



11. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

Hochschule Merseburg
16.10.2024

Tagungsband



11. Mitteldeutsches Forum | 3D-Druck in der Anwendung

16. Oktober 2024 | 09:00 - 16:10 Uhr | Hörsaalgebäude Hochschule Merseburg

Veranstalter:



Organisationsteam:

Dr. Marco Götz (Tagungsleiter)
Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner
Günter Ganß

Prof. Dr.- Ing. Jörg Matthes
Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze
Dr. Ines Dani
Michael Pfeiffer
Robert Ebert
Constance Möhwald
Kathrin Schaper-Thoma

Hochschule Merseburg
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Ingenieurbüro für Kunststofftechnik
Suhl
Hochschule Mittweida
HTWK Leipzig
Building 3D e.V.
Lasereinstitut Hochschule Mittweida
Lasereinstitut Hochschule Mittweida
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
enficos Netzwerk/ mitz GmbH
Merseburg

Organisationsteam Hochschule Merseburg:

Ronny Kunow
Anja Bergner

Fachbereich INW
Weiterbildung

Das Organisationsteam bedankt sich bei allen Referierenden, Partnerinnen, Partnern und Unterstützenden, die zum Gelingen der Veranstaltung beigetragen haben.

Die Tagungsleitung bedankt sich für die hochschulinterne Unterstützung durch das Rektorat und den Fachbereich INW.

Plenarvorträge

Moderation: Dr. Marco Götze, Hochschule Merseburg	Seite
AddiQ– Qualitätssicherung im 3D-Druck Hans-Joachim Münch, Sonotec GmbH Halle (Saale)	6
Additive Fertigung – wie begann es- gegenwärtiger Stand - was bringt die Zukunft Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler, TU Bergakademie Freiberg	20
Makro-SLM: Ein neues Verfahren zur schnellen additiven Fertigung von großvolumigen Metallbauteilen Martin Erler, Laserinstitut Hochschule Mittweida	66

Session 1: metallbasierter 3D-Druck

Moderation: Martin Erler, Laserinstitut Hochschule Mittweida	
3D-Metalldruck in der Praxis - konstruktive Herangehensweise und digitale Werkzeuge Hans-Werner Theobald, 3D-Metall Theobald e.K. Alexander Hoffmann, ARC Solutions GmbH - 20S	89
Untersuchung der kumulierten Energieverbräuche für unterschiedliche Fertigungsvarianten in der Prototypen- und Ersatzteilerfertigung Marcus Viertel, Hochschule Anhalt	110

Session 2: Architektur & Bauwesen

Moderation: Prof. Dr. Jörg Matthes, Hochschule Mittweida	
Neuartige Materialien in der additiven Fertigung Dr. Falko Böttger-Hiller, Beckmann-Institut für Technologieentwicklung e.V. Chemnitz	129
Robotischer 3D-Druck von nicht-standardisierten Porzellanstrukturen Michael Braun, Bauhaus Universität Weimar	153
Hanf+X Dr. Susanne Bartholomé, Hochschule Merseburg	177

Session 3: Verbundwerkstoffe

Moderation: Marcel Auerbach, Hochschule Merseburg	Seite
Herstellung und Analyse faserverstärkter additiv gefertigter Leichtbaustrukturen auf Basis 3D-Druck und Tapelege-Prozess (Abstract)	193
Moritz Vyhnal, Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ/ Fh IMWS	
Untersuchungen zum Einfluss von Glasfasern auf die Eigenschaften von PC-ABS in der granulatsbasierten, additiven Fertigung	195
Toni Wille, Ernst-Abbe-Hochschule Jena	

Session 4: Qualitätssicherung im 3D-Druck 1

Moderation: Dr. Ralf Lach, Polymer Service GmbH Merseburg	
Rekonstruktion von Geometrie-Modellen aus Prozessdaten der Additiven Fertigung	216
Thomas Wagner, Fraunhofer IMWS Halle (Saale)	
Additiv gefertigte EMV-Bauteile für den Messgerätebau (Abstract)	252
Dr. Oliver Neudert, GMBU e.V.(AddiQ)	
Einsatz von Endlofasern im 3D-Druck	254
Thomas Veit, Automation, Sonder- und Werkzeugmaschinen ASW GmbH Naumburg (AddiQ)	

Session 5: Post-Processing und Folgeverfahren

Moderation: Günther Ganß, Ingenieurbüro für Kunststofftechnik Suhl	
UV-Schutz additiv gefertigter Bauteile durch Versiegelung	282
Daniel Flachsenberg, Diamant Polymer GmbH	
Warum ist Post-Processing bei dem 3D-Druck unerlässlich?	301
Ingrid Prestien, Cipres GmbH	
Untersuchungen zu Abtragsmechanismen beim Plasmapolieren	319
Paul Geßner, Hochschule Anhalt	
Additive Manufacturing - Post-Processing und Risiken	328
Max Fielenbach, joke Technology GmbH	

Session 6: polymerbasierter 3D-Druck

Moderation: Prof. Dr. Jens Bliedtner, Ernst-Abbe-Hochschule Jena	Seite
Kunststoffschäume im großvolumigen 3D-Druck	350
Hans Georg Pensel, Ernst-Abbe-Hochschule Jena	
Untersuchungen zum Spritzgießen mit additiv gefertigten Werkzeugeinsätzen aus Kunststoff	368
Hauke Adler, HTWK Leipzig	
Entwicklung von additiv gefertigten Stützstrukturen für die Integration von Transpondern in Spritzgussbauteile (Abstract)	389
Jonas Siegrist, Ernst-Abbe-Hochschule Jena	
Polymere Spritzgusswerkzeuge aus dem 3D-Drucker	391
Valentin Wiesner, Hochschule Coburg	

Session 7: Medizintechnik

Moderation: Prof. Dr. Jörg Matthes, Hochschule Mittweida	
Slicer-Entwicklungen mit neuartigem Rotationsdrucker für medizinische Prothesen	413
Axel Wolf B. Eng., Dr.-Ing Hagen Bankwitz, HS Mittweida	
Digitale Orthetik	461
Niklas Hamann, Bauhaus Universität Weimar	
Wichtigkeit der Qualitätssicherung von Medizinprodukten und patientenspezifischen Produkten aus Medizinprodukten (Abstract)	496
Dr. Dennis Wachtel, BURMS- 3D Druck Jena GmbH & Co. KG	
Entwicklung eines 3d-gedruckten patientenspezifischen biooptischen Stereotaxie-Systems	498
Dr. Fabian Kropla, Universität Leipzig	

Session 8: Qualitätssicherung im 3D-Druck 2

Moderation: Dr. Carsten Krautz, Building 3d e.V. Leipzig	
Hochaufgelöste visuelle In-Situ Prozessüberwachung im PBF-LB/M	538
Jonathan Schmidt, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	
Material- und Prozessüberwachung im FFF- und FGF-Verfahren	555
Johannes Zawatzki, Sonotec GmbH (AddiQ)	
Korrelationen zwischen den (bruch)mechanischen Eigenschaften und der Werkstoffmorphologie additiv gefertigter Kunststoffe	569
Ralf Lach, Polymer Service GmbH (AddiQ)	

Plenarvorträge

AddiQ– Qualitätssicherung im 3D-Druck

Hans-Joachim Münch,
Sonotec GmbH Halle (Saale)

AddiQ – Qualitätssicherung in der
Additiven Fertigung

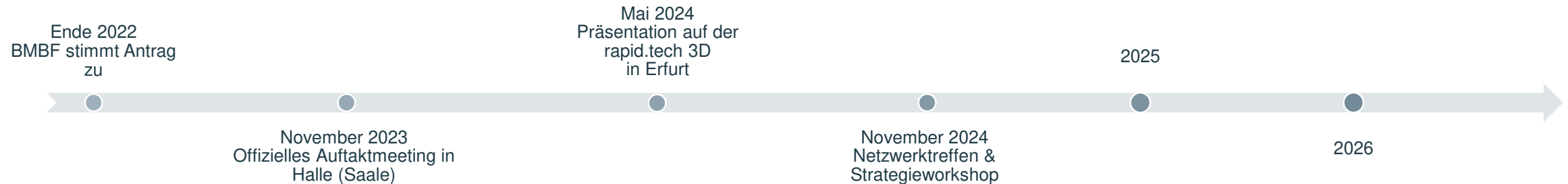
Kompetenzzentrum zur Qualitätssicherung im 3D-Druck

Hans-Joachim Münch, SONOTEC GmbH
Bündniskoordinator



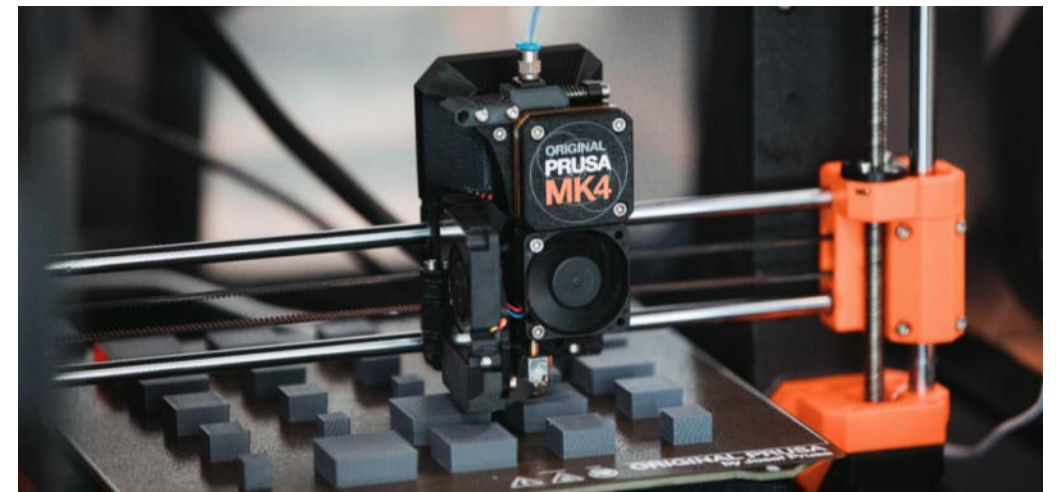
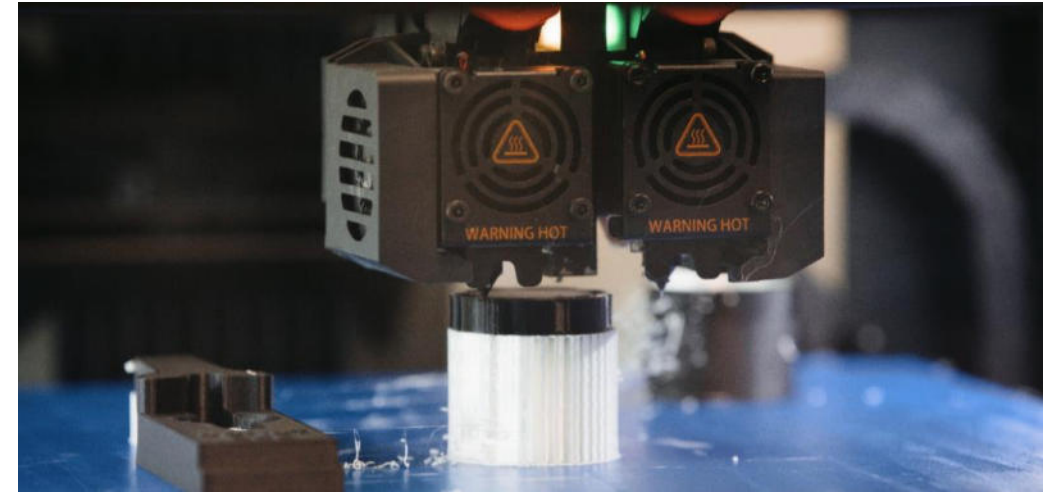
Vorstellung des Netzwerks AddiQ

- AddiQ: Initiative zur Qualitätssicherung in der Additiven Fertigung
- Aufbau von wissenschaftlicher, technologischer und wirtschaftlicher Kompetenz
- Ziel: Qualitätssteigerung in der gesamten Wertschöpfungskette der additiven Fertigung
- Projektvolumen über 13 Millionen Euro, davon bis zu 9 Millionen Euro durch das BMBF
- Unterstützung durch das TGZ & MITZ, die Stadt Halle (Saale), das Landesministerium für Wirtschaft, Tourismus, Landwirtschaft und Forsten und das Landesministerium für Wissenschaft, Energie, Klimaschutz und Umwelt



Ziele des Bündnisses

- AddiQ-Netzwerk vereint Forschung, Entwicklung und Anwender
- Qualitätssichernde Maßnahmen für additive Fertigungsprozesse und Materialien
- Forschungsarbeit als Grundlage für ein Zentrum mit europaweiter Strahlkraft
- Kompetenzzentrum für Qualitätssicherung in der Additiven Fertigung
- Förderung der breiten industriellen Anwendung additiver Fertigungstechnologien
- Technologietransfer in regionale Unternehmen, insbesondere KMU
- Normung und Qualifikation von Mitarbeitenden



Bündnispartner – Partner im AddiQ-Konsortium

- Entwicklungsprojekte zwischen Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen
- 15 Partner: 10 industrielle, 5 Forschungspartner aus Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen, Brandenburg
- Starke regionale Vernetzung in Halle (Saale), Merseburg, Metropolregion Mitteldeutschland
- Technologietransfer in KMU für den Aufbau additiver Technologien



Verbundprojekte

- Aufteilung in 5 thematische Kompetenzfelder zur gezielten Forschungsarbeit
- Effiziente Bearbeitung spezifischer Anforderungen der Qualitätssicherung



VP1: „Additiv gefertigte ESD- und EMV-Bauteile für den Messgerätebau“

VP2: „Qualitätsgerechte Herstellung von obsoleszenten Bauteilen für das Transportwesen mittels generativer Verfahren“

VP3: „Bauteilsicherheit von generativ gefertigten Produkten“

VP4: „Material- und Prozessüberwachung im FFF- und FGF-Verfahren“

VP5: „Qualitätssicherung bei multiaxial gefertigten Bauteilen für die Orthetik“

Verbundprojekte:

VP1: „Additiv gefertigte ESD- und EMV-Bauteile für den Messgerätebau“

Verbundprojektleitung:

- GMBU e.V. (Dr. Oliver Neudert)

- VP1-TP1: „Entwicklung von hochleitfähigen EMV- und schäumbaren ESD-Filamentmaterialien“, GMBU e.V.

