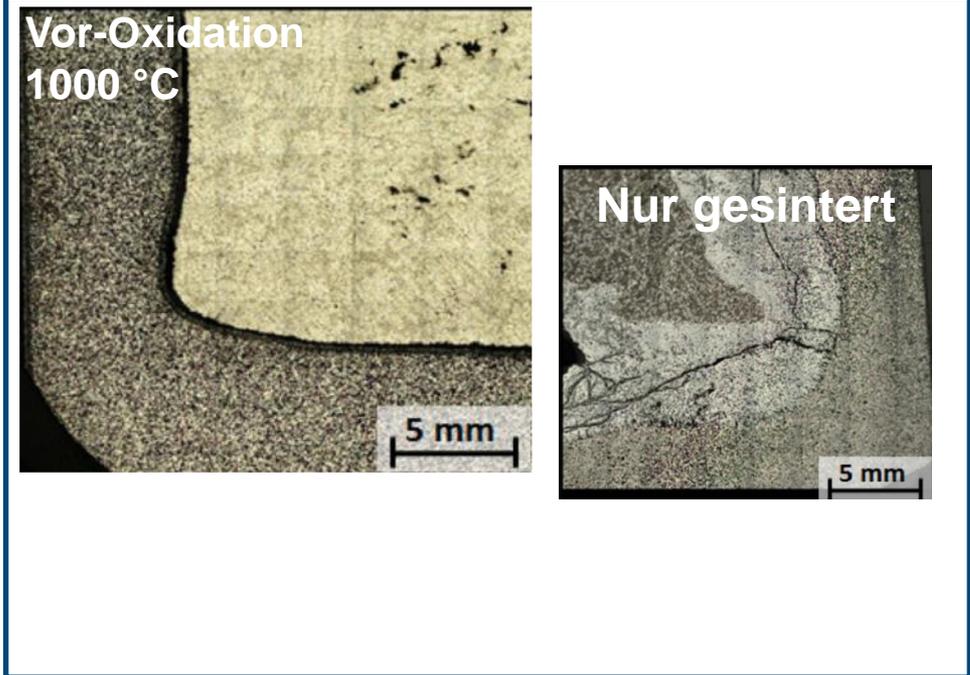
*Einschlüsse im Stahl  
nach dem Einsatz  
im Stahlgusssimulator*



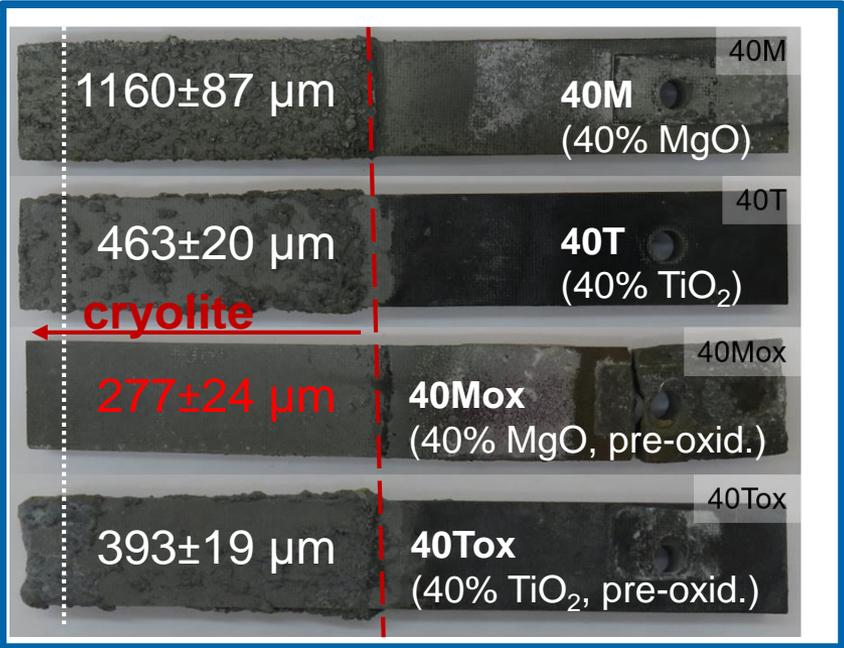
Steel block	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MnS	SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnS	CaO-CaS	Rem.	Total
0R-100FM	98	884	288	64	4659	32	23	6048
50RI-50FM	55	768	36	20	3524	37	49	4489
80RI-20FM	10	640	39	17	3428	27	32	4193
100RI-0FM	90	894	182	43	4181	33	28	5451
50RII-50FM	16	534	2	5	2491	3	7	3058
80RII-20FM	10	508	0	0	3195	3	5	3721
100RII-0FM	10	620	10	9	3755	8	8	4420

