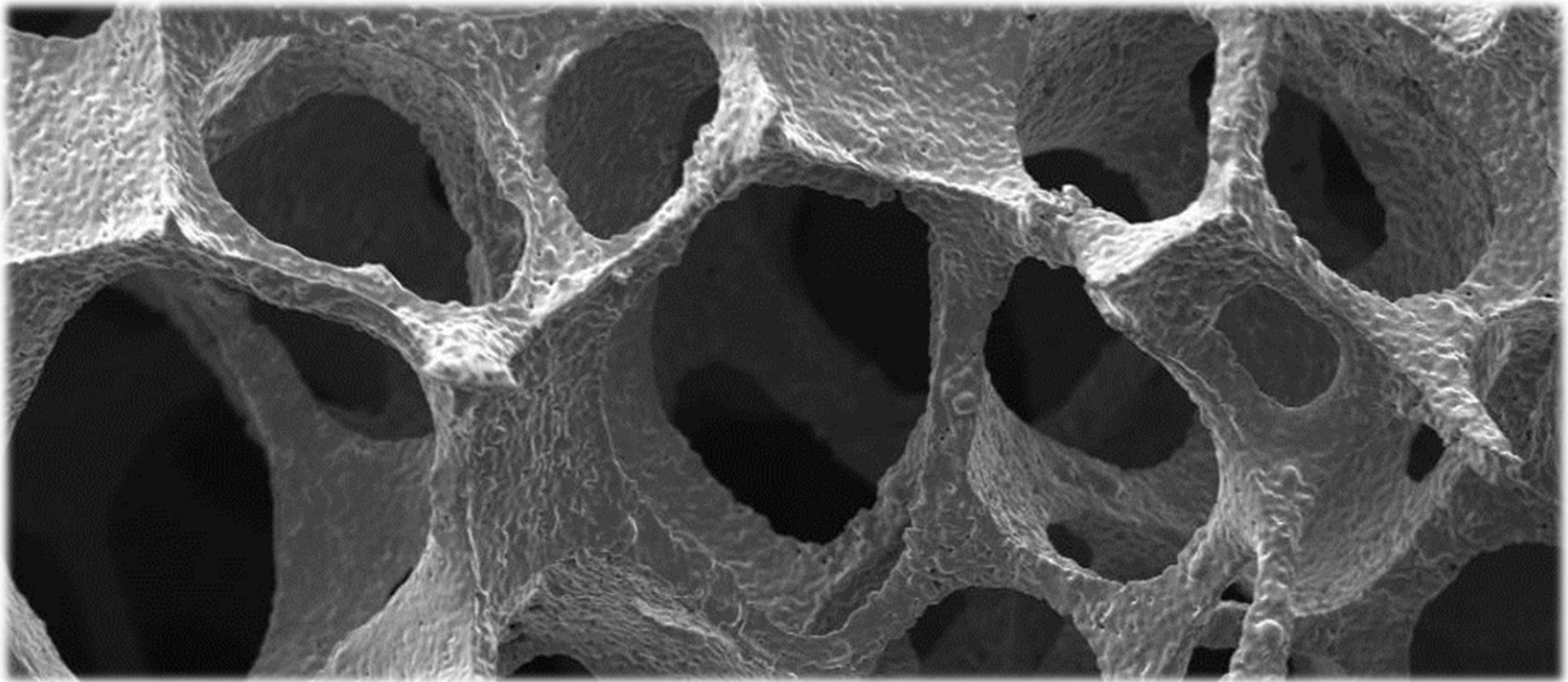
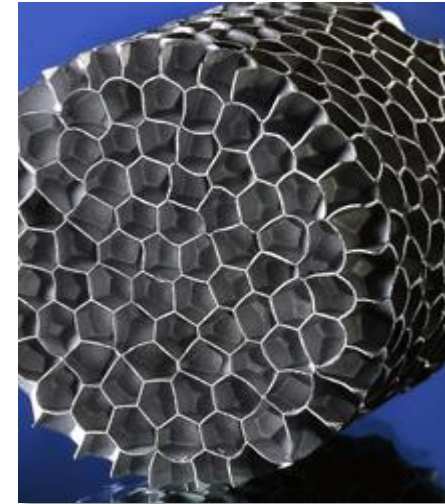

AKTUELLE ENTWICKLUNGEN AUF DEM GEBIET DER ZELLULAREN METALLISCHEN WERKSTOFFE – POTENZIALE FÜR DIE ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG UND CHARAKTERISIERUNG

VDI-TUM Expertenforum 2016
Olaf Andersen (Fraunhofer IFAM, Institutsteil Dresden)



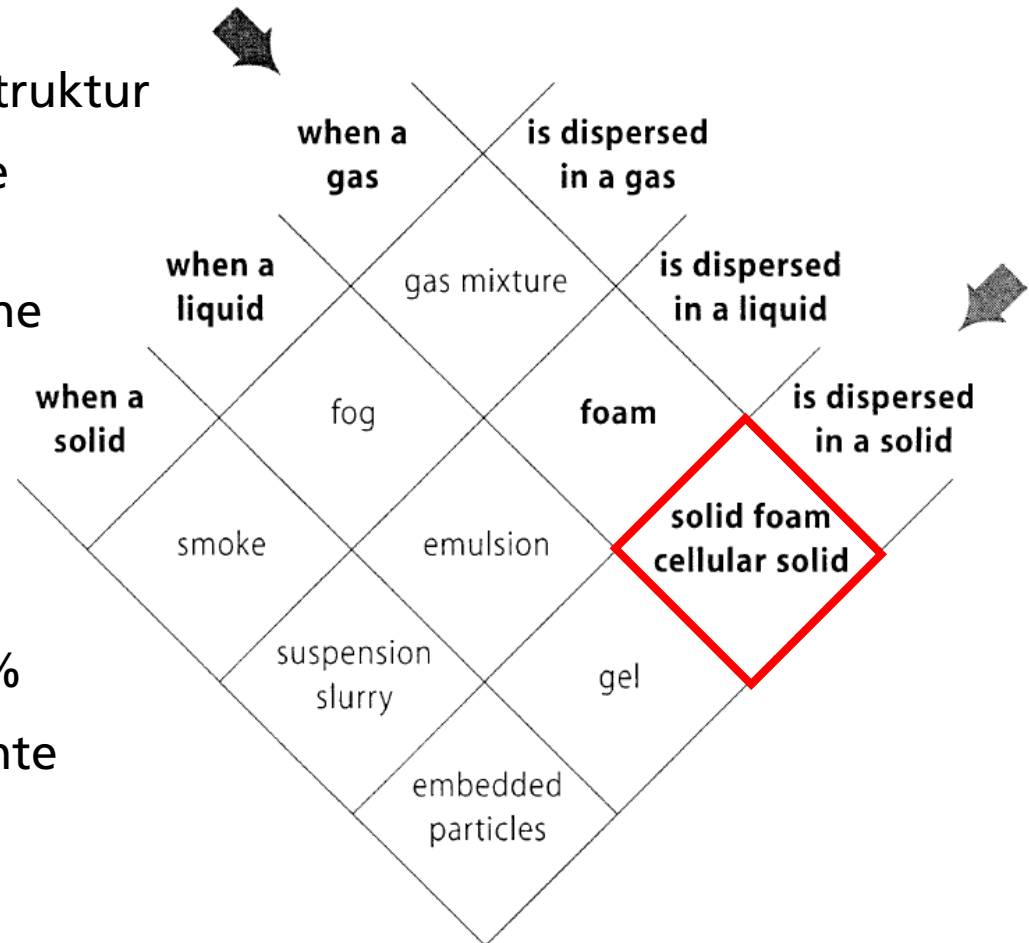
Inhalt

- Einordnung Zellulare Metalle
- Überblick Anwendungen und Messverfahren
- Quantitative CT - Projekt NORMZELL
- Zusammenfassung