- VP1-TP2: „Entwicklung und Anwendung additiv gefertigter und elektrisch leitfähiger Bauteile für Analysenmessgeräte“, ECH Elektrochemie Halle GmbH

- VP1-TP3: „Entwicklung von EMV-Bauteilen für Sensorkomponenten/-gehäuse und geschäumten ESD-Verpackungen für Elektronikkomponenten“, SONOTEC GmbH



Verbundprojekte: VP2: „Qualitätsgerechte Herstellung von obsoleszenten Bauteilen für das Transportwesen mittels generativer Verfahren“

Verbundprojektleitung:

- Studio.201 software GmbH
- VP2-TP1: „Fertigungsbegleitender Digitaler Zwilling als Methode zur Qualitätssicherung im 3D-Druck“, studio.201 software GmbH
- VP2-TP2: „Sicherung der Bauteilqualität durch Smarte Sensorierung von großformatigen mittels Fused Granulat Fabrication hergestellten Bauteilen“, Fraunhofer IMWS
- VP2-TP3: „Entwicklung von Normungs- und Standardisierungskonzepten für FGF gefertigte Bauteile für das Transportwesen“, SLV Halle GmbH
- VP2-TP4: „Entwicklung von flammhemmenden (Rezyklat-)Materialien für mechanisch und thermisch hochbelastbare 3D-Druck-Bauteile und deren Charakterisierung mittels qualitätssichernder Verfahren“, Institut f. Kunststofftechnologie und -recycling e.V.

< studio.201 >
software-developer

 **Fraunhofer**
IMWS

 **DVS** SLV HALLE

 **IKTR** Institut für
Kunststofftechnologie
und -recycling e. V.

Verbundprojekte: VP3: „Bauteilsicherheit von generativ gefertigten Produkten“

Verbundprojektleitung:

- Polymer Service GmbH, Merseburg (Dr. Ralf Lach)
- VP3-TV1: „Entwicklung von Prüfverfahren für die Bauteilsicherheit und Qualitätssicherung additiv gefertigter Kunststoffbauteile“, NEL GmbH
- VP3-TP2: „Eigenschaftsoptimierung durch Qualitätssicherung von SLS-Bauteilen in der Serienfertigung“, ModellTechnik Rapid Prototyping GmbH
- VP3-TP3: „Entwicklung von Prüfverfahren für die Bauteilsicherheit und Qualitätssicherung additiv gefertigter Kunststoffbauteile“, Polymer Service GmbH
- VP3-TP4: „Entwicklung von Methoden zur Simulation und Prozessüberwachung im Rahmen der Qualitätssicherung von generativ gefertigten Bauteilen“, HS Merseburg
- VP3-TP5: „Entwicklung von Methoden zur virtuellen Werkstoffprüfung und Prozessüberwachung für die Herstellung fehlerfreier FFF-/SLS-Bauteile“, TH Brandenburg



Verbundprojekte

VP4: „Material- und Prozessüberwachung im FFF- und FGF-Verfahren“

Verbundprojektleitung:

- GMBU e.V. (Dr. Oliver Neudert)
- VP4-TP1: „Entwicklung eines wirtschaftlichen, kleinskaligen Pelletdruckverfahrens mit verbesserter Präzision und Zuverlässigkeit durch innovative Prozessüberwachung und -regelung“, GMBU e.V.
- VP4-TP2: „Prozessüberwachung von Kleinserien im additiven FFF-Verfahren“, fertig+ GmbH
- VP4-TP3: „Additive Produktion mit KI-gestützter Prozesskontrolle für Kleinserien im FFF-Druckverfahren“, Dögel GmbH
- VP4-TP4: „Entwicklung von neuen Verfahren und Geräten zur Materialprüfung und -überwachung in der additiven Fertigung“, ECH Elektrochemie Halle GmbH
- VP4-TP5: „Entwicklung von akustischer Sensorik zur Material- und Prozessüberwachung im FFF-Prozess“, SONOTEC GmbH



Verbundprojekte: VP5: „Qualitätssicherung bei multiaxial gefertigten Bauteilen für die Orthetik“

Verbundprojektleitung:

- Automation, Sonder- und Werkzeugmaschinen ASW GmbH (Thomas Veit)
- VP5-TP1: „Erforschung einer Technologie zur 3D-Trajektorien basierten generativen Fertigung von Bauteilen aus faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen“, ASW GmbH,
- VP5-TP2: „Qualitätssicherung von Multimaterial-Orthesen aus der additiven Fertigung durch werkstoffmechanische Konzepte“, Fraunhofer IMWS
- VP5-TP3: „Komplexe Sensorierung von multiaxialen Systemen zur Qualitätssicherung in der additiven Fertigung“, SLV Halle GmbH

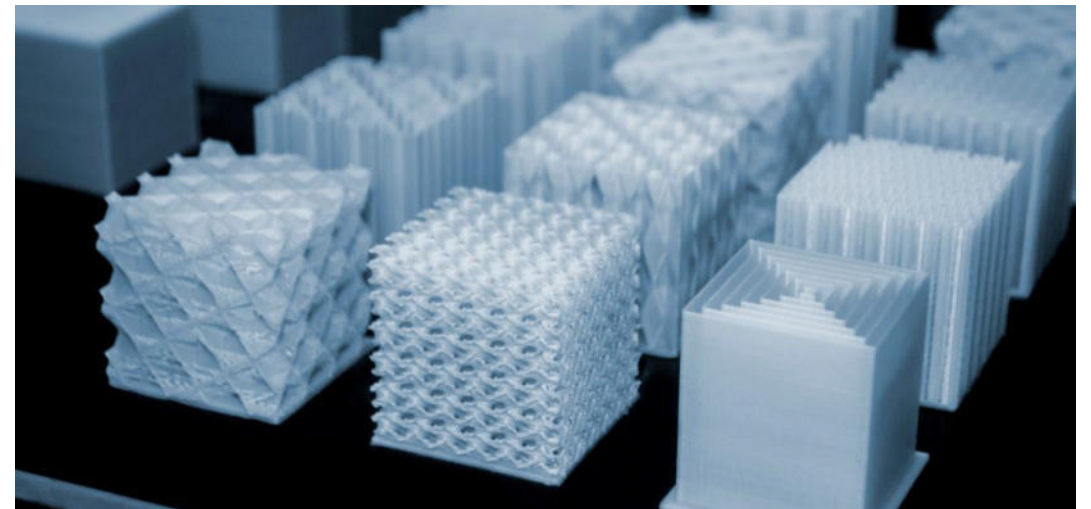
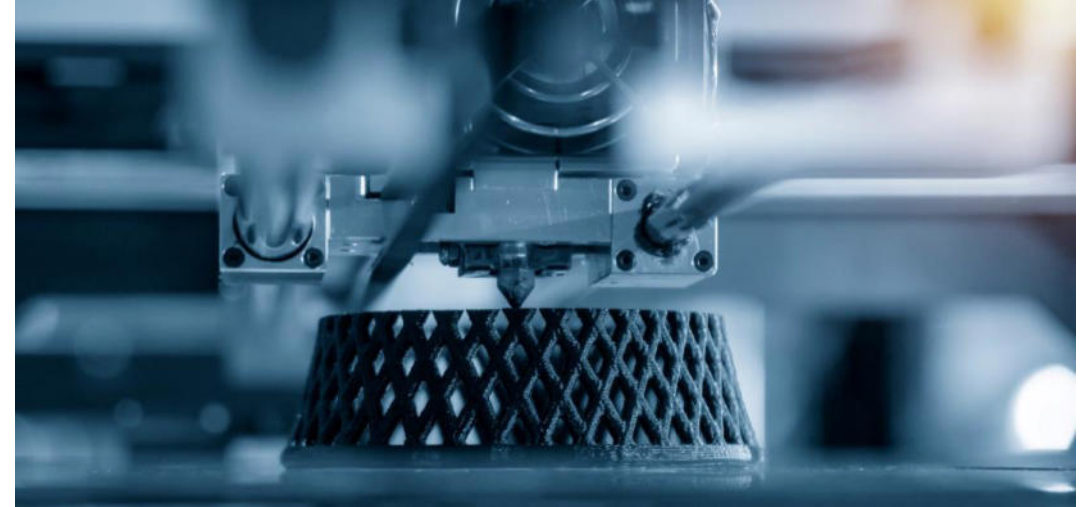


Förderprogramm RUBIN

- BMBF-Programm „Innovation & Strukturwandel“ gibt strukturschwachen Regionen Impulse
- Die Programmlinie RUBIN (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation) unterstützt strategische Kooperationen für innovative Technologien
- Themenoffene Innovationsförderung für strukturschwache Regionen in ganz Deutschland
- Ziel: Entwicklung von Innovationen mit hohem Anwendungspotenzial
- AddiQ unter 7 ausgewählten Projekten (48 Einreichungen) in der dritten Förderrunde
- Fokus auf marktfähige Anwendungen mit hohem wirtschaftlichen Potenzial
- Projektträger: Projektträger Jülich

Ziele und Perspektive

- Aufbau eines internationalen Kompetenzzentrums für additive Technologien
- Stärkung der mitteldeutschen Wettbewerbsfähigkeit und Schaffung von Arbeitsplätzen
- Erschließung neuer industrieller Anwendungsfelder
- Normen und Qualifizierungen für die Integration additiver Fertigungsverfahren in standardisierte Produktionsprozesse
- Etablierung der additiven Fertigung als gleichwertige Produktionsmethode
- AddiQ: Führend in der Qualitätssicherung und höchste Standards



Ansprechpartner

- Sie wollen weitere Informationen oder in Austausch treten?
Schreiben Sie uns gerne an.

Bündnis-Koordinator:
Hans-Joachim Münch
Gründer & Prokurist, SONOTEC GmbH

- addiq@sonotec.de
- www.addi-q.com



Plenarvorträge

**Additive Fertigung – wie begann es-
gegenwärtiger Stand - was bringt die Zukunft**

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler,
TU Bergakademie Freiberg

ADDITIVE FERTIGUNG

Wie begann es – gegenwärtiger Stand – was bringt die Zukunft?

Additive Fertigung

Definition nach DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03

In Einleitung:

Additive Fertigung (AM, en: additive manufacturing) ist der allgemeine Begriff für Technologien, bei denen Materialien sukzessive miteinander verbunden werden, um physische Objekte nach den Vorgaben von 3-D-Modelldaten herzustellen.

In Allgemeine Begriffe:

additive Fertigung, Substantiv

AM, en: additive manufacturing

Prozess, der durch Verbinden von Material Bauteile aus 3-D-Modelldaten, im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsmethoden, üblicherweise Schicht für Schicht, herstellt.

Additive Fertigung

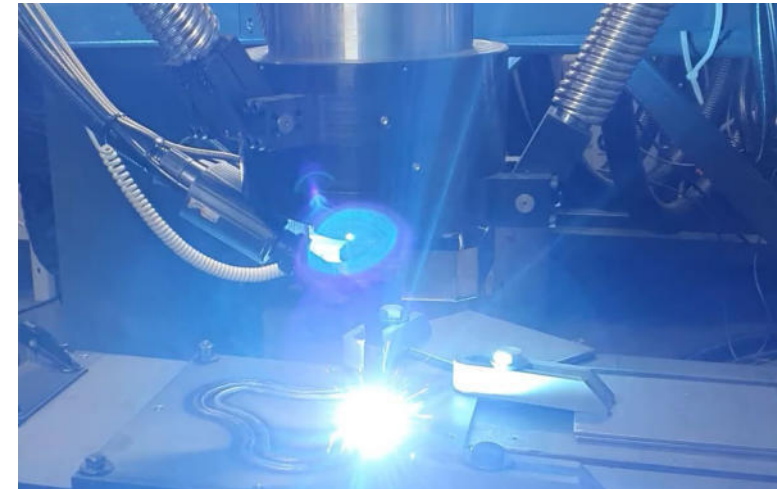
Definition nach VDI 3405

Bei additiven Fertigungsverfahren erfolgt die **Fertigung** nicht materialabtragend aus einem massiven Körper wie beim Fräsen, sondern **materialzufügend**, also additiv.

Das heißt, **die Bauteile entstehen schichtweise** durch Hinzufügen von Ausgangsmaterial oder durch Phasenübergang eines Materials vom flüssigen oder pulverförmigen in den festen Zustand.

Die Fertigung erfolgt **ohne Verwendung von* Formen und Werkzeugen**.

* Ich würde hier noch „produktspezifischen“ ergänzen.