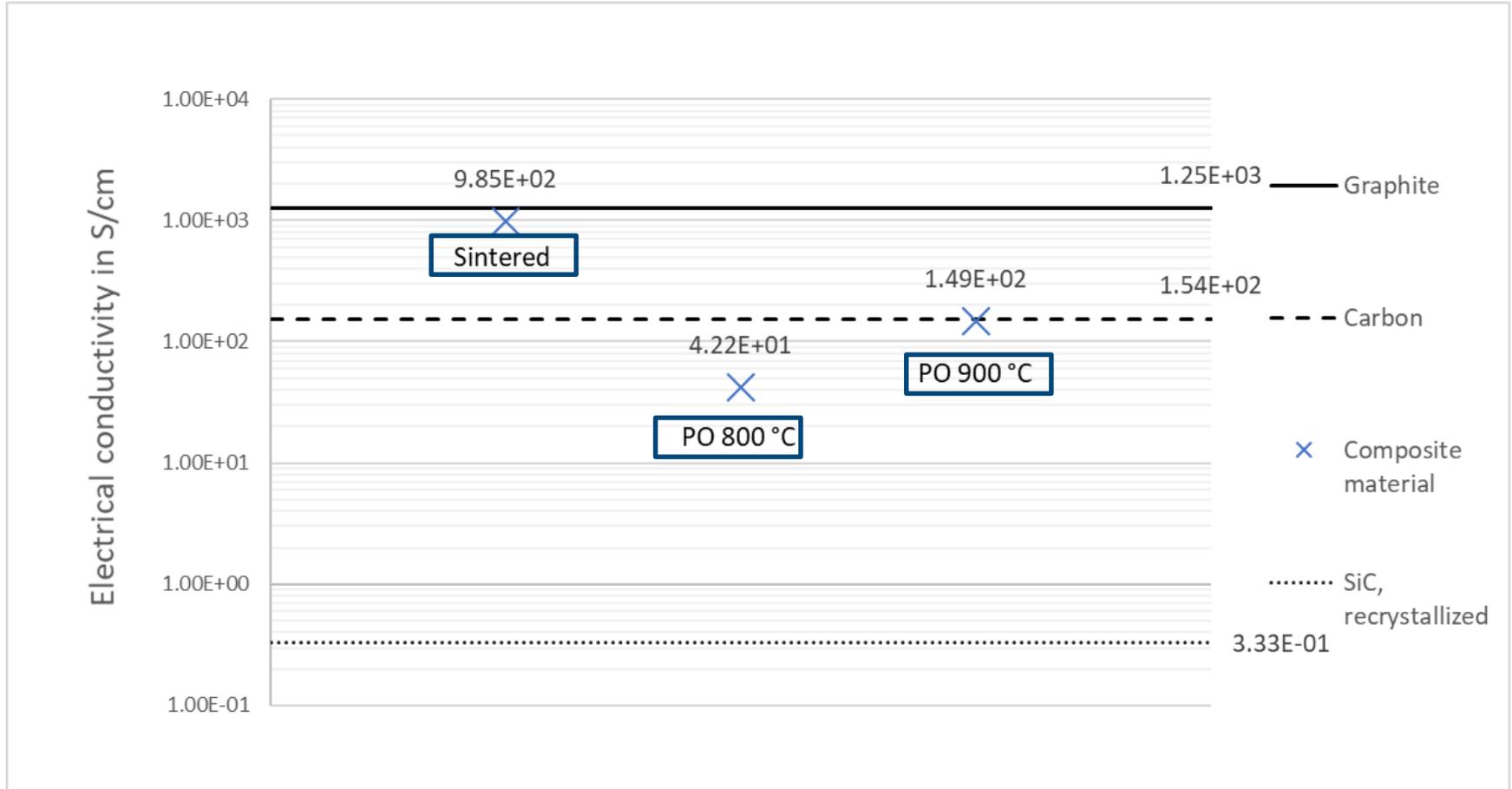
**Vor-Oxidation** bei 1000 °C → erhöhte Korrosionsbeständigkeit  
in Aluminium- und Kryolithschmelzen