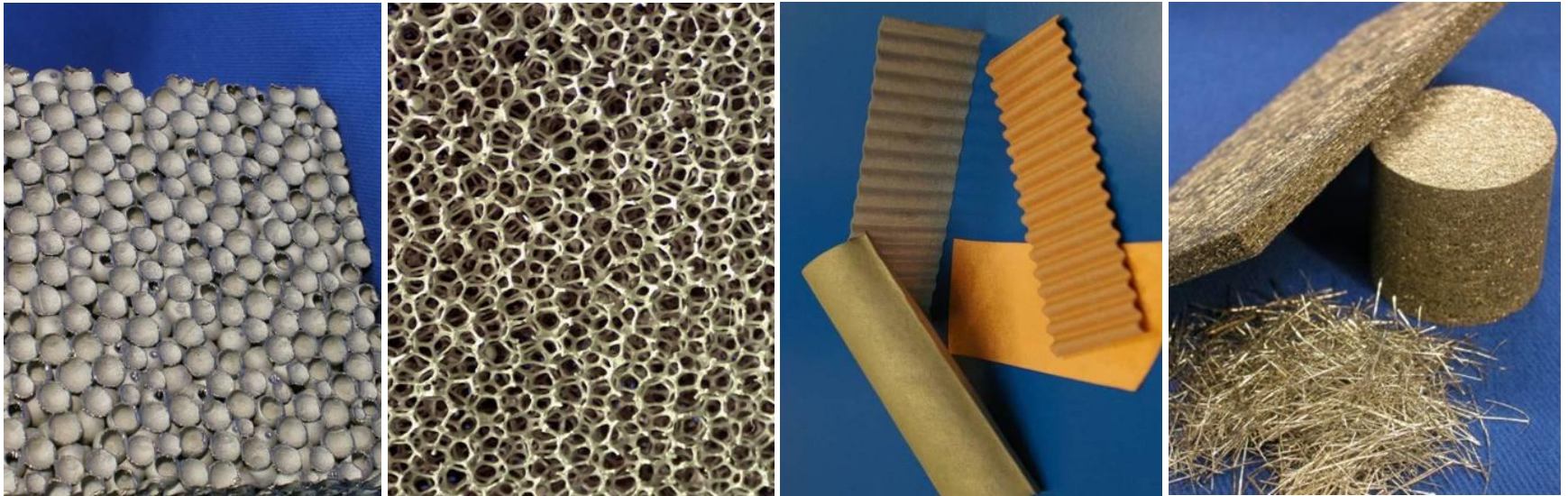
Definition Schaum vs. zelluläre metallische Werkstoffe

- Schaum: geschlossene Zellstruktur
- Definition Zelluläre Metalle (ZMW):
 - Offene oder geschlossene Zellen
 - Porosität > 50 %
 - Porosität in %:
Porenvolumen /
Gesamtvolumen * 100 %
Kehrwert = relative Dichte



J. Banhart: Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science 46 (2001) 559–632

Anwendungsbezogene Entwicklung zellularer Metalle

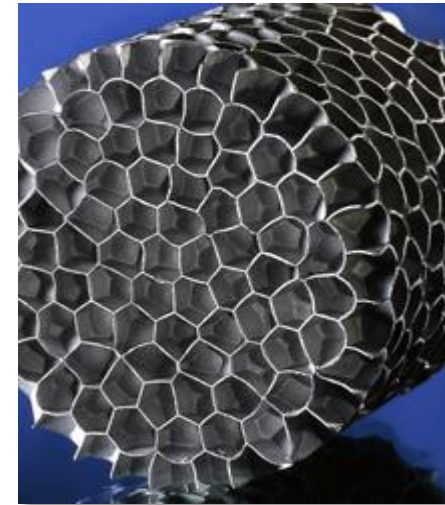


Sinnvoller Einsatz i.d.R. in Verbindung mit funktionellen Eigenschaften:

- Energieabsorption (Schall, Vibrationen, elektromagn. Wellen)
- Bauteilschutz (Crash, Verschleiss)
- Wärmeleitung und Verteilung, Wärmeisolation
- Medizintechnik: Knochen-Ersatz und Einwachshilfe

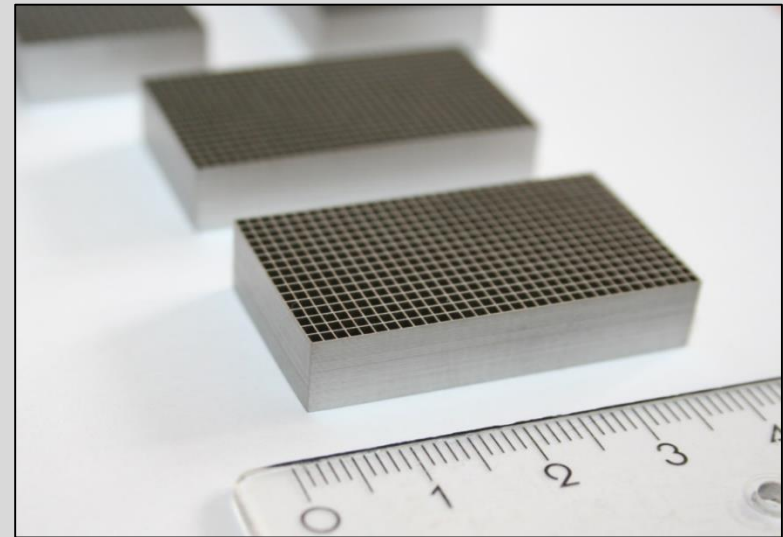
Inhalt

- Einordnung Zellulare Metalle
- Überblick Anwendungen und Messverfahren
- Quantitative CT - Projekt NORMZELL
- Zusammenfassung



Tungsten parts for medical technology

- Tungsten composite material, part height: 7.5 mm
- Savings of 80 % concerning raw materials and energy input
- Required geometrical tolerances of +/- 20 μm partially achieved
- TRL 4, next steps: improved design, process stability, productivity



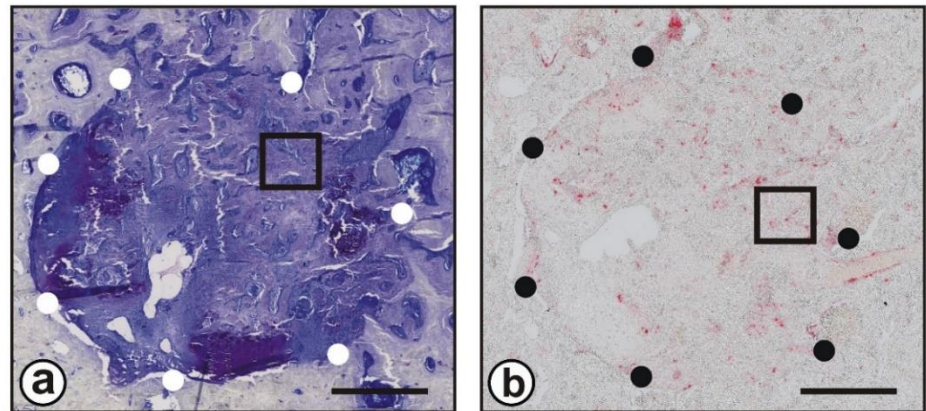
Resorbierbares Knochenimplatrat aus versinterten Mg-Fasern