Wire Arc Additive Manufacturing



Binder Jetting

Additive Fertigung: viele Technologien (DIN EN ISO/ASTM 52900)

VPP-UVL

PBF-LB/M

PBF-EB/M

MEX-CRB

MJT-UV/P

DED-Arc/M

VPP-UVM

DED-LB/M

PBF-LB/P

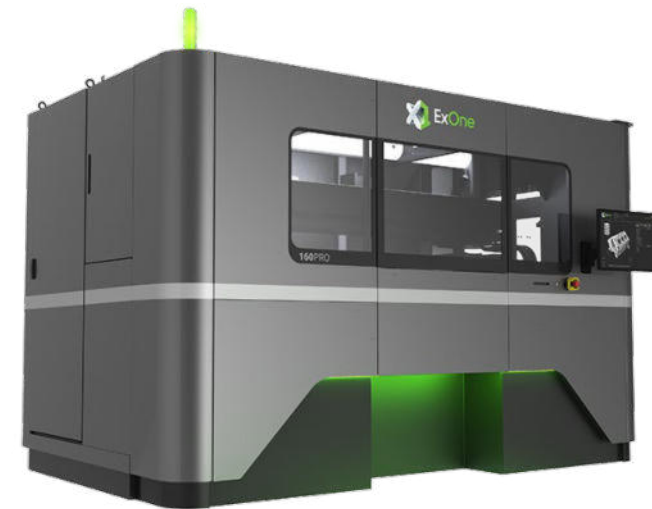
...und viele mehr...

MEX-TRB



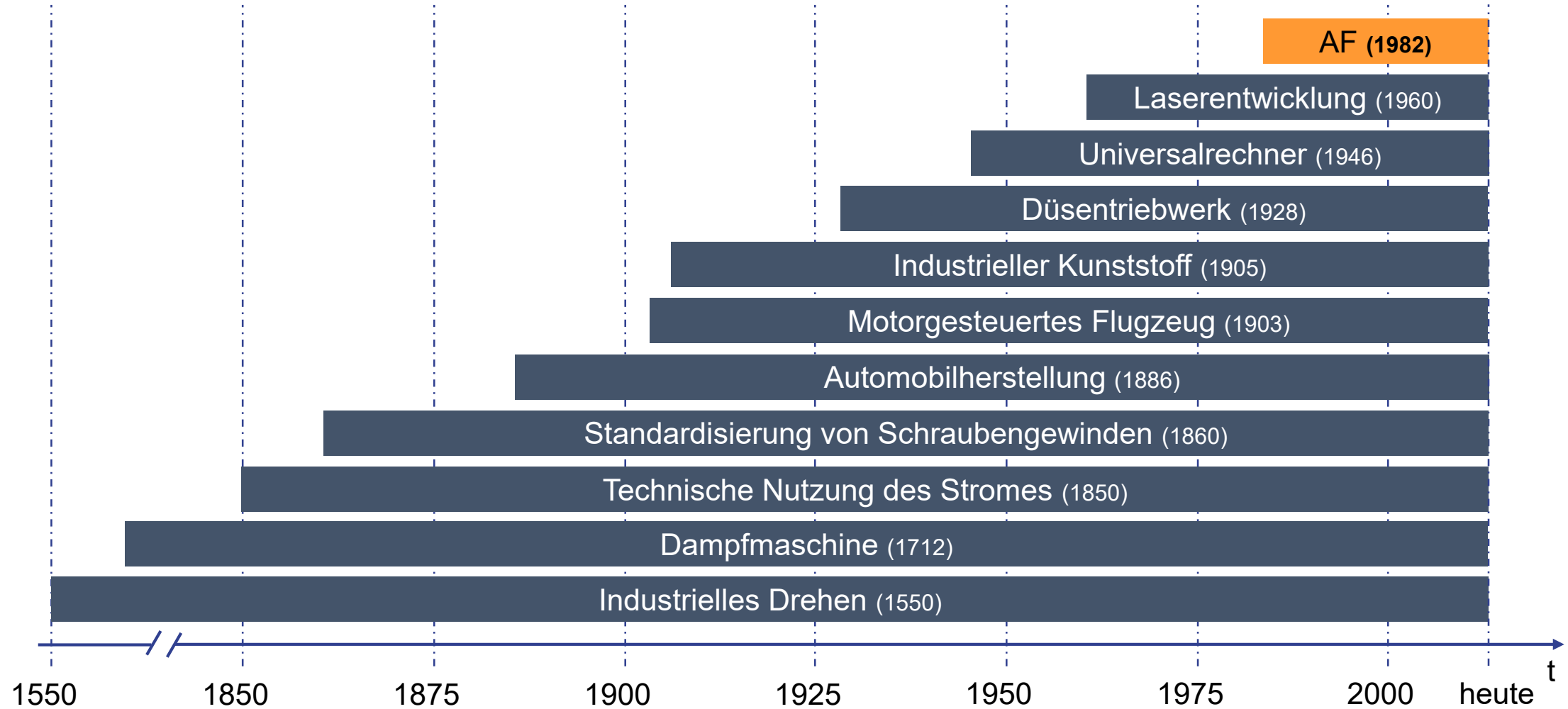
[Ultimaker]

BJT



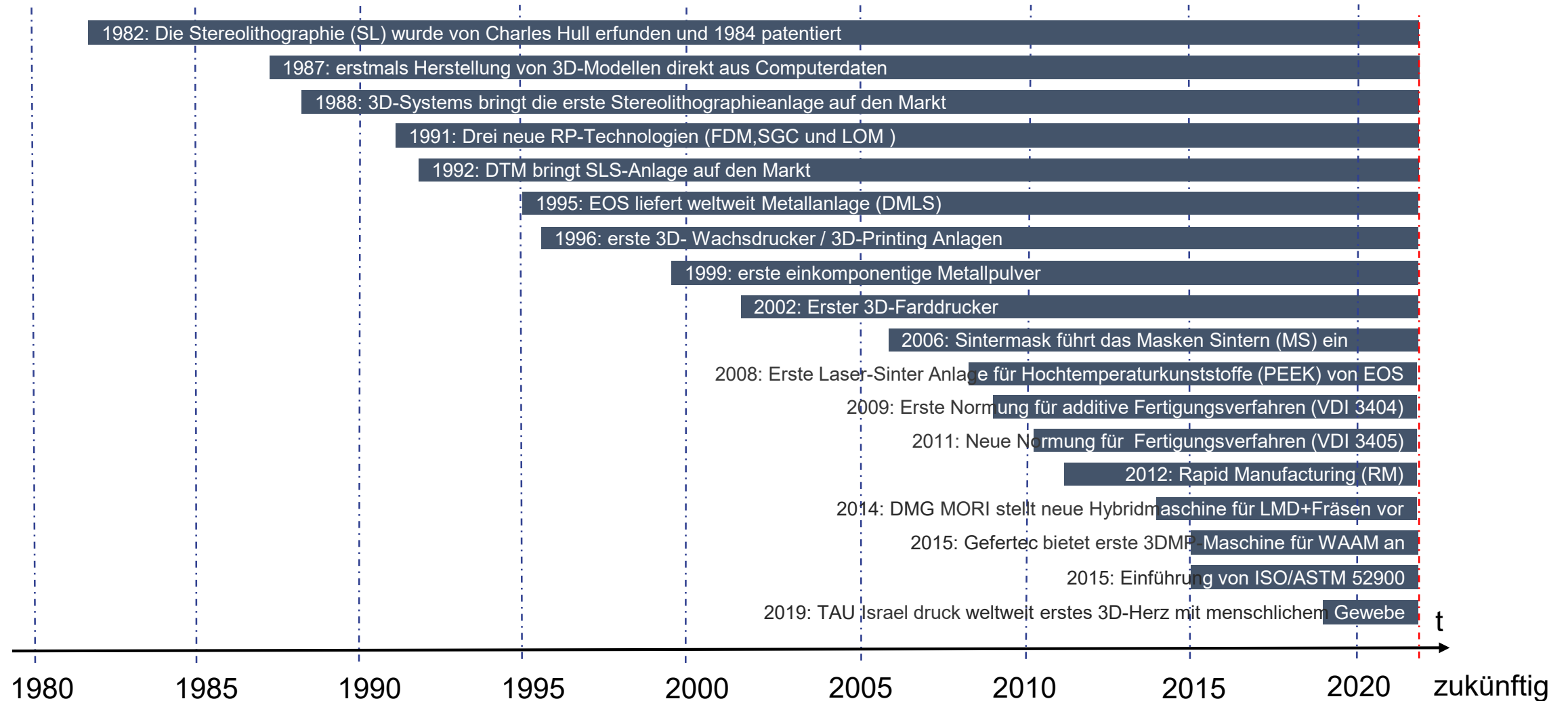
[ExOne]

Zeitliche Einordnung der additiven Fertigung



Quellen: Universität Duisburg / Essen

Zeitliche Entwicklung der additiven Technologien



Quellen: Uni DuE, Wohlers Associates, Report; eigene Ergänzung

Was dachten wir vor 10 Jahren? Mediale Visionen zum „3D-Druck“

3D Druck auf dem Mond



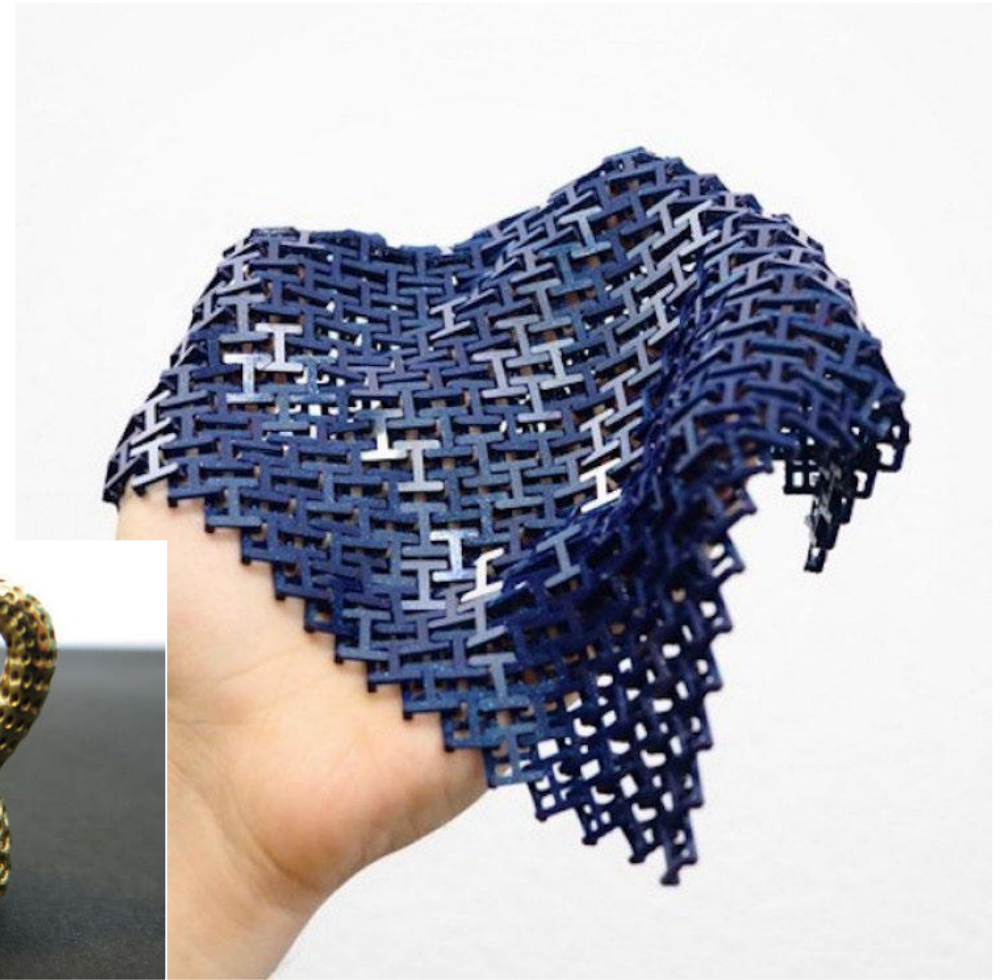
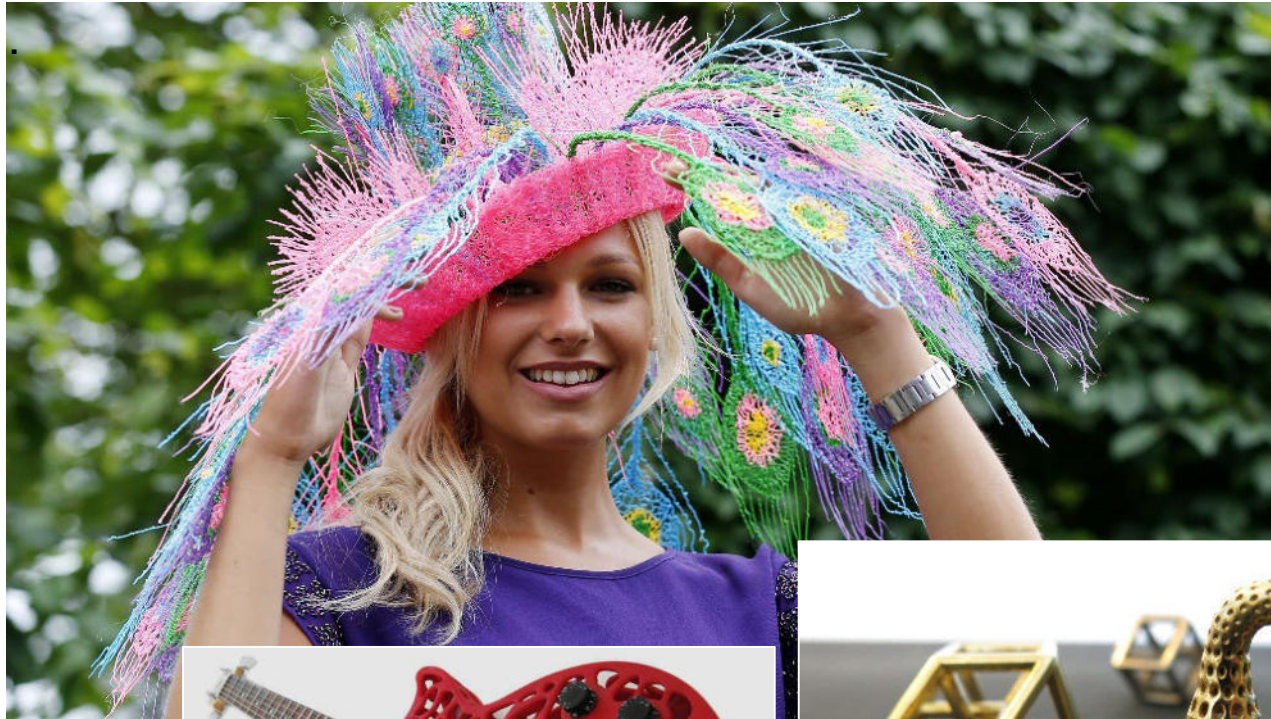
3D Druck von Flugzeugen



Ein 3D Drucker für Alles

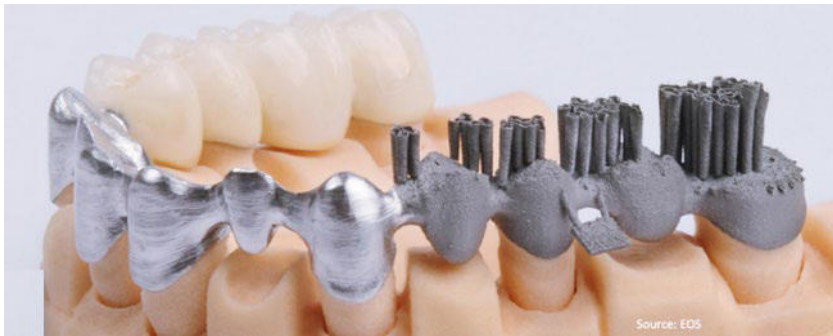


Additive Fertigung – Was macht man damit?