**850 °C, 168 h in Al-Schmelze (AlSi7Mg0.3)**



**960 °C, 8 h in Kryolithschmelze**





Deutsches Patent Aneziris, Volkova, Charitos DE 10 2020 005 130

Yaroshevskiy, Weigelt, Malczyk, Wagner, Aneziris et al, Open Ceramics (2023) 16, 100458

# Additive Fertigung für Smart Refractories

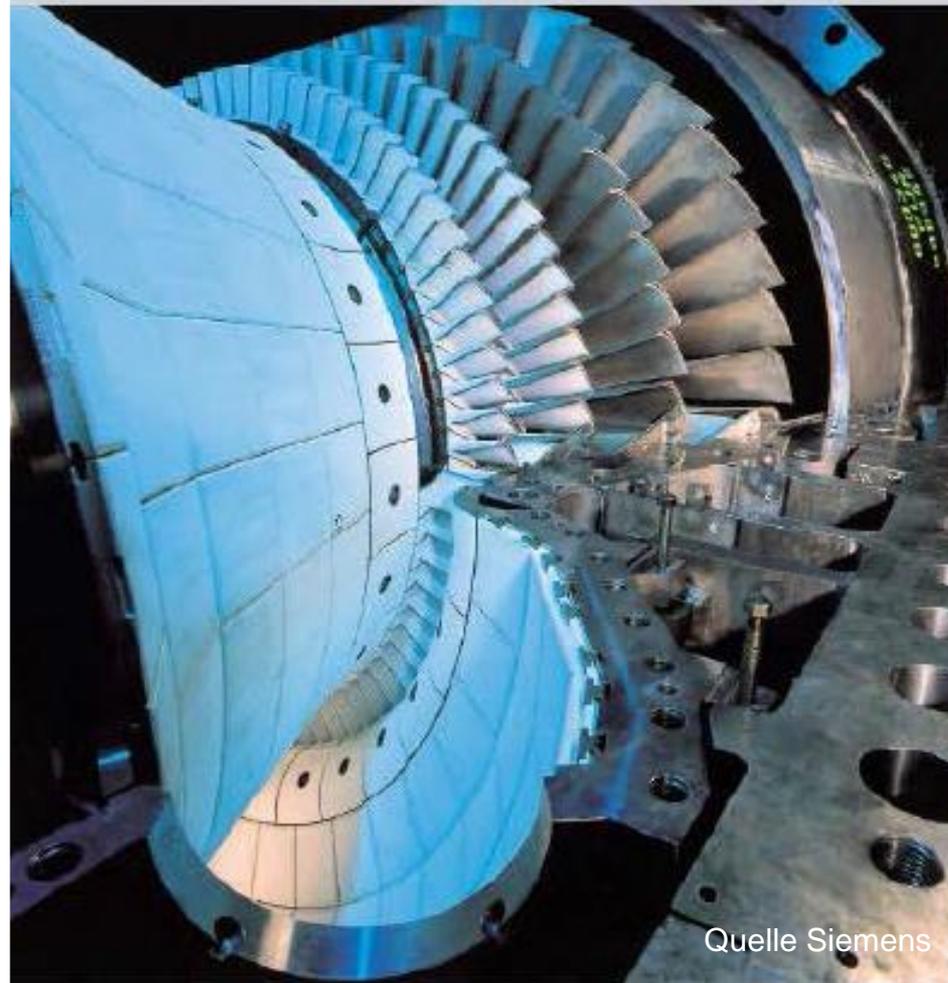
ALUMINIUMOXID

$\text{Al}_2\text{O}_3$

korrosionsbeständig

in

$\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Atmosphären



Quelle Siemens

Aber nicht  
thermoschock-  
beständig!