- Entwicklung einer Flüssigphasen-Sinterroute für Mg-Y-Legierungen
- Zum Patent angemeldet, lizenziert an botiss AG, Berlin
- Derzeit Prüfung der industriellen Umsetzung zusammen mit der botiss AG



← Faserblank \varnothing 100 mm zur spanenden Weiterbearbeitung für patienten-angepasste Implantate

MgY4-Faserstruktur nach 12 Wochen fast komplett durch neuen Knochen ersetzt



Wärmegetriebene Kältemaschinen

Die SorTech AG aus Halle baut bereits Geräte, die nach diesem Prinzip funktionieren:

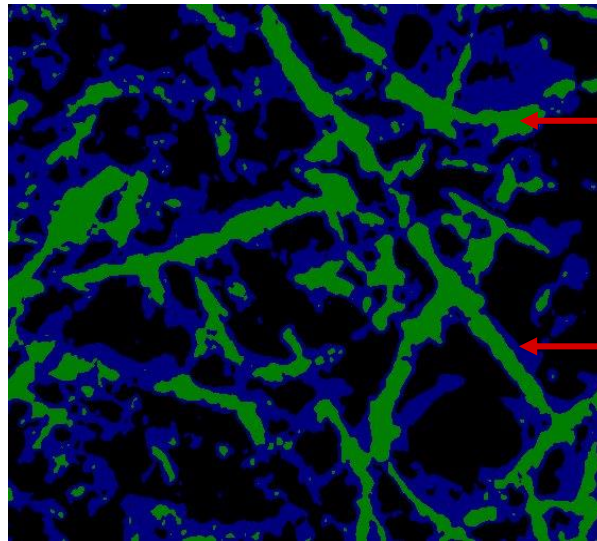
- Antrieb durch (Ab-)Wärme aus BHKWs, Solarthermie-Anlagen, Nah- und Fernwärmestationen oder industriellen Prozessen
- Kältemittel = Wasser → ungiftig und nicht brennbar
- Absorber neuester Generation = zeolithbeschichteter konventioneller Lamellen-Wärmetauscher



 SorTech

Application in adsorption heat accumulators

- Adsorber made of thin zeolite layers (SorTech AG, Germany) on highly heat conducting fibre network with high specific surface area (5,000 to 25,000 m²/m³)
- Lab test samples reach a power density of 4 kW/l with cycling times in the range of a few minutes; achieved value for real-life adsorber including heat exchanger architecture is > 0.5 kW/l



green: heat conducting AlCu5 fiber network

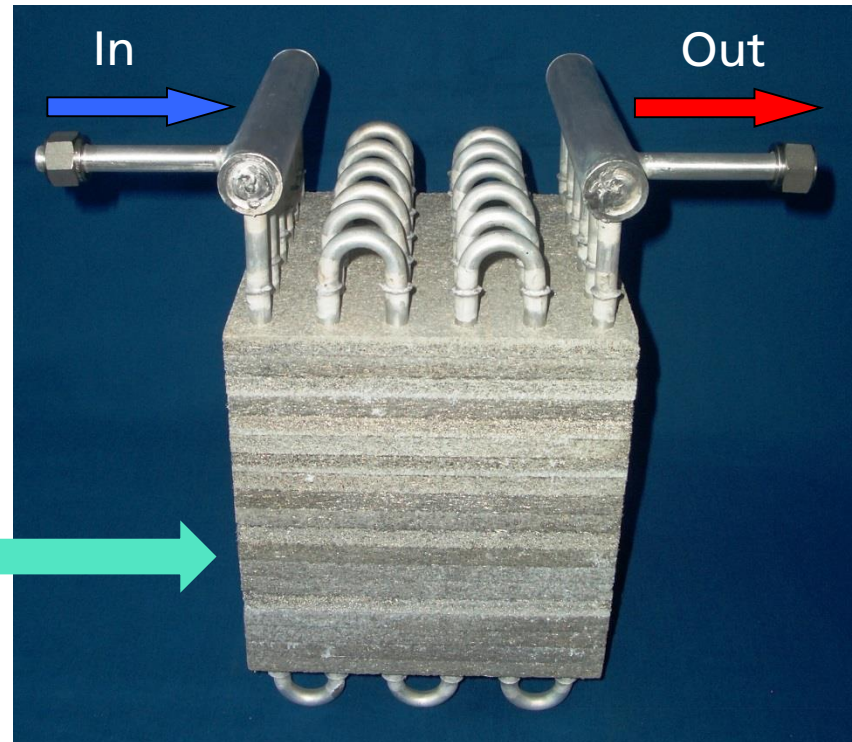
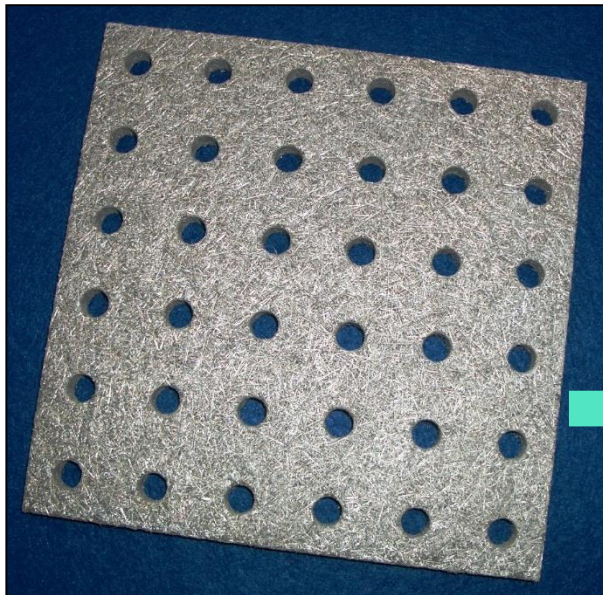
blue: zeolite layers

Tomography image
courtesy of FhG ITWM

Schnelle Latentwärmespeicher

Lösungsansatz:

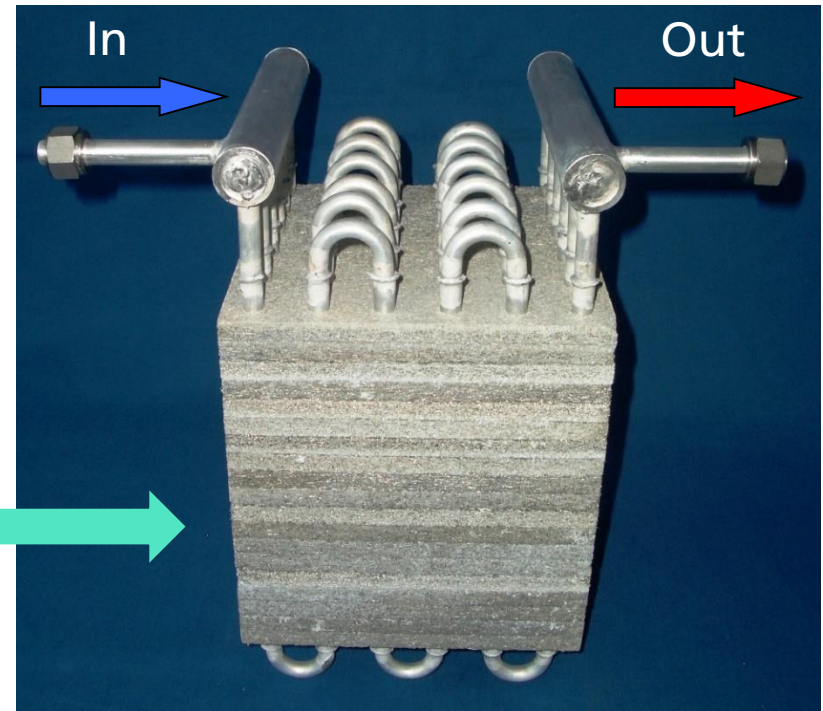
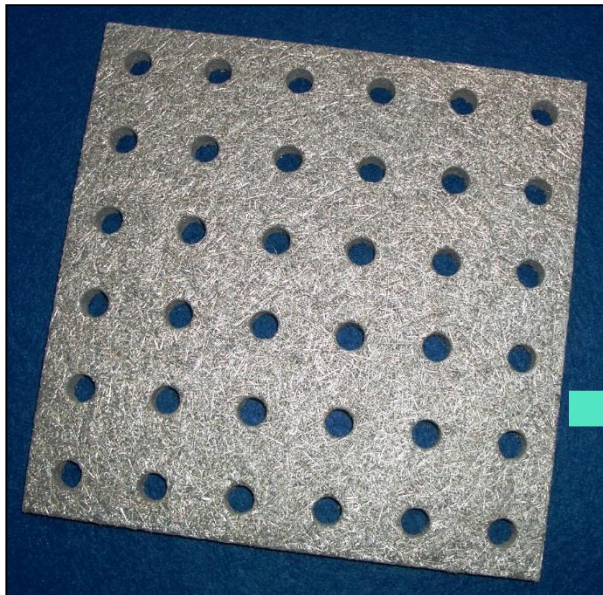
- Versinterte AlCu5-Faserplatten, Porosität 80 %, Gesamtvolumen ca. 8 l
- Verrohrung wird mechanisch aufgeweitet
- Füllung: Paraffin RT 42
- Speicherkapazität: 0,4 kWh



Schnelle Latentwärmespeicher

Lösungsansatz:

- Versinterte AlCu5-Faserplatten, Porosität 80 %, Gesamtvolumen ca. 8 l
- Verrohrung wird mechanisch aufgeweitet
- Füllung: Paraffin RT 42
- Leistung 2 kW, Speicherkapazität 0,4 kWh



Metallographische Ermittlung der Fasereigenschaften

- Ausrichten und Einbetten von ca. 500 Einzelfasern
- Anfertigung von Querschliffen
- Auswertung per Bildanalyse: kreisäquivalenter Durchmesser, spezifische Oberfläche (typisch: 20.000 bis 100.000 m²/m³)
- Längenverteilung: Auswertung Scanner-Bild



Sample No.	Mean Equivalent Diameter (Metallography) (µm)	Standard Deviation of Diameter (Metallography) (µm)	Mean Length (mm)	Standard Deviation of Length (mm)
490040_0201 (V633)	164	49	4.5	0.9
201596_0004 (V636)	138	47	6.3	1.5
(V641-1)	107	36	5.6	1.7

Poröse Metallfolien

BMBF-Projekt BamoSa

Herstellung: Foliengießen mit Metallpulver /
Platzhalter-Suspensionen

Porengrößen: 30 bis 350 μm

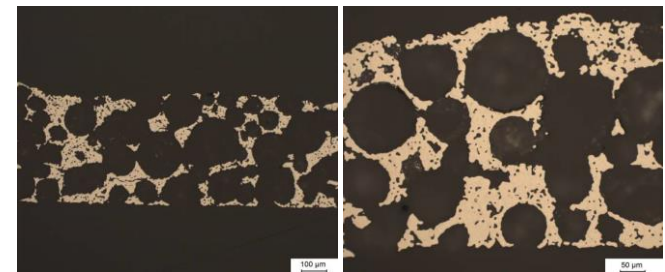
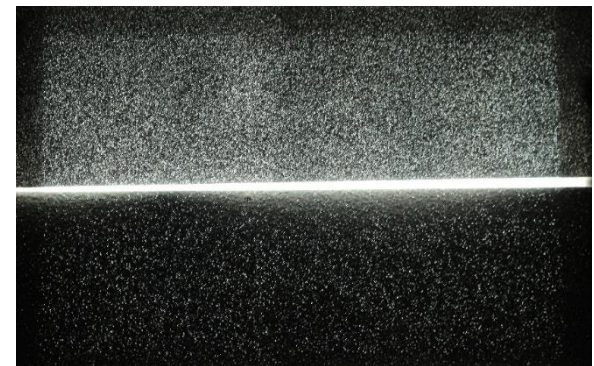
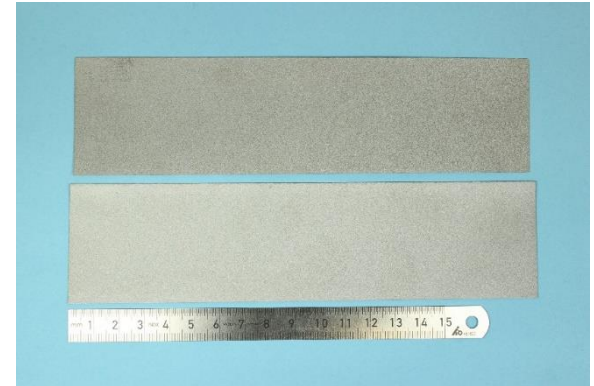
Porosität: 70 bis 85 %

Dicke: 200 μm bis 2,5 mm

Material: Fe, 316L, TiAl6V4, Cu....

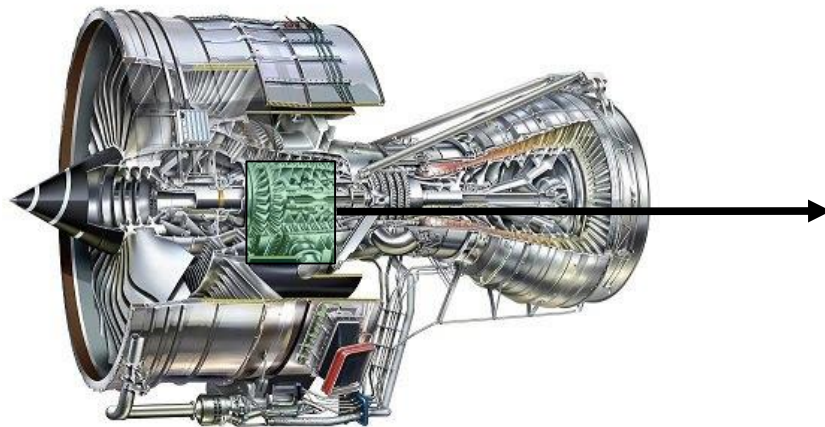
Anwendungsgebiete:

- Batterietechnik, Elektrochemie
 - Poröse dreidimensionale Elektroden
- Biotechnologie
 - Trägermaterialien für Biosensoren und Membranen
- Mechanischer Schutz
 - Druck- und Gassensoren