Quelle: interestingengineering; sculpteo; QZ, allthat3d

Additive Fertigung – Was macht man damit?

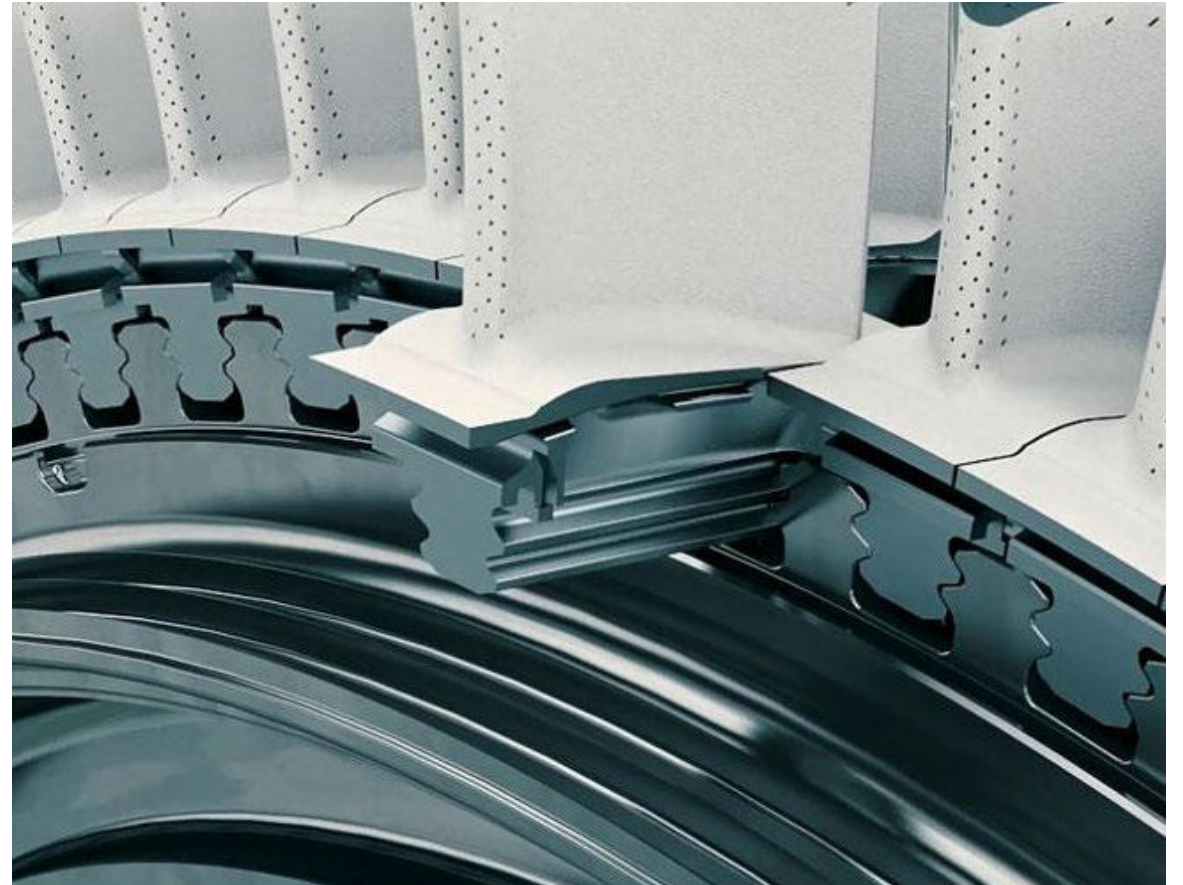


Quelle: natureworld/ EOS

Additive Fertigung – Was macht man damit?



Additive Fertigung – Was macht man damit?



Quelle: Siemens, EOS

Additive Fertigung – Was macht man damit?



Quellen: 3T-AM/Launcher; Ariane6/ESA, Altair/Sulis

Additive Fertigung – Was macht man damit?



WORLD'S LARGEST 3D METAL PRINTERS

ROCKETS BUILT FOR THE FUTURE

Relativity's proprietary Factory of the Future centers on Stargate, the world's largest metal 3D printers, that create Terran 1, the world's first 3D printed rocket, and Terran R our first reusable, medium-to-heavy lift, 3D printed orbital launch vehicle. Relativity's Stargate printers' patented technology enables an entirely new value chain and innovative structural designs that make Terran 1 and Terran R possible. By developing its Factory of the Future and rockets together, Relativity accelerates its ability to improve design, production, quality, and speed.

Zero fixed tooling and radical part count reduction

- + Faster design iterations and part optimizations
- + Real-time quality control and part inspection
- + Sensor and analytics-driven machine learning

[LEARN ABOUT TERRAN](#)



Stargate 4th Generation Metal 3D Printer



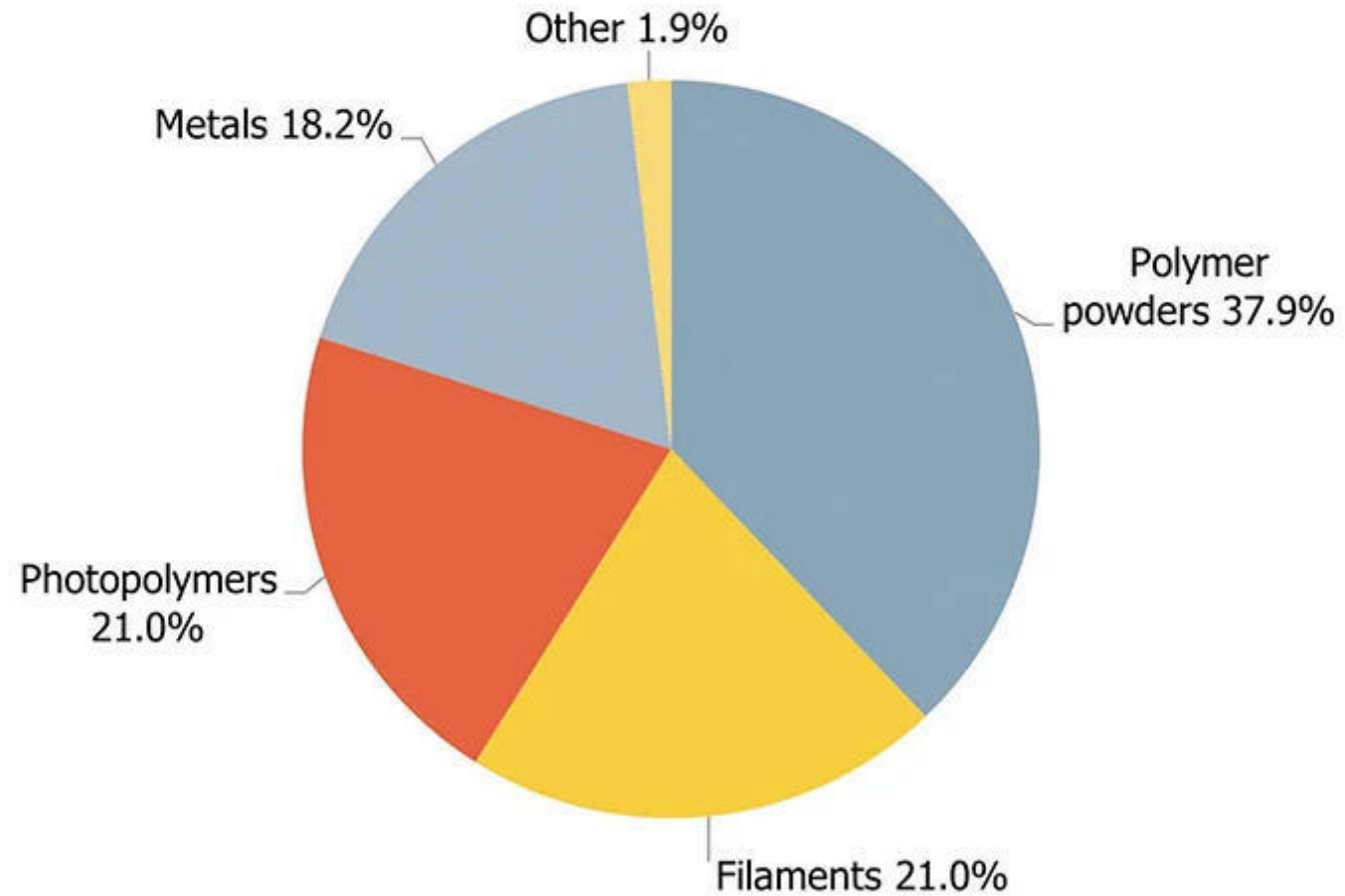
Quellen: relativity space, IEEE spectrum

Additive Fertigung – Was macht man damit?