Temperatur-  
gradienten  
führen  
zu Spannungen

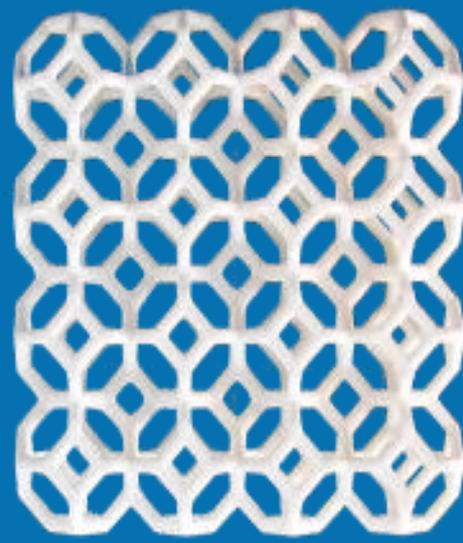
## Stand der Technik → Vision

30 cm

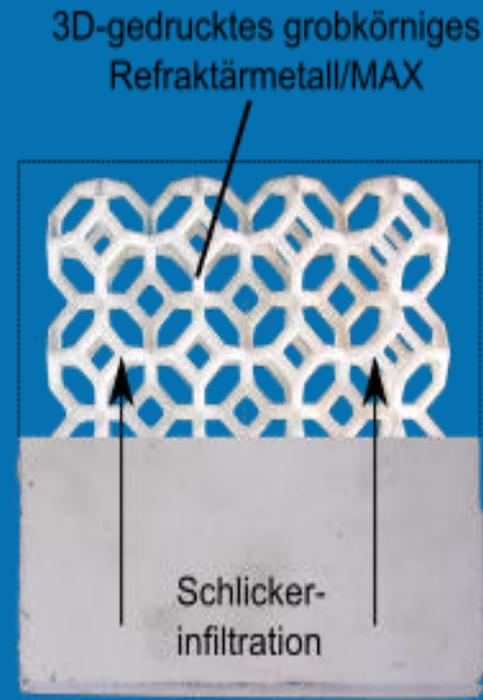
15 cm



+



=



Druckschlickerguss