Abradable sealings made from hollow sphere structures

BMBF project MEINDMAP



Hochdämpfende Leichtbauwerkstoffe

Mittelstandsorientierte Eigenforschung der Fraunhofer-Gesellschaft

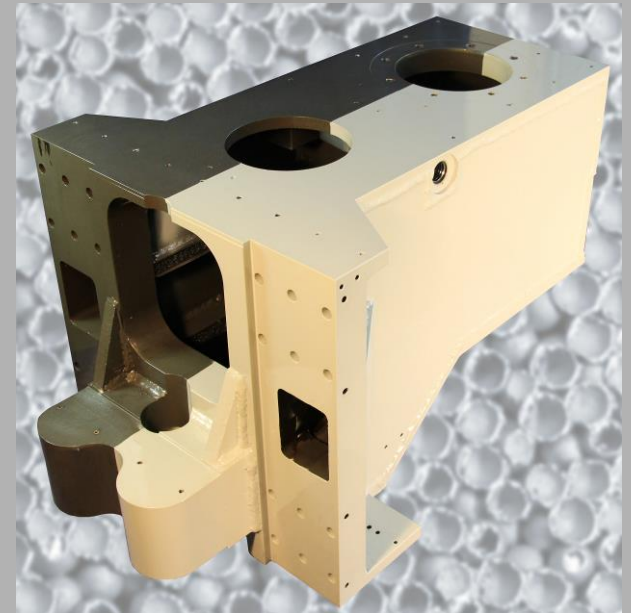
Verbesserung der Bearbeitungsgenauigkeit eines Frässlittens

Ziele

- Gewichtsreduktion des Schlittens
- Höhere Eigenfrequenzen
- Höhere Dämpfung der Eigenfrequenzen

Projektansatz

- Verwendung partikelgefüllter Hohlkugelstrukturen zur Schwingungsdämpfung
- Einsatz verlöteter Sandwich-Strukturen an kritischen Positionen



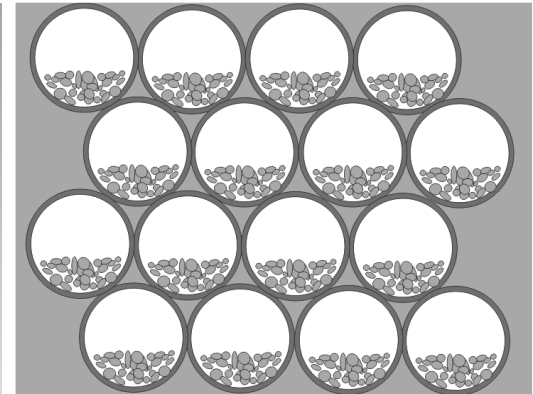
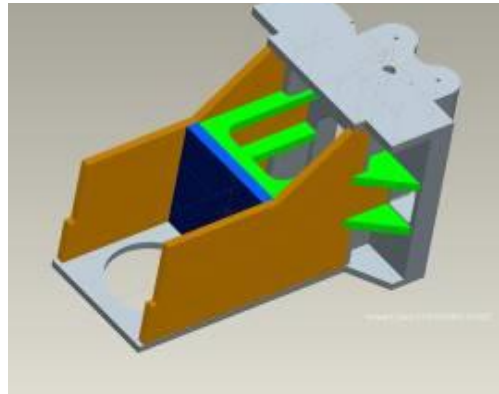
Lösungsansatz für Spindelhalter HS-Fräsmaschine

Mittelstandsorientierte Eigenforschung der Fraunhofer-Gesellschaft

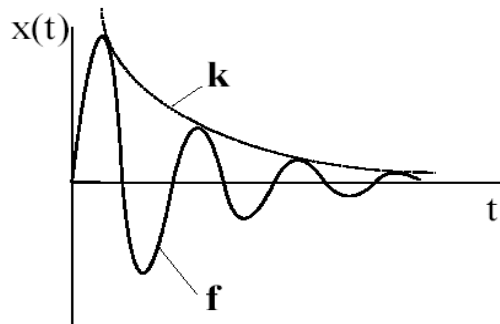
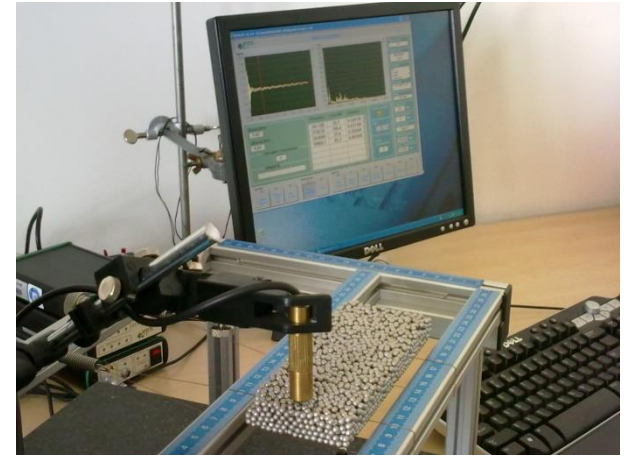
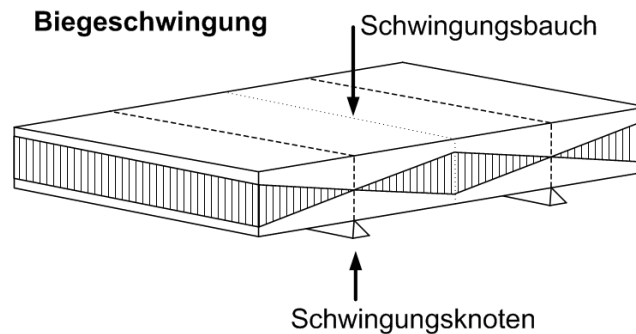
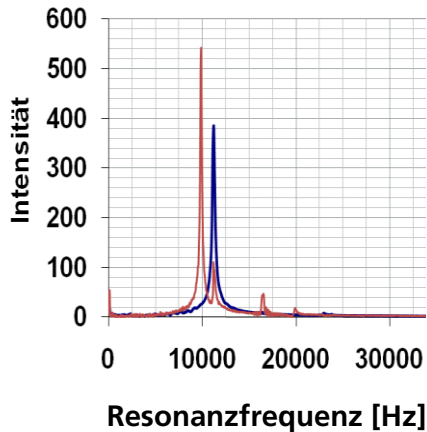


Partikelgefüllte HKS als Sandwichkern

- Hochdämpfende Eigenschaften
- Werkstoff hochfester Edelstahl
- Geringere bewegte Masse
- Besseres Positionierverhalten des Fräskopfes



Resonanzfrequenz-Dämpfungsanalyse (RFDA)