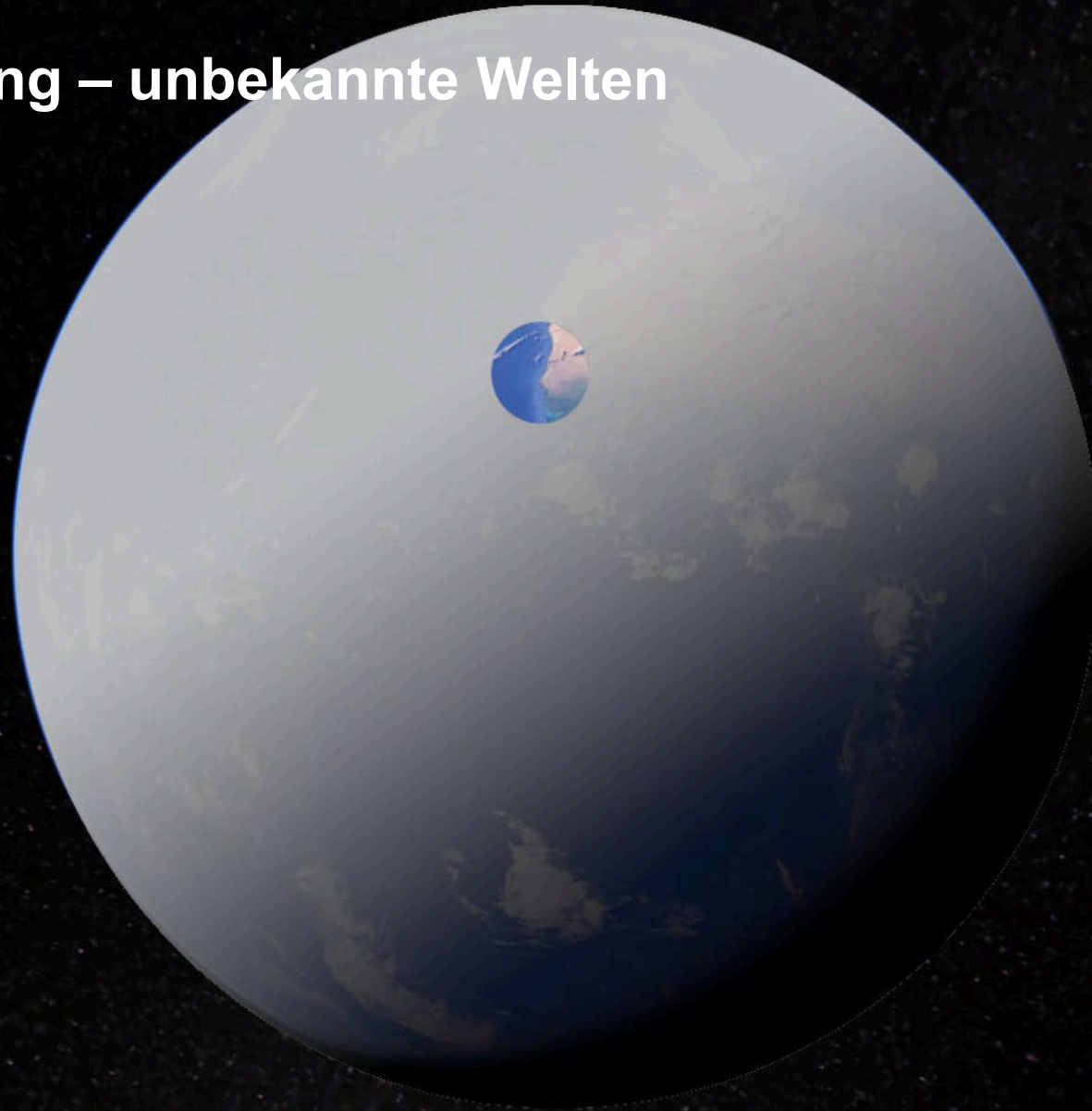


Quelle: Twente, WASP/Wired

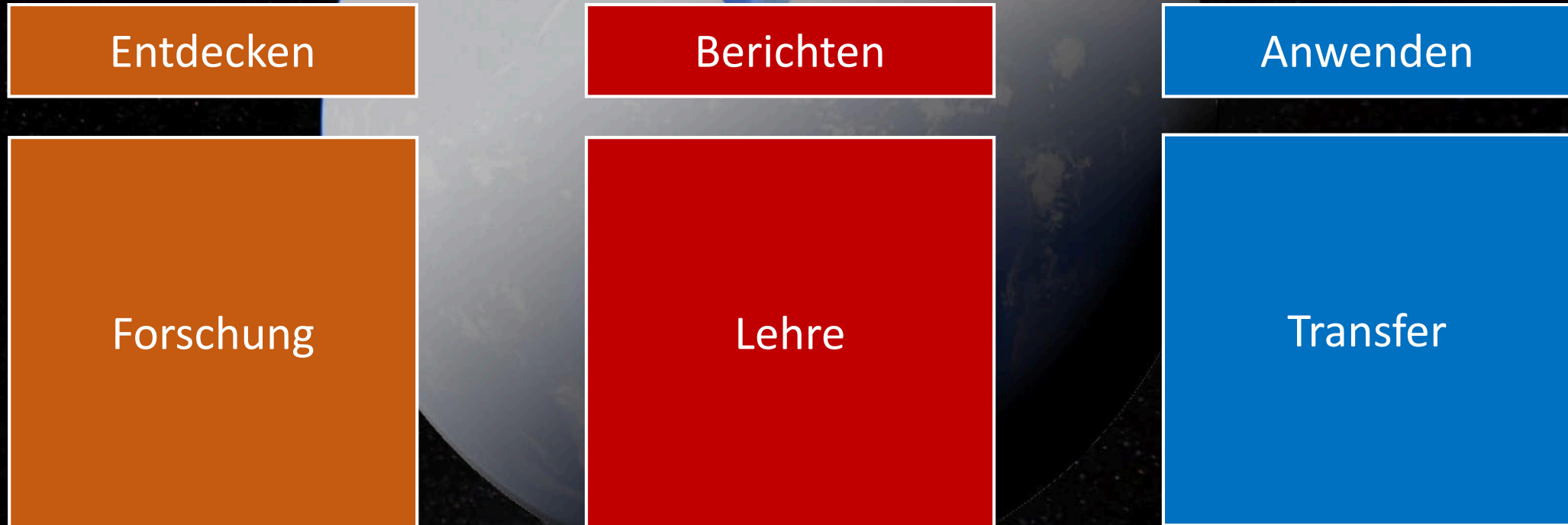
Materialien im Einsatz



Additive Fertigung – unbekannte Welten



Additive Fertigung – Werkzeuge



Additive Fertigung – wo liegen die Herausforderungen?

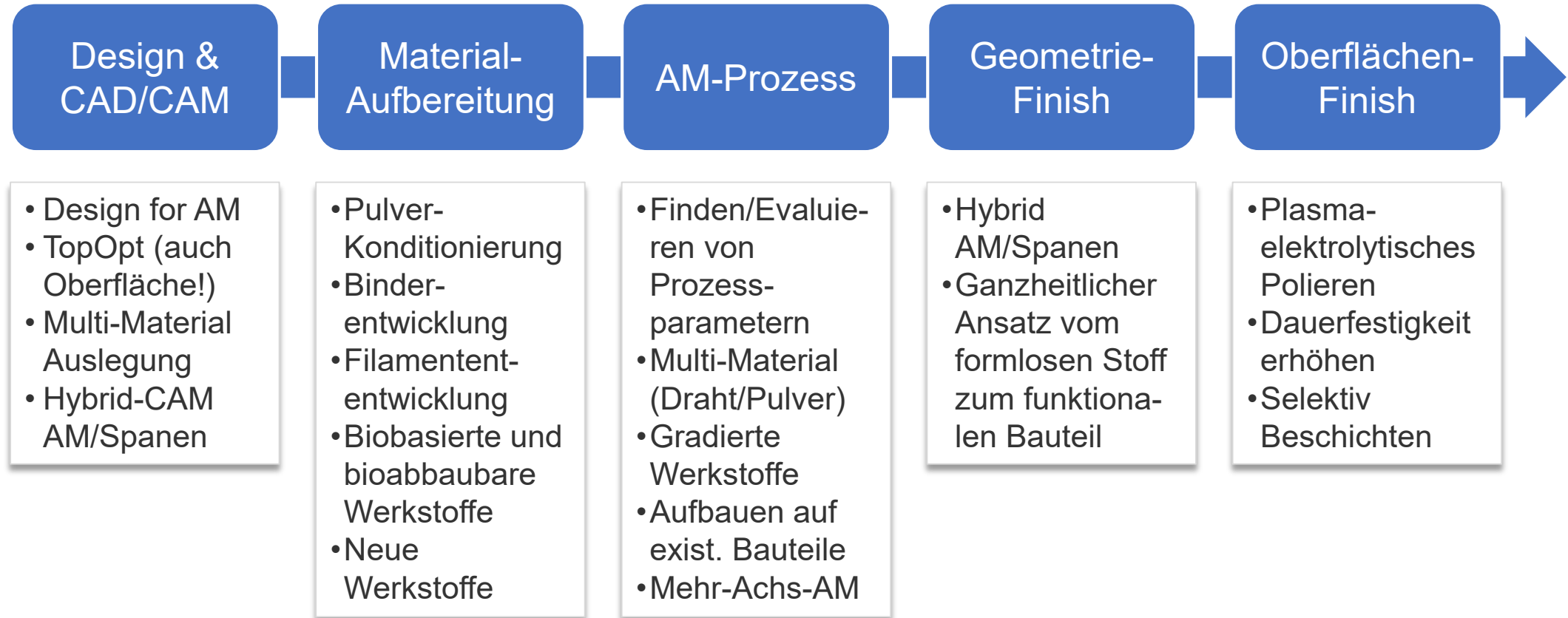
- „Kinderkrankheiten“

- Prozessstabilität / Reproduzierbarkeit / Prozesssicherheit
- ~~Begrenzte Materialpalette~~
- Großteils proprietäre Technik
- Vergleichsweise hohe Kosten
- ~~Ausbaufähige Technologiekenntnis~~
- Bedarf an Post-Processing-Technologien und Automatisierung

- ➔ Bisher überschaubare Integration in Prozessketten
- ➔ Begrenzte konkurrenzfähige Anwendungsfälle

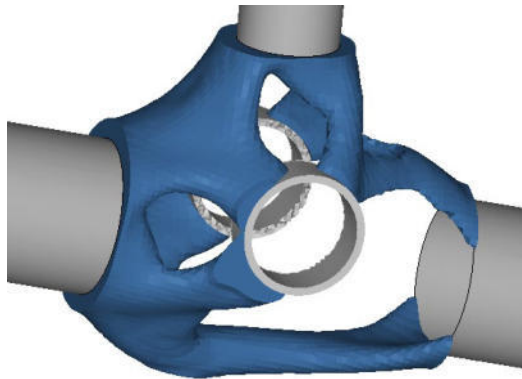
- ★ **Erweiterte Möglichkeiten** nutzen
- ★ Nicht (nur) andere Technologien ersetzen, sondern **neue Ansätze** entwickeln

Prozesskette der additiven Fertigung

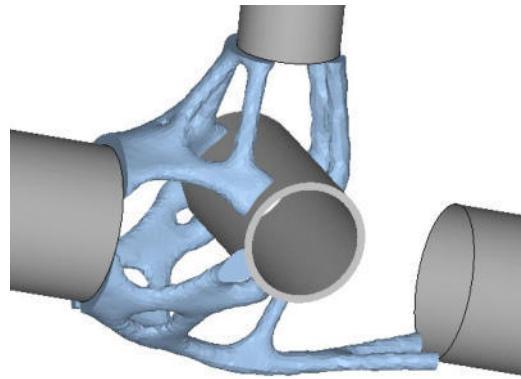


Topology optimisation

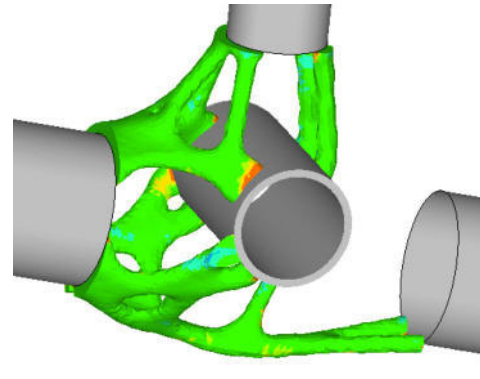
Target functions:



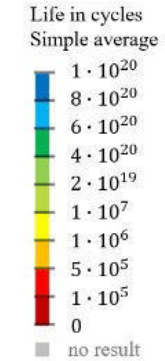
Increased stiffness.



Minimum weight.



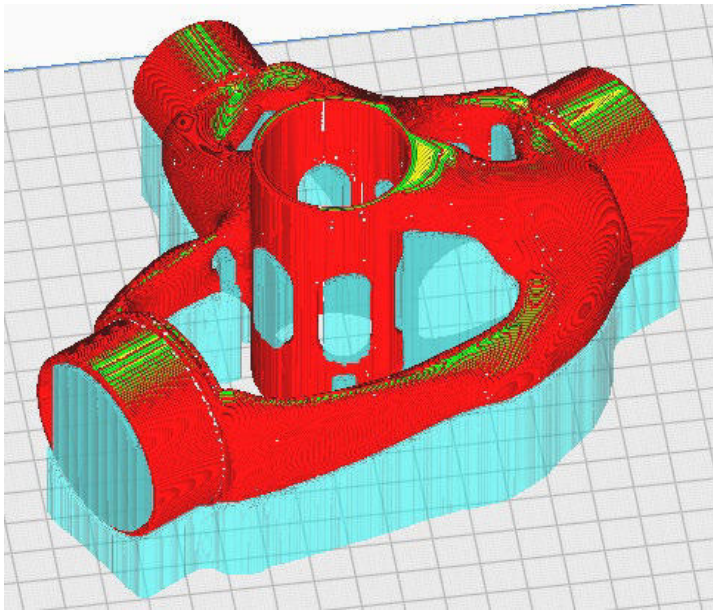
Two step optimisation approach.



Minimum weight governed by displacement constrain. Colour scale shows life cycles.

Topology optimisation

Realisation:



Topology optimised bottom bracket (increased stiffness approach) with support structures generated by *Magics* for the PBF-LB/M process.



Topology optimised bottom bracket manufactured out of 316L using PBF-LB/M part with partially removed support structures.



Topology optimised bottom bracket, side view.

Hybride AF Technologien: DED-Arc & Fräsen

DED Wire Arc Additive Manufacturing

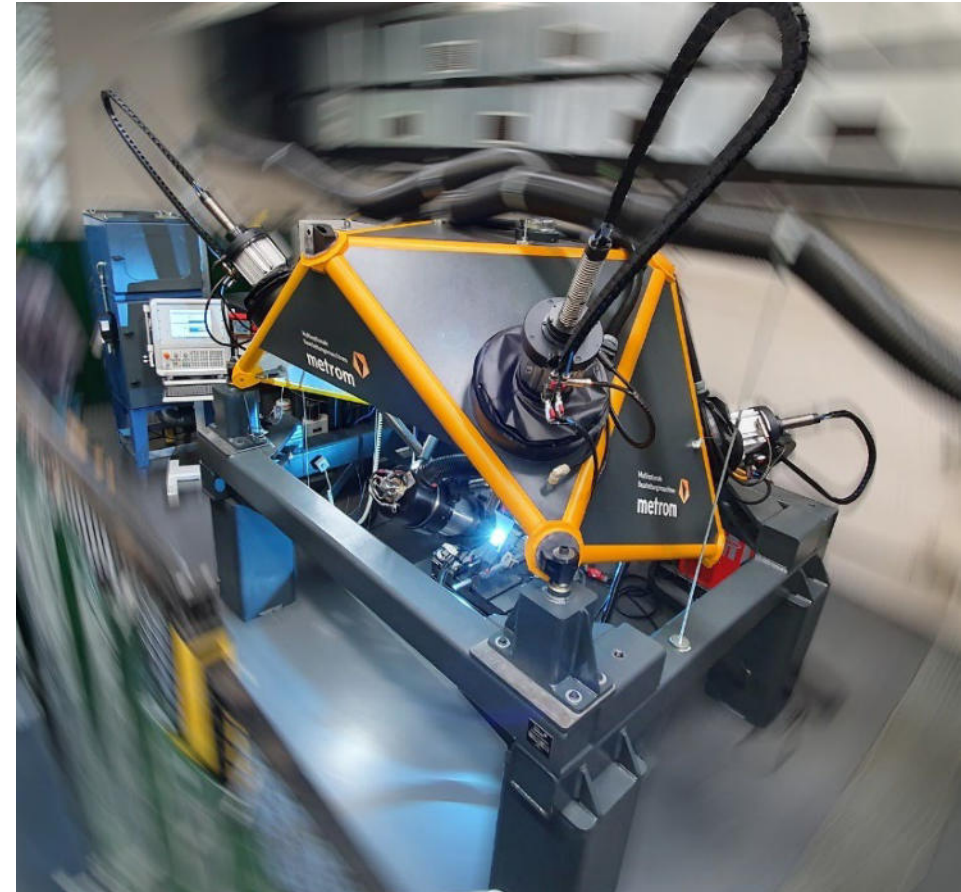
- Hohe Aufbauraten, große Bauteile
- Aufbauen auf existente Teile möglich