3D-Druck

beheizbares Hitzeschild

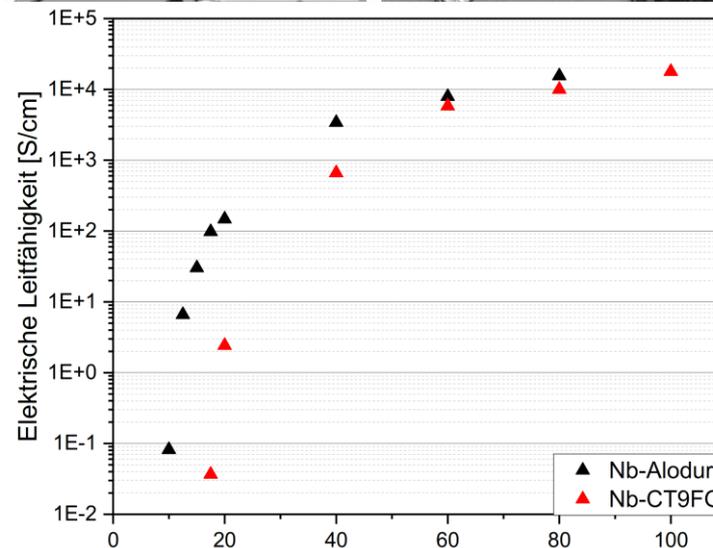
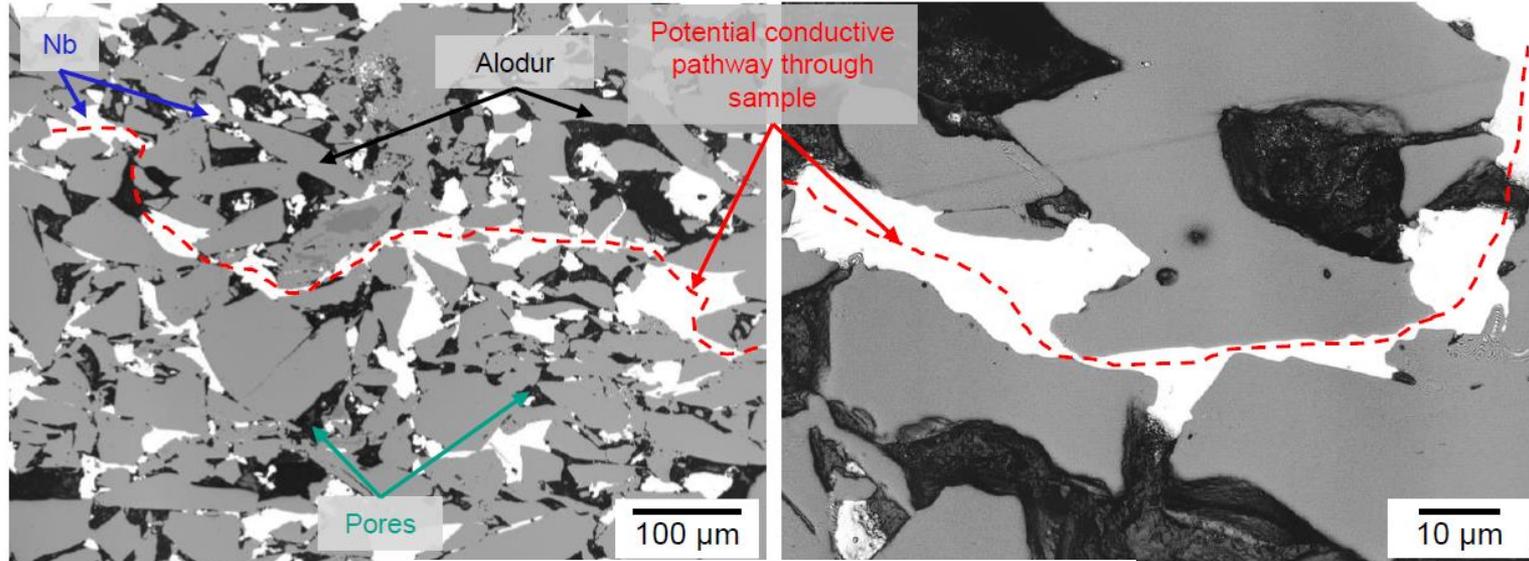
**Mullit-freies Werkstoffsystem, höhere Einsatztemperatur  
höhere Energieeffizienz!**