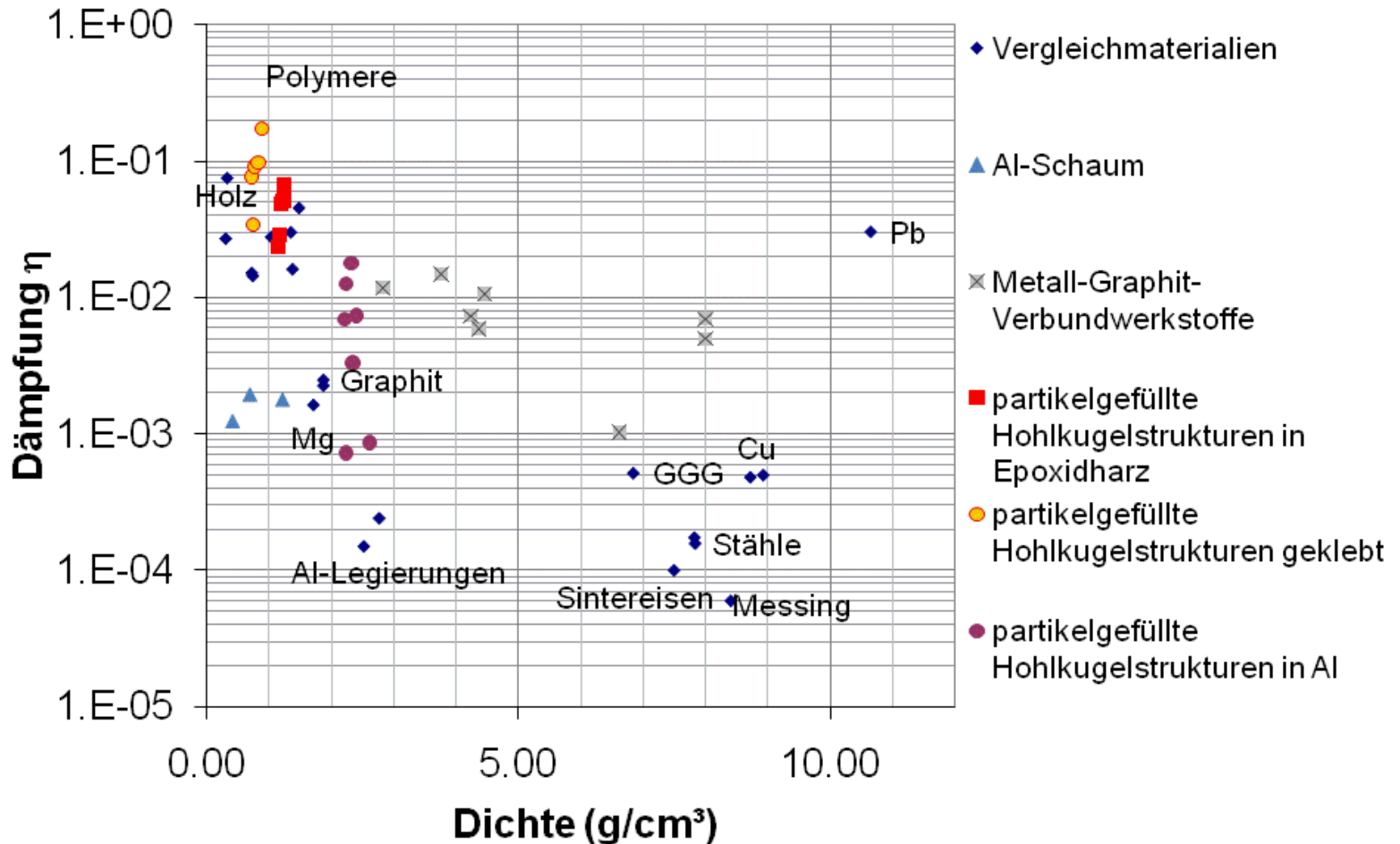


$$x(t) = A \cdot e^{-kt} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

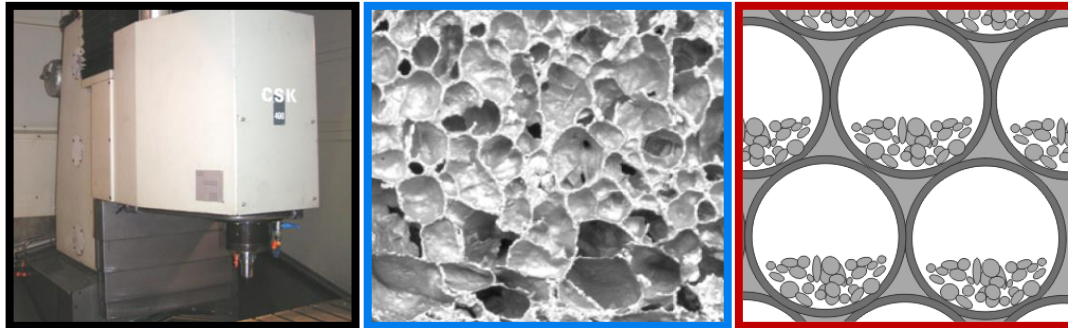
Methodik:

- Hochauflösende Aufzeichnung des abgestrahlten Schalls am Schwingungsbauch
- Fouriertransformation der Signals
- Ausgabe von Resonanzfrequenz, Dämpfung und E- und G-Modul (nicht möglich bei anisotropen Werkstoffen)

RFDA-Dämpfungswerte partikelgefüllter HKS



Ergebnisse der Spindelhalter-Vermessung



	Original	Al-Schaum- schlitten	Hohlkugel- schlitten $m_{\text{Al}_2\text{O}_3} / m_{\text{Me}} = 0,23$	Ziel
Masse- reduktion	0	6 %	10 %	möglichst hoch
1. Eigen- frequenz	530 Hz	605 Hz	558 Hz	möglichst hoch
Dämpfung	0,03	0,16	0,16	möglichst hoch
Nachgiebig- keit	895 nm/N	461 nm/N	408 nm/N	möglichst gering

Mechanische Eigenschaften von ZMW

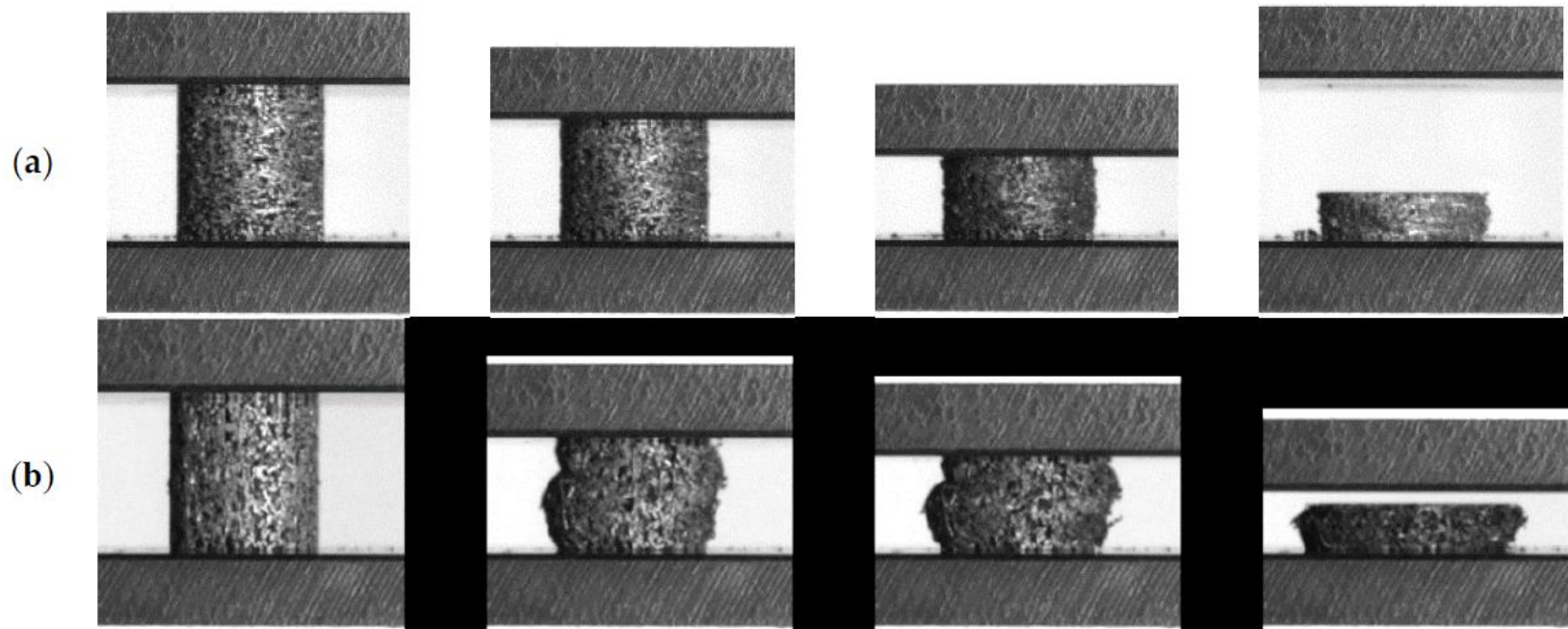


Figure 2. Photographs of the quasi-static sample deformation in dependence of the direction of loading: (a) Loading perpendicular to main fiber orientation (relative density of the sample: 0.27); and (b) loading parallel to main fiber orientation (relative density of the sample: 0.22).