Hybride, parallelkinematische, mobile Maschine

- Auswahl von WAAM-Brenner oder Fräs Werkzeug
- Sequentielle additive & subtraktive Fertigung von Metallteilen

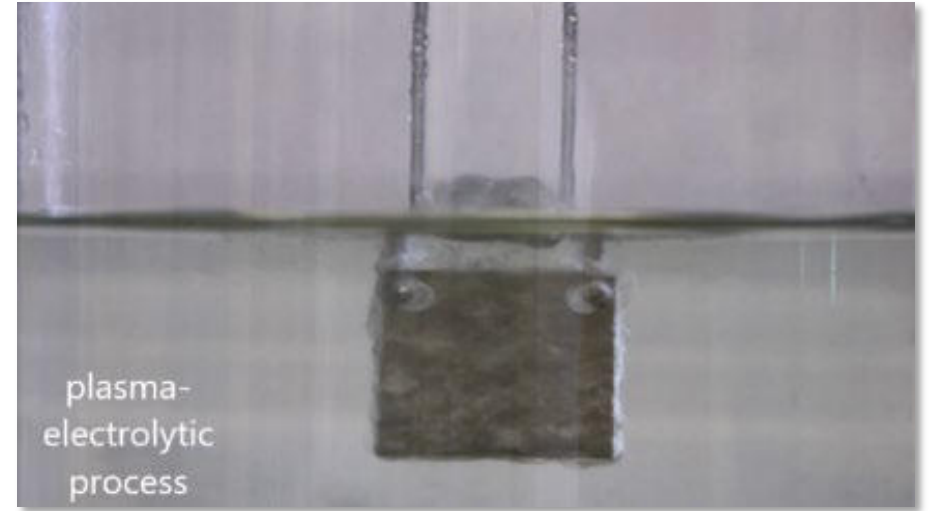
„Mehrtechnologie“ und Mehrachs-fertigung

- DED-LB als zusätzliches Werkzeug
- Prozessparameter für jeden Winkel
- Mehrere Materialien



Plasma-elektrolytisches Polieren (PEP)

- Entgraten, glätten und glänzen von metallischen Bauteilen
 - Komplexe Geometrien polierbar
 - Rauheitsreduktion -> Erhöhung der Dauerfestigkeit
-
- ➔ Entwicklung von Elektrolyt/Legierung Kombinationen
 - ➔ Entwicklung von Maschinenteknik (Bauteilgröße/Selektivität/Innenbearbeitung)
 - ➔ Definition von Oberflächenanforderungen



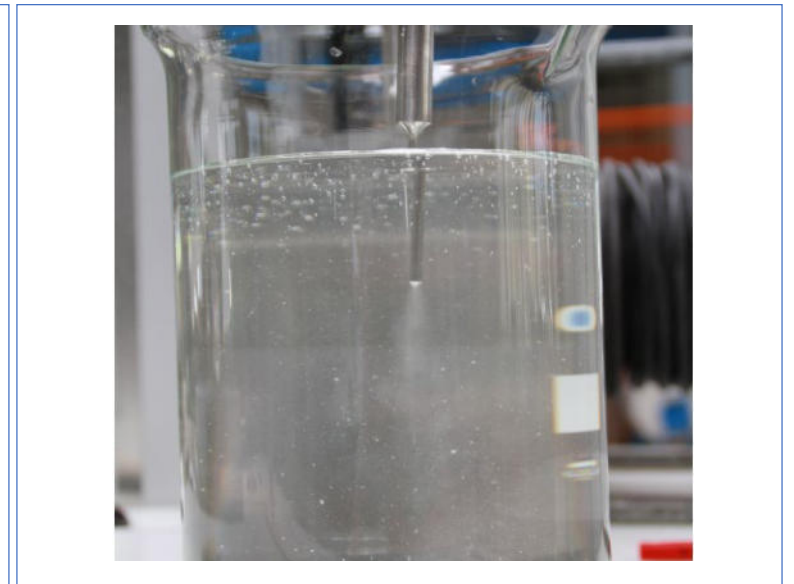
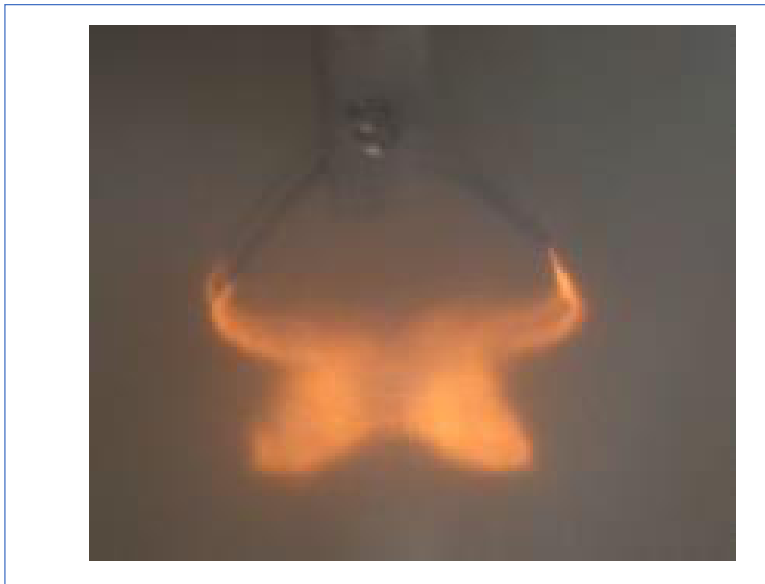
PeP von Stahl



PeP von Ti-Dentalteilen, Stahlnetz, Schweißnähten

PeP – technologische Ansätze

Gesamtoberfläche	Ausgewählte Bereiche	Tiefe Geometrien
Bad-PeP	Jet-PeP	Ultraschall-assistiertes PeP



PeP von AM Bauteilen

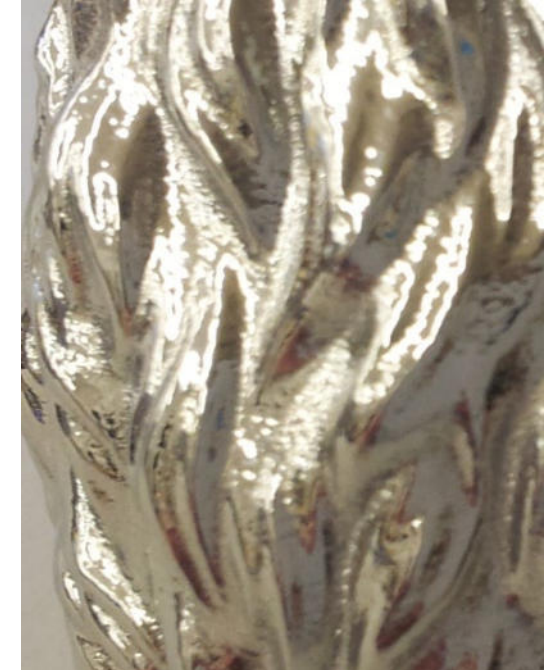
AM (PBF-LB/M) Teil

Material: Stahl 316l

Ziel: glatte Oberfläche, Glanz erhöhen

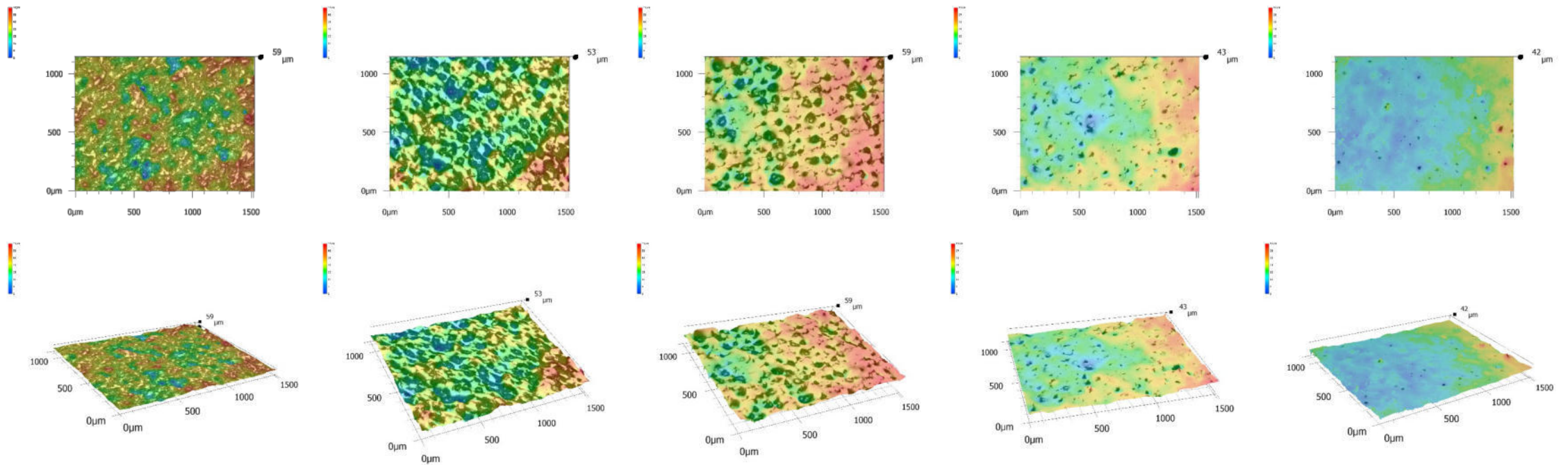
Vorbehandlung: Korundstrahlen

- > Glanzhöhung und Verringerung der Rauheit
- > Reduktion der Sichtbarkeit von Baustufen



PeP von AM Bauteilen

Stahl PBF-LB/M Bauteil, 2-40 min. PeP



PeP von AM Bauteilen

AM (PBF-LB/M) smart spring.

Material: Nitinol

Ziel: glatte Oberfläche

Vorbehandlung: Korundstrahlen

Bauteilfertigung



PBF-LB/M

9 Versuchsbauteile

Prozessparameter:

- Schichtstärke: 60 μm
- Laserleistung: 150 W
- Scan speed: 900 mm/s
- Hatch: 90 μm



PBF-LB/M Teile nach Entpulvern

PeP

Prozessparameter:

- Gleichspannung $u = 330 \text{ V}$
- Materialspezifischer Elektrolyt
- Ti-6-4 Halterung
- Drehung der Teile alle 2,5 min um orientierungsabhängigen Abtrag auszugleichen