**Forschungsgruppe FOR 3010: REFRABUND**

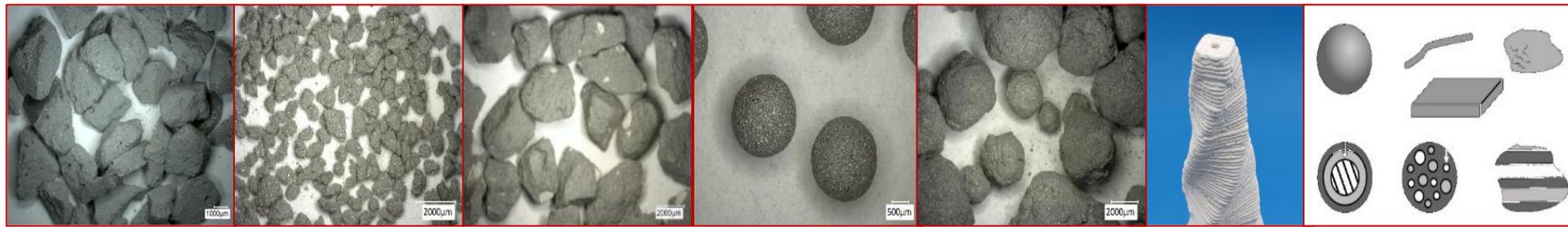
Multifunktionale, grobkörnige,  
**refraktäre Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde** für großvolumige  
Schlüsselbauteile in Hochtemperaturprozessen

**Tantal und Aluminiumoxid, grobkörnig!**  
**Niob und Aluminiumoxid, grobkörnig!**

Durch vorgesinterte Grobkörnungen,  
sehr geringe Schwindung  
große Bauteile sind herstellbar!



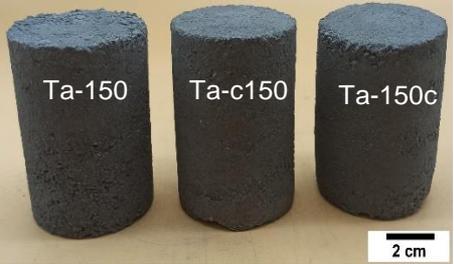
# Vorsynthese funktionaler Grobkörnung



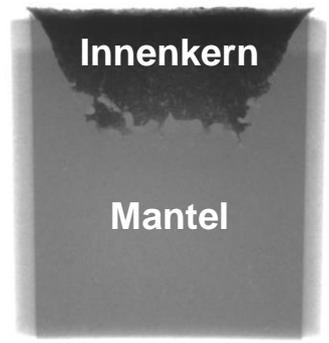
**Verbundwerkstoff**



**Werkstoffverbund**  
 Mantel:  $Al_2O_3$  & Kern: 60/40 Nb/  $Al_2O_3$



**Gegossen,**  
 max. Korn 3150 µm,  
 60/40-Nb/CT9FG

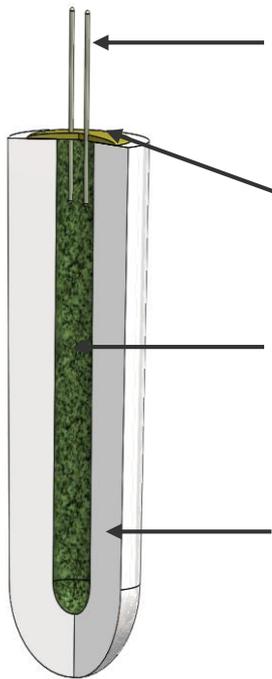


**Zyklisch, kaltisostatisch  
 gepresst, max. Korn 3150 µm**

**Schlickergegossen,  
 CT-Aufnahme, 200x200x30 mm<sup>3</sup>**

# Werkstoffverbunde: Elektroden in oxidischen Strukturen (3D gedruckt oder gegossen)

L: 340 mm

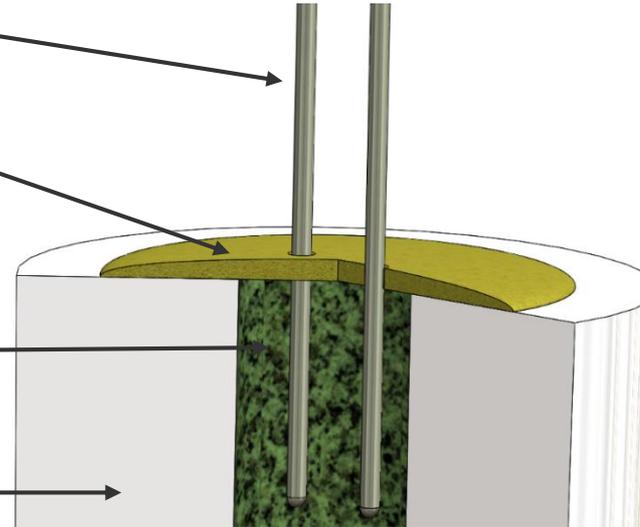


Wolfram Kontaktelektroden  
D: 2 mm

Flammgespritztes  
Aluminiumoxid  
H: 1,5 mm

Kern-  
Hauptelektrode  
**Nb / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0-3 mm**  
D: 10 mm