O. Andersen, M. Vesenjajk, T. Fiedler, U. Jehring and L. Krstulovic-Opara, Materials 2016, 9, 398; doi:10.3390/ma9050398

Zulässige reversibel elastische Belastung von ZMW

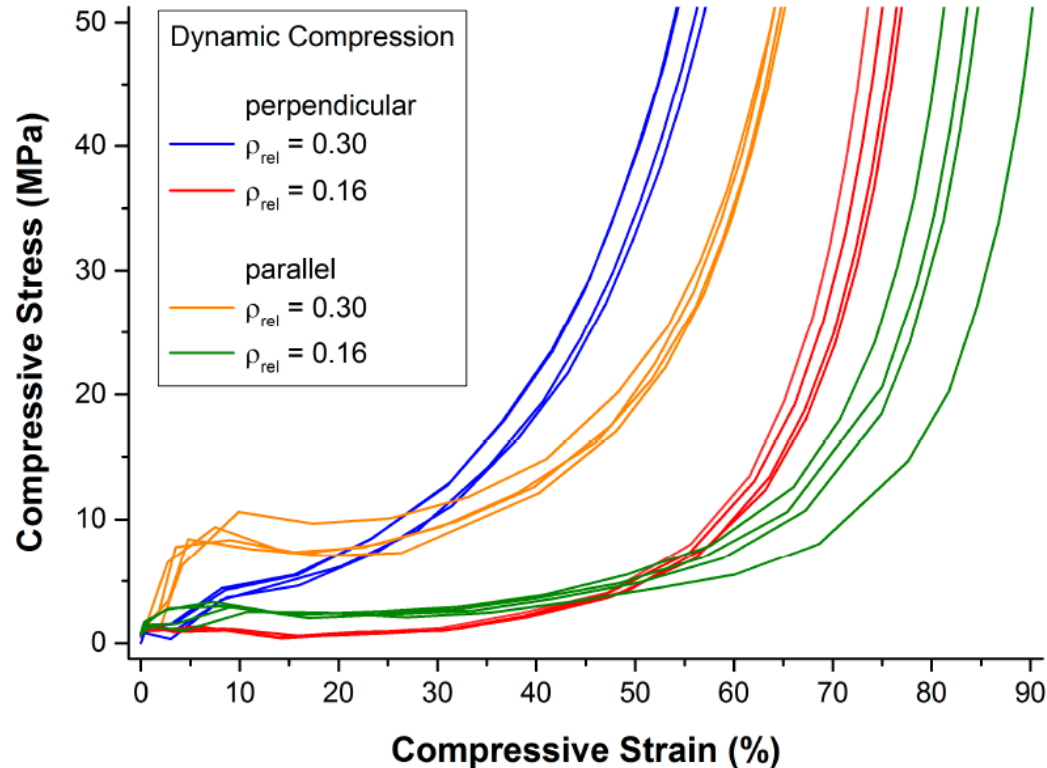
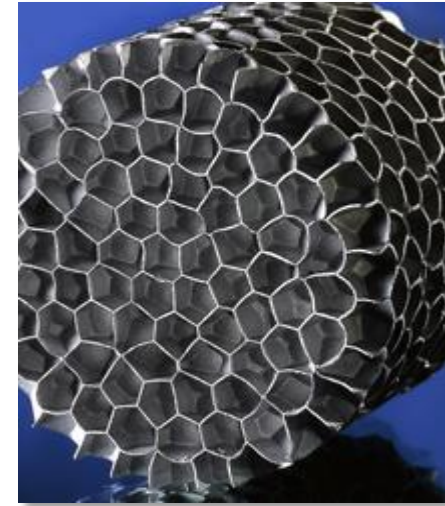


Figure 10. Compressive dynamic stress-strain curves in dependence of the relative density and the direction of loading.

O. Andersen, M. Vesenjok, T. Fiedler, U. Jehring and L. Krstulovic-Opara, Materials 2016, 9, 398; doi:10.3390/ma9050398

Inhalt

- Einordnung Zelluläre Metalle
- Überblick Anwendungen und Messverfahren
- **Quantitative CT - Projekt NORMZELL**
- Zusammenfassung



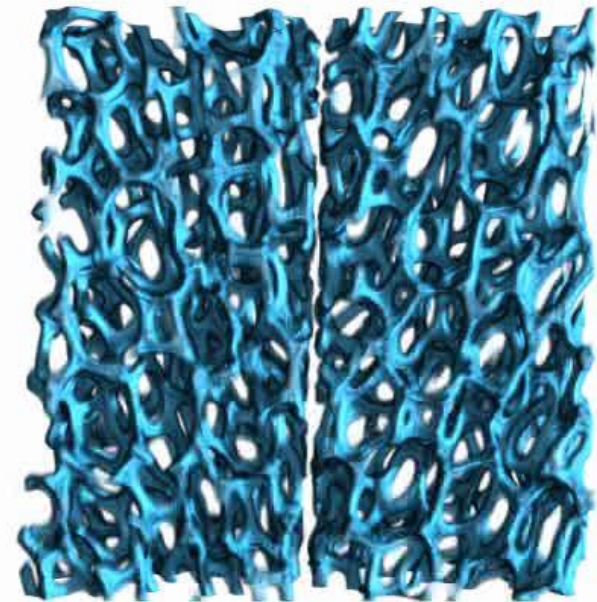
Project NORMZELL

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- Use computed tomography (CT) for characterization of micro structures
- Project cornerstones:
 - run by Fraunhofer IFAM, ITWM, and IWU
 - partially funded by BMWi
 - 2011-2013
- Advisory board: users, CT manufacturers, analysis labs, Bundesanstalt für Materialprüfung
- Goal: process regulation as a basis for standardisation process



Motivation

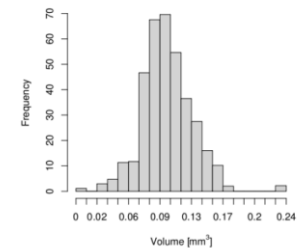
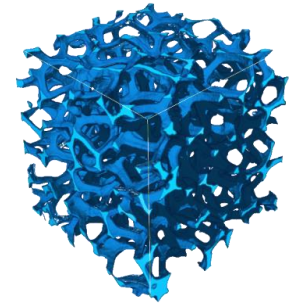
Establish micro-computed tomography as characterization method for cellular structures