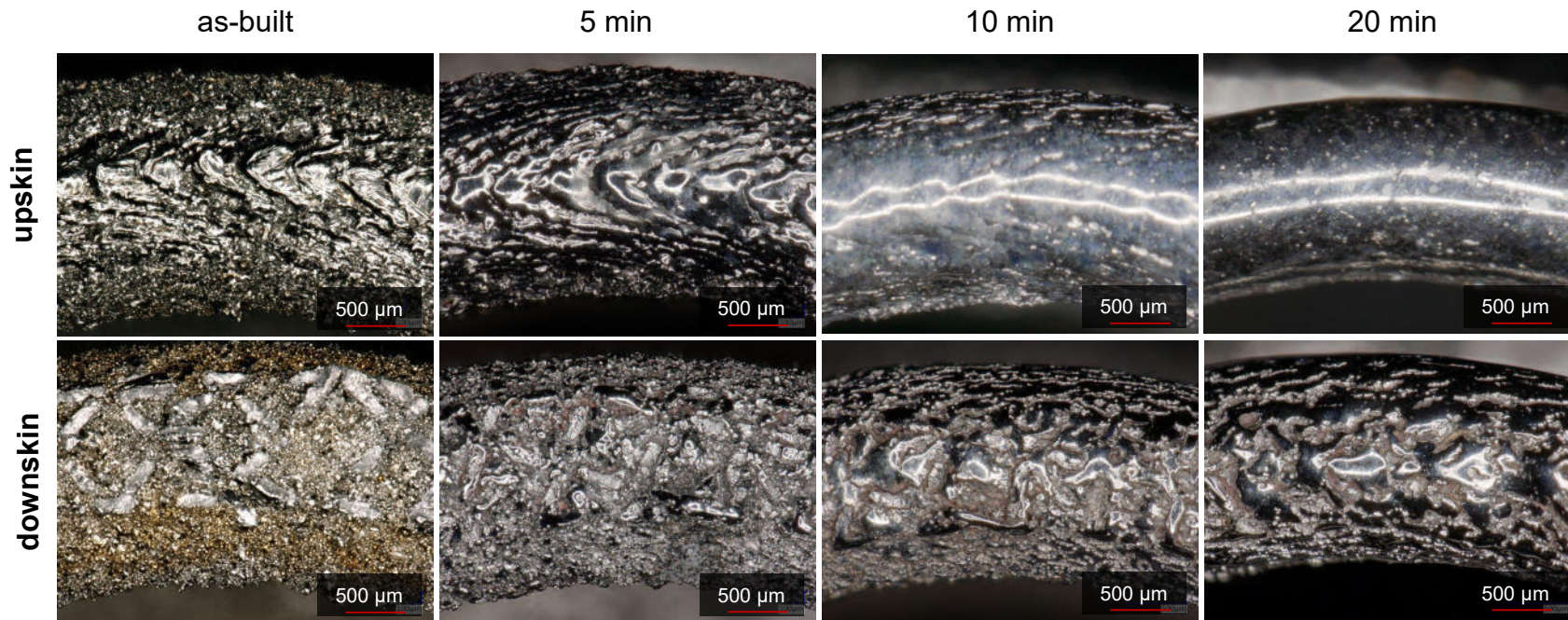


PeP Setup

PeP von AM Bauteilen

AM (PBF-LB/M) smart spring. Material: Nitinol

Comparison upskin vs. downskin surfaces

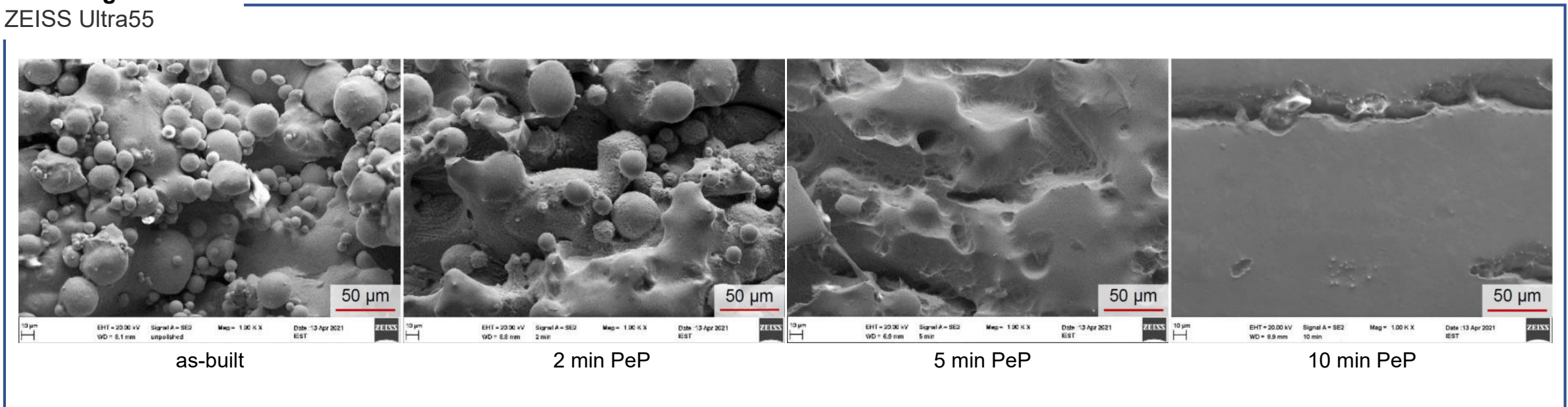


- Smooth, coherent surface achieved
- Stair-step effect completely removed
- No porosity visible
- Removal of residual support structures time-consuming
- No smooth surface achieved, clear notches
- Corresponds to lateral surface after 5 min of PeP

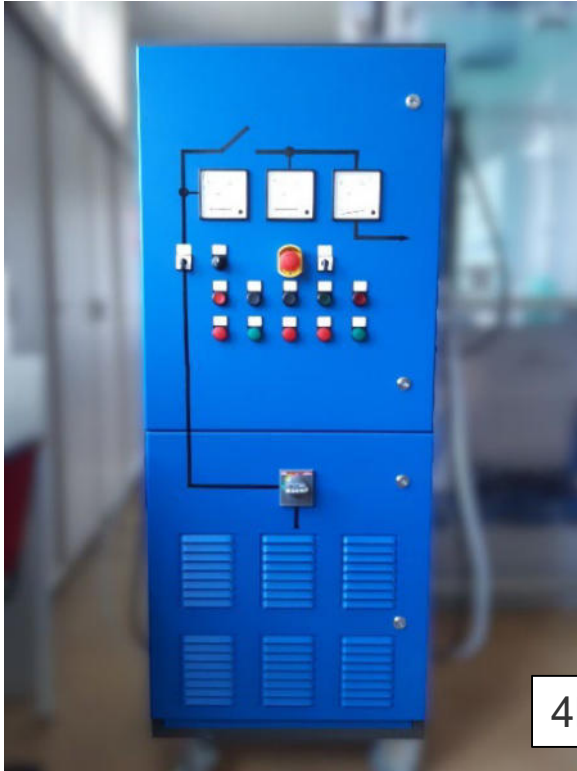
PeP von AM Bauteilen

AM (PBF-LB/M) smart spring. Material: Nitinol

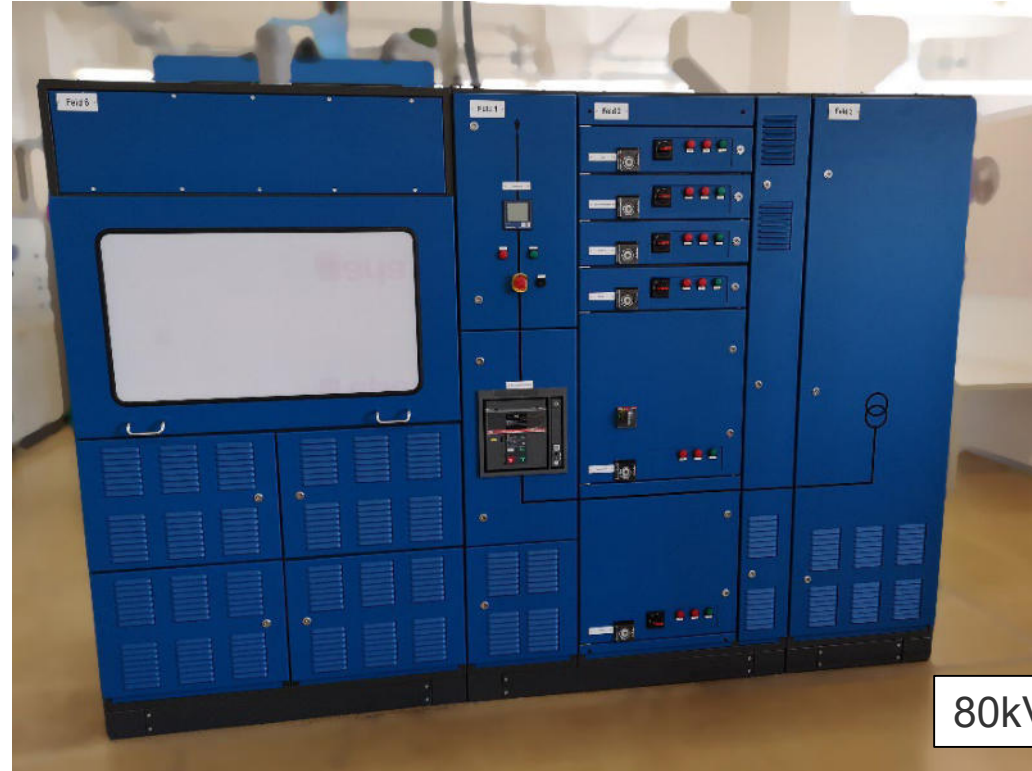
SEM images
ZEISS Ultra55



PeP – Anlagen



4kVA flex PEQ

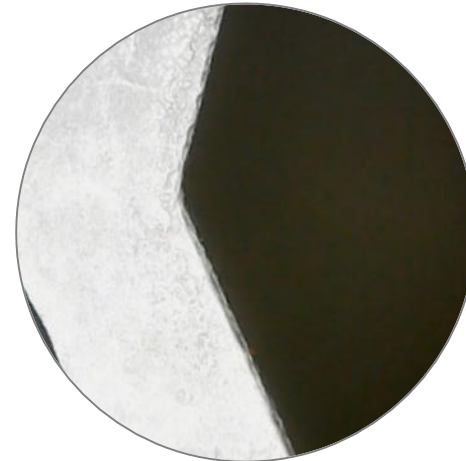


80kVA PeP setup

PeP – selektive Bearbeitung



unbearbeitet



15s



60s

- Selektives Entgraten und Polieren
- Roboter-basierte Kinematik

Neue Materialien für die additive Fertigung

1. Befriedigen von Bedarfen mit bekannten Materialien (die noch nicht AM-fähig sind).
 1. Reinkupfer
 2. Glas
 3. ...
2. Materialien spezifisch für AM designen, um AM Prozesse zu verbessern.
 1. Niedrige Eigenspannungen
 2. Hohe Absorption
 3. ...
3. Erweitern der verwendbaren Materialpalette hinsichtlich Nachhaltigkeit.
 1. Weitere Herstellverfahren
 2. Reststoff-Upcycling
 3. ...

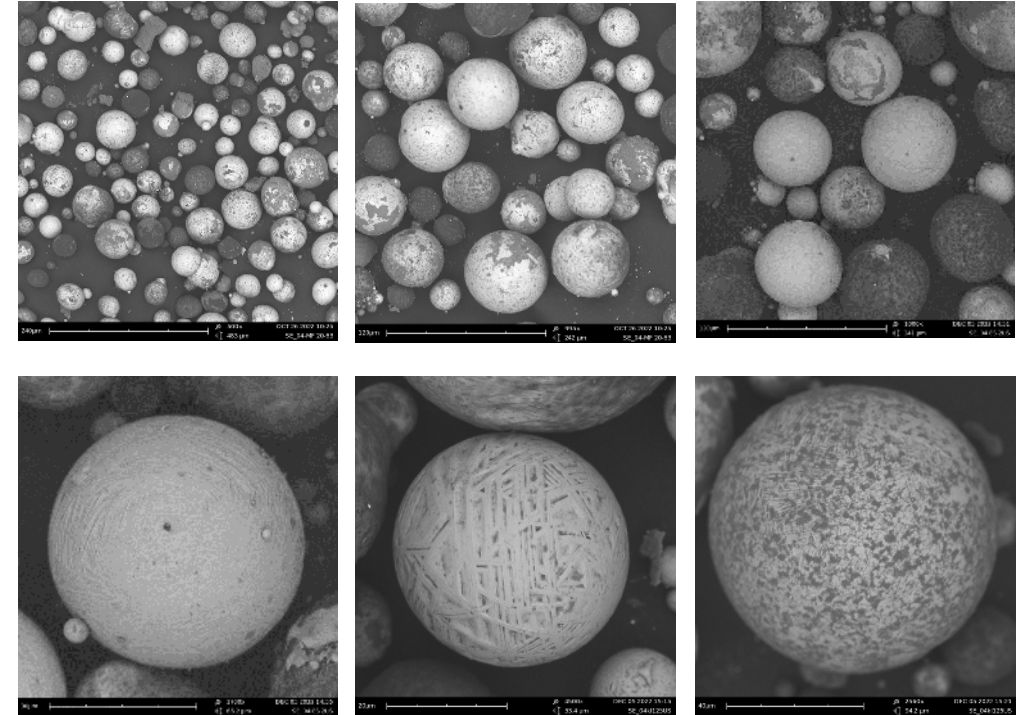
Additive Fertigung mit metallischen Pulvern aus Reststoffen: „Rec4AM“

AiF IGF Projekt

- Upcycling von EDM Schlämmen für die AF
- MVT/AT, IMKF/AF, BTE
- PBF-LB/M

Entwicklung von AF Parametern

- PBF-LB/M Parameter
- DED-LB und BJT Parameter
- Bewertung der gefertigten Teile
- Konstruktionsempfehlungen



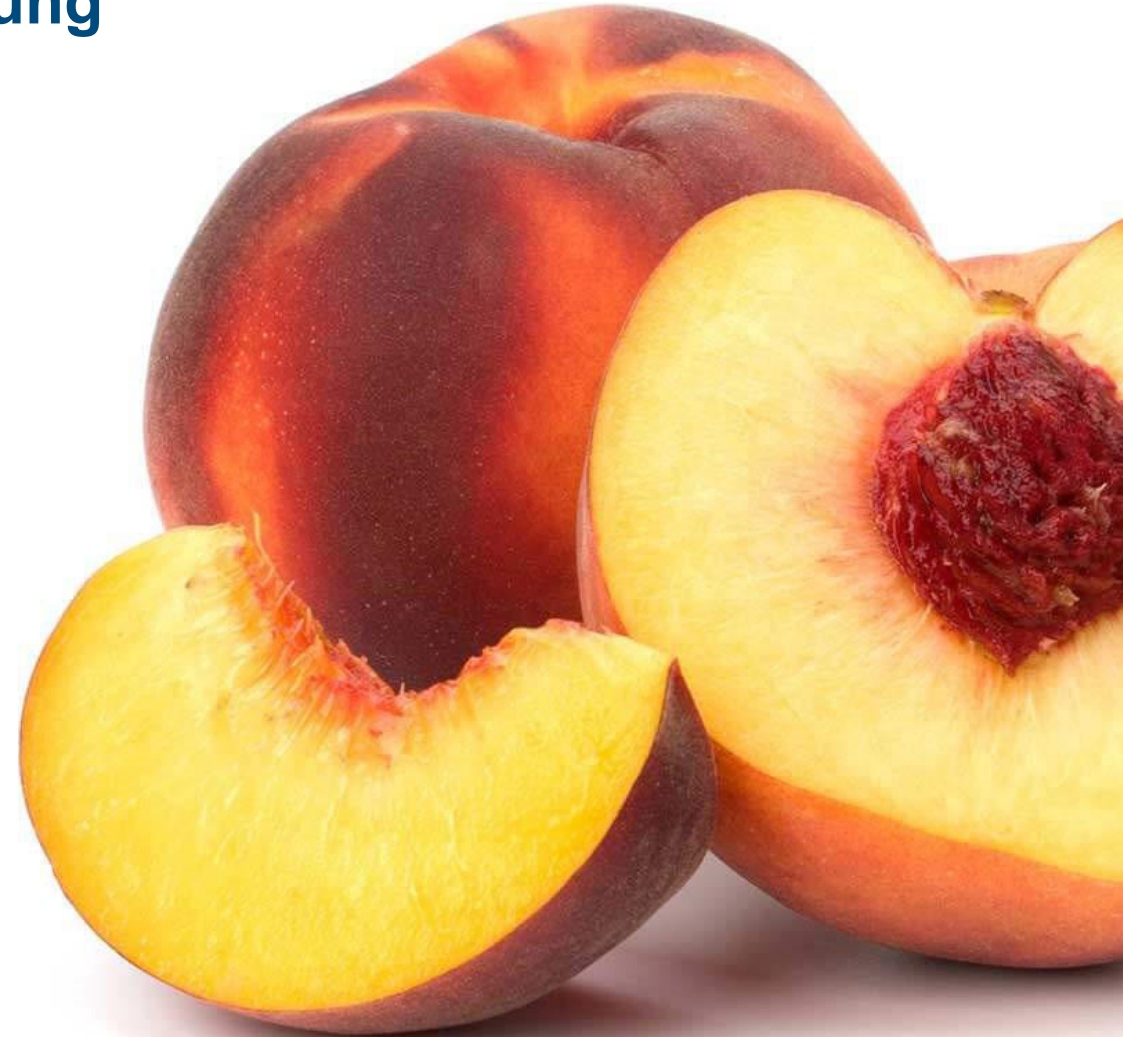
Reststoff-Upcycling durch Additive Fertigung

Motivation: Biobasierte Reststoffe

...und deren sinnvolle Nutzung,
die über die energetische Verwertung hinausgeht.