Shale  
**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0-3 mm**  
D<sub>out</sub>: 40 mm  
Wandstärke: 15  
mm



**FOR 3080**  
**DFG**



Mehrfach einsetzbare Innen-Heizelektroden:  
Stahl/MgO bis 1000 °C, SiC oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C bis 1550 °C,  
Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bis 1650 °C, MoSi<sub>2</sub> bis 1780 °C, Ta-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bis 1850 °C

Aggregate (2 bis 6 mm) + Binder



©Desamanera

Wasser



©Desamanera

Große Bauteile



©Desamanera

Patentanmeldung Aneziris, Storti, Dudczig, DE 10 2021 006 060.1, 08.12.21

Titel: Verfahren und Bindemittelsystem für die Herstellung von Bauteilen auf der Basis von Keramiken, Metallen und metallokeramischen Verbundwerkstoffen mittels des Binder Jetting 3D-Verfahrens“

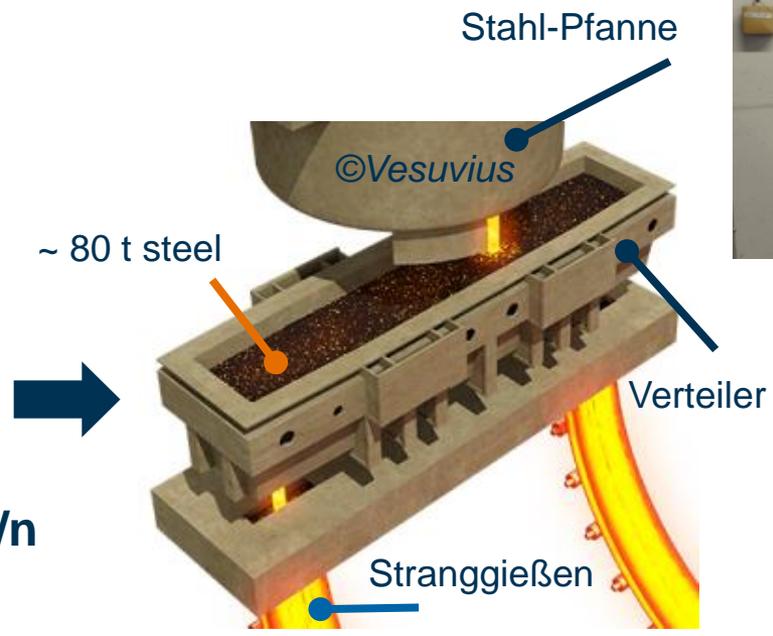
## *Wasserdüsen*





## „KOMPLETTE ELEKTRIFIZIERUNG MIT GRÜNEM STROM“

Die Vision:  
**integrierte Heizelemente**  
 zum Vorheizen **ohne Gas**,  
 keine Vorheizposition,  
 kein Zeit- und Energieverlust  
 beim Transport des Verteilers  
 über die Gießposition  
 und in Kombination mit  
**Mikrowellenplasmabrenner/n**  
 zum Schmelzen oder Sintern  
 oder...