- Observation: lack of methods for measuring crucial characteristics like
 - specific surface area
 - inner/outer porosity
 - pore morphology
 - anisotropy
 - homogeneity
 - wall or strut thickness distributions
 - fraction of closed/open cells
- Particularly severe problem for pore size range > 0.25 mm

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Quantitative micro-computed tomography

Micro-computed tomography has the potential to fill this gap but

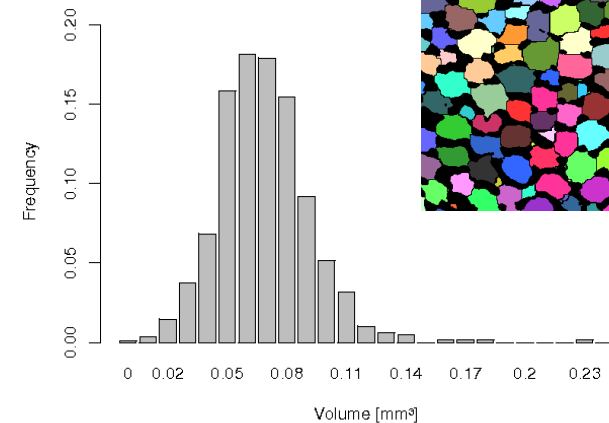
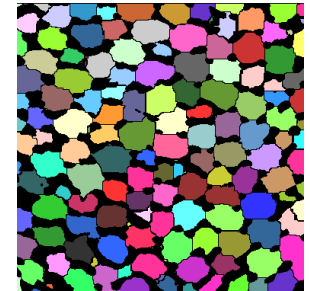
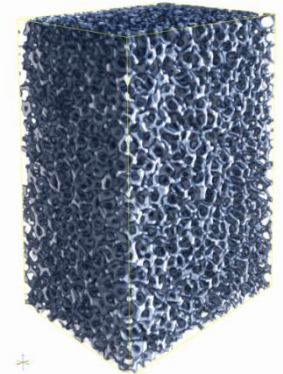
- no appropriate process regulation
- no accepted standards
- even no commonly used vocabulary

Quantitative image analysis is needed to extract the geometric information from the 3D image data but

- no standard procedures
- reliability of results and sources of error hard to judge

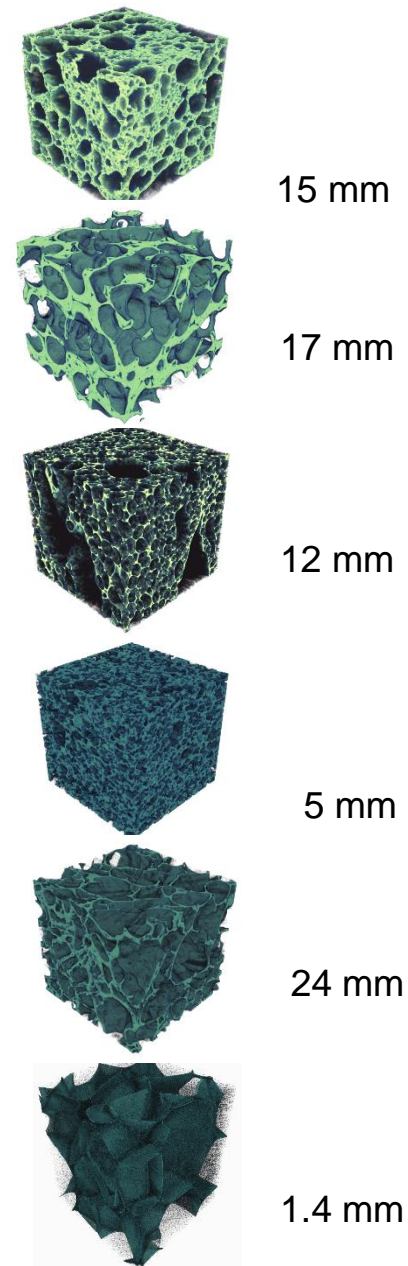
Complete characterization procedure

- Sampling scheme and sample preparation
- 3D imaging
 - CT device (hardware)
 - imaging parameters
 - tomographic reconstruction
- Geometric analysis
 - characteristics, algorithms, software
 - precision
- Presentation of results



Round robin tests

- 27 samples of cellular materials, 5 in round robin tests
 - polyurethane, metal and ceramic foams and sponges
 - voxel sizes 2 - 80 μm
- CT measurements
 - Fraunhofer ITWM
 - Scanco Medical AG
 - GE Measurement & Control phoenix|x-ray
 - Institut für Werkstoff und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Additional image data: CT images of pmi rigid foams
 - CT measurements by ITWM, Fraunhofer IWM-H, RJI Micro & Analytic, ESRF
 - voxel sizes 0.28 - 10 μm



Lessons learned from round robin tests

- Porosity and specific surface area rather robust w.r.t. imaging artefacts and (small) segmentation errors
- Uneven sample geometry can cause artificial anisotropy
- Pore space analysis sensitive to
 - segmentation errors, thus always analysis of connected components
 - edge effects, thus always check sample geometry after edge correction
 - discretization effects due to censoring
- **Measurement / analysis results always with respect to chosen resolution**

Results of NORMZELL project

- Valuable characterization method
 - Various parameters critical for quality of results
 - Setup to be chosen carefully depending on analysis task
 - Exploit structural knowledge from other sources to plan experiment or
 - Iterative search for correct sample size, voxel size ...
 - Measurement / analysis results always with respect to chosen resolution
 - Proper documentation of all crucial parameters
- ➔ Draft of DGZfP-Merkblatt (last action: 08/2015)

Future work with regard to CT

- Define indices for
 - anisotropy
 - homogeneity
- Test methods for the determination of a representative volume
- Surface area measurement
 - Clarify relation to surface roughness measurements
 - Derive error bounds
- Develop methods for comparing local pore sizes measured at different resolutions
- Turn rules for good practice into standards
- Extend to other porous structures, e.g. fibrous

Zusammenfassung

- Relevante Anwendungseigenschaften von ZMW beruhen i. W. auf:
 - Morphologie (Gesamt-Porosität, Porengrößenverteilung, Wanddickenverteilung, Baufehler)
 - Dämpfungseigenschaften
 - Innerer Oberfläche
 - Mechanischen Eigenschaften (Verformungs- und Versagensverhalten)
- Derzeit eingesetzte Messmethoden:
 - Metallographie mit Bildanalyse
 - RFDA
 - Quantitative CT (wünschenswert: Standardisierung / Normung der Methoden, Finalisierung DGZfP-Merkblatt, Weiterführung der Validierungsuntersuchungen)

Potential für zerstörungsfreie Prüfung

- Validierung der Berechnungsmodelle für schnelle PCM-Speicher
- Versagens- bzw. Verformungsverhalten im „elastischen“ Bereich kaum untersucht → Potential für in-situ Werkstoffanalytik auf der Mikro-Ebene während Verformungsvorgängen (plastische Verformung, Erholung)
- Validierungsuntersuchungen für DGFzP-Merkblatt zur quantitativen CT fehlen noch

Contact

Fraunhofer-Institute for Manufacturing Technology
and Advanced Materials IFAM
Branch Lab Dresden

Department of Cellular Metallic Materials
Dr.-Ing. Olaf Andersen
Winterbergstraße 28
D-01277 Dresden
Germany

Phone: +49 351 2537-319

Fax: +49 351 2554-451

Mobile: +49 172 8363226

Mail: olaf.andersen@ifam-dd.fraunhofer.de

Web: www.ifam-dd.fraunhofer.de