- ➔ Ungenutztes nutzbar machen / Ressourcen schonen
- ➔ Eigenschaften ausschöpfen / Funktionalität schaffen

➔ „neue“ Technologien für „neue“ Werkstoffe?



Reststoff-Upcycling durch Additive Fertigung

- Nutzung von biologischen/nachwachsenden und bioabbaubaren Materialien
 - Upcycling von Reststoffen
 - Lokal vorhandene Rohstoffe nutzbar machen
-
- ➔ Screening von verfügbaren Materialien
 - ➔ Entwicklung von Pulver/Binder Kombinationen
 - ➔ Entwicklung von Maschinenteknik (Materialvarianz/Bauteilgröße/Portabilität)
 - ➔ Auslegung von Anwendungen

Transfer



3D Printing (BJT) mit nachwachsenden Rohstoffen (© BTE)



Miscanthusgras als Rohstoff für AM, Bauteil

SAMSax – Was sind unsere Ziele?

Ressourcen nachhaltig nutzen

- Kleinen und mittleren Unternehmen (**KMU**) die Möglichkeit zu geben, **additive Fertigungstechnologien** für ihre Geschäftsfelder **zu testen, ohne** vorher in **kostenintensive Anlagen** investieren zu müssen
- **Upcycling** von regional anfallenden organischen und anorganischen Reststoffen sowie Nebenprodukten aus Industrie und Landwirtschaft
- **Reduzierung** von Abfallmengen und CO₂-Emissionen
- Unterstützung des **Klimaschutzes durch Kreislaufwirtschaft**
- **Vernetzung** aller beteiligten Akteur:innen
- **Digitalisierung** und **Wissenstransfer**



Reststoff-Upcycling durch Additive Fertigung

Forschung und Transfer: SAMSax Reallabor



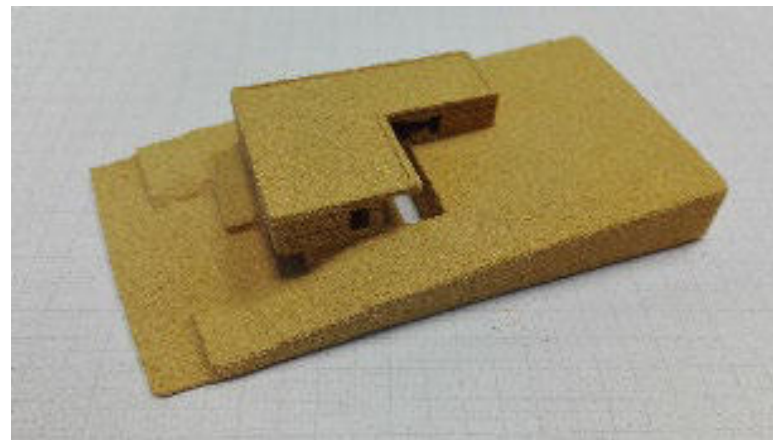
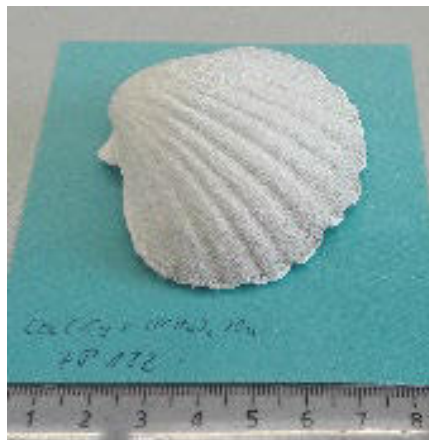
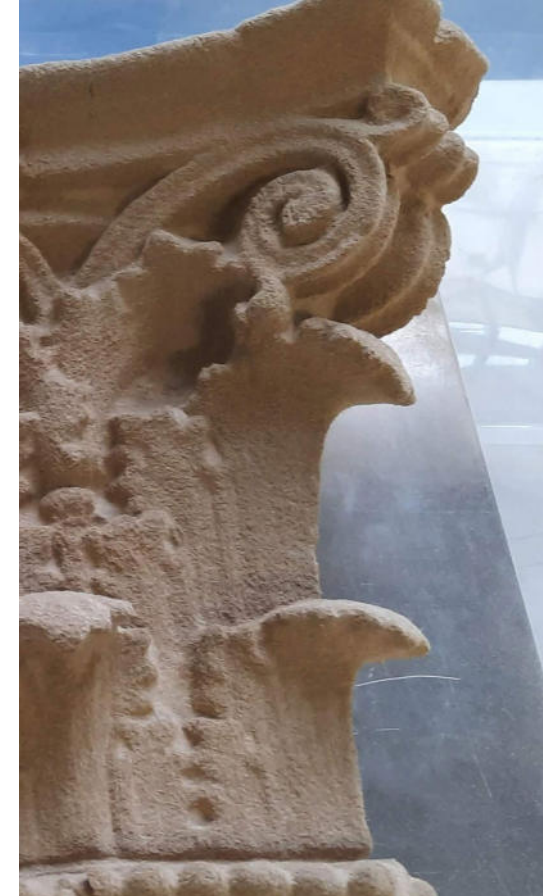
Reststoff-Upcycling durch Additive Fertigung

Beispiele: biologische Reststoffe zur Verarbeitung in der Additiven Fertigung

Gräser	Miscanthus	Flachs	Spreustroh	...
Kerne	Aprikose	Pfirsich	Pflaume	...
Schalen	Haselnuss	Reis	Kokosnuss	...
Hölzer	...aus Sägewerk	...aus Tischlerei	...aus Industrie	...
Muscheln	Chitin/Chitosan	Kaffeesatz/bohnen	Invasive Arten	...
Lignin	Papierfasern	Bienenwachs	Mycel	...
Gelatine	Kollagen	Alginat	Kolophonium	...

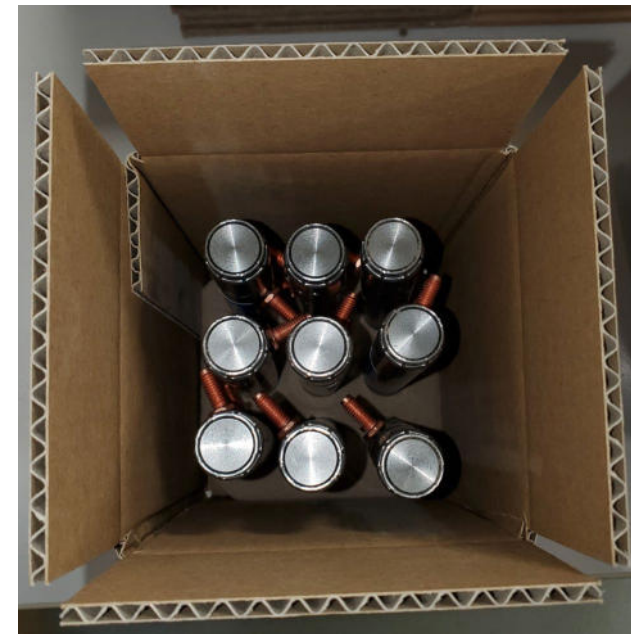
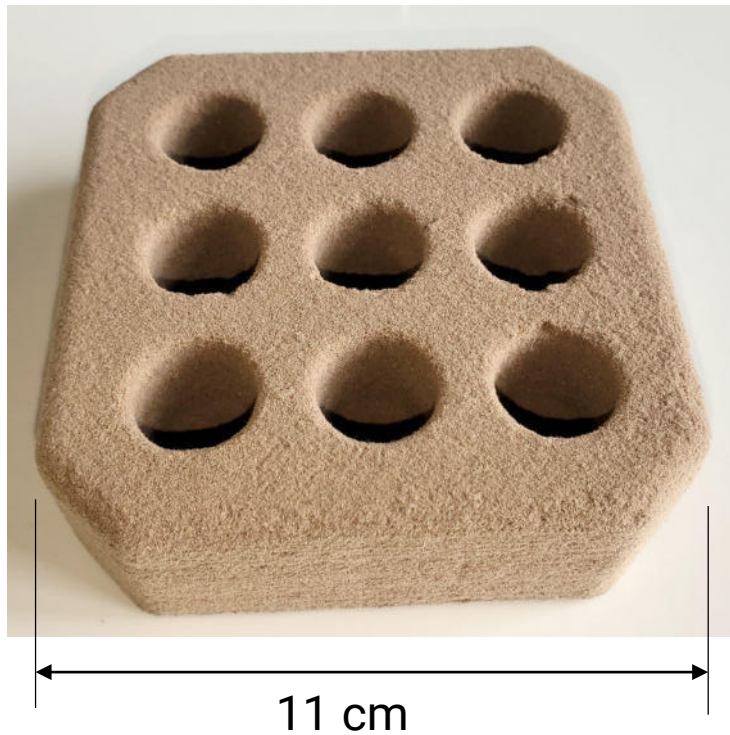
Reststoff-Upcycling durch Additive Fertigung

Beispiele: Binder Jetting



SAMSax - Use Cases

Verpackungseinleger aus Papierstaub und Baumharz



SAMSax - Use Cases

Säulenkapitelle aus Miscanthusgrasstaub

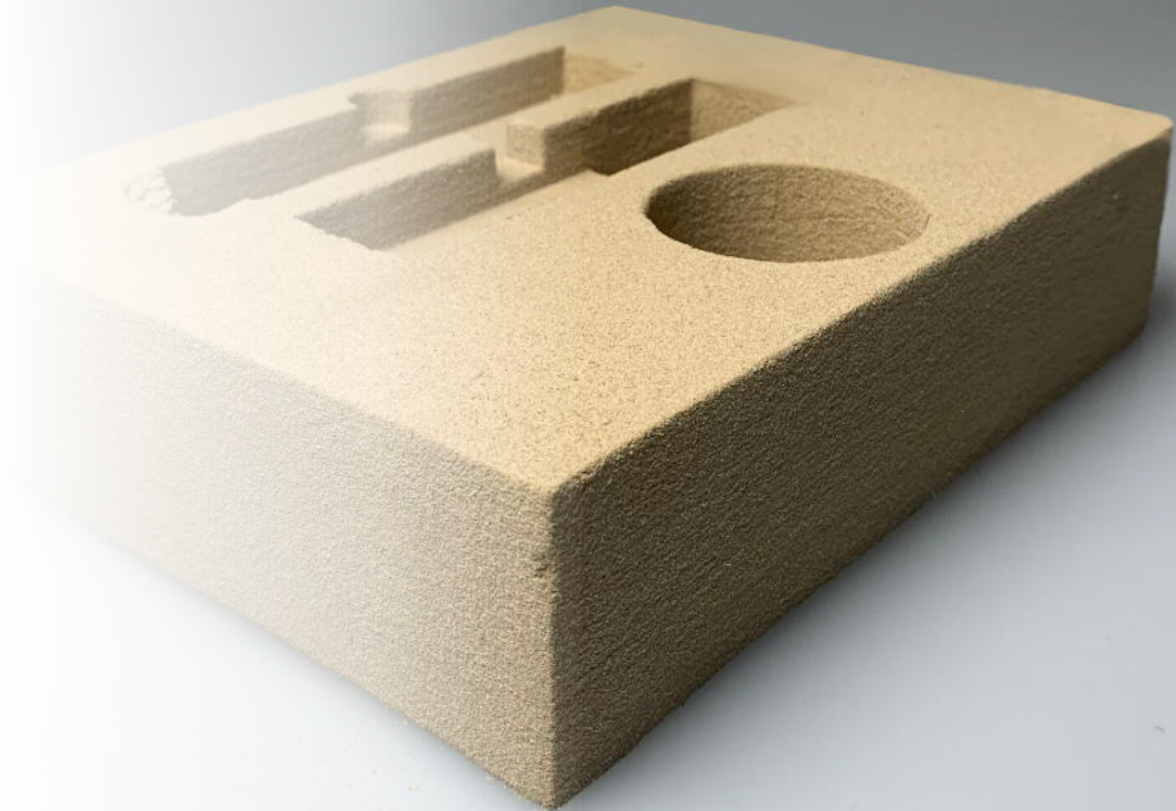


© Nasser Hashemi

Reststoff-Upcycling durch Additive Fertigung