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

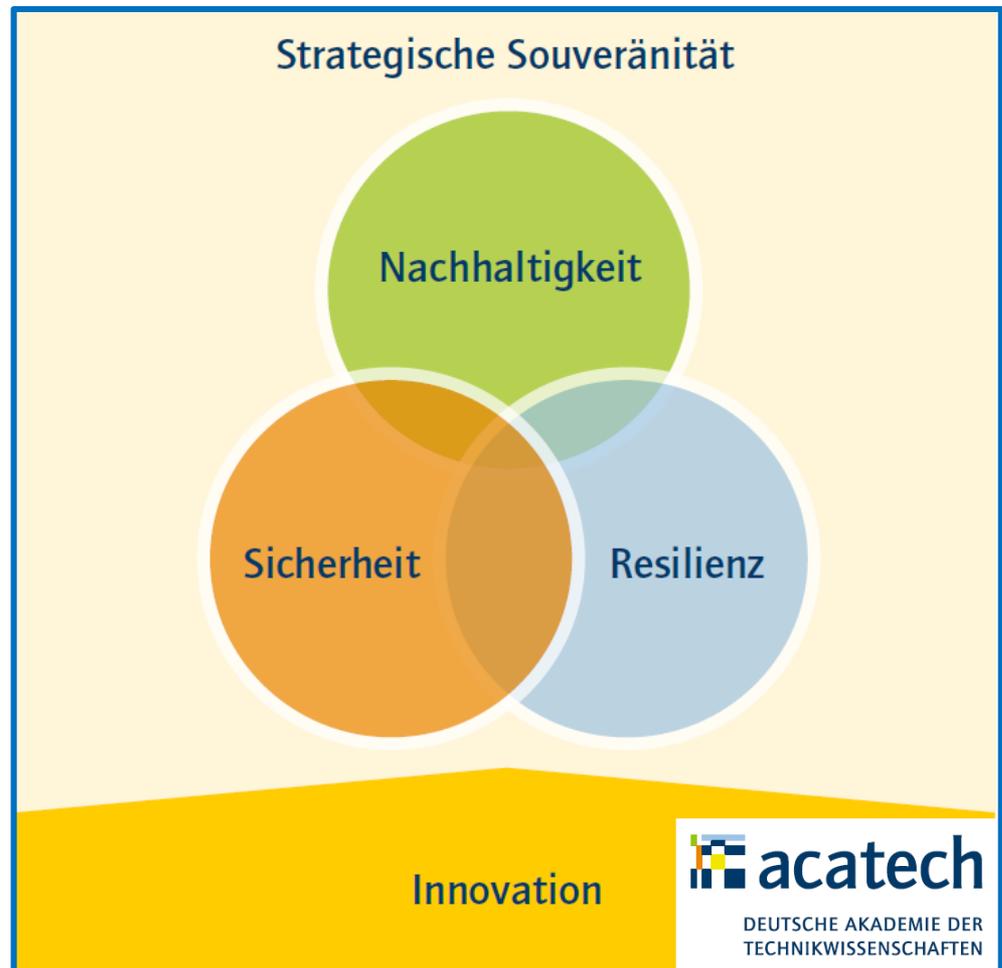
Mikrowellenplasmabrenner mit einem weiteren Brenner, Deutsches Patent 10 2021 004 675 und PCT  
 Elektrische Heizer und Mikrowellenplasmabrenner, Deutsche Patentanmeldung 10 2022 122 280.2 und PCT  
 Integrierte Heizelektroden/Werkstoffverbund, Deutsche Patentanmeldung 10 2022 001 073.9 und PCT

Statt von “Alternativen” sollten wir von der nachhaltigen Gestaltung der Zukunft sprechen. Dabei geht es um höhere Effizienz, weniger CO<sub>2</sub> Leichtbaukonstruktionen und multifunktionale Verbundwerkstoffe bzw. Werkstoffverbunde

Werkstoffe für  
Prozesse



Prozesse  
für Werkstoffe



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Herzlichen Dank an die DFG,  
an das BMWK, an das BMBF und  
an unsere Industriepartner!



TU BERGAKADEMIE FREIBERG  
Institut für Keramik, Feuerfest und Verbundwerkstoffe  
Agricolastr. 17  
09599 Freiberg  
Tel. +49(0)3731 39-2505  
aneziris@ikfvw.tu-freiberg.de

<https://tu-freiberg.de/ikfvw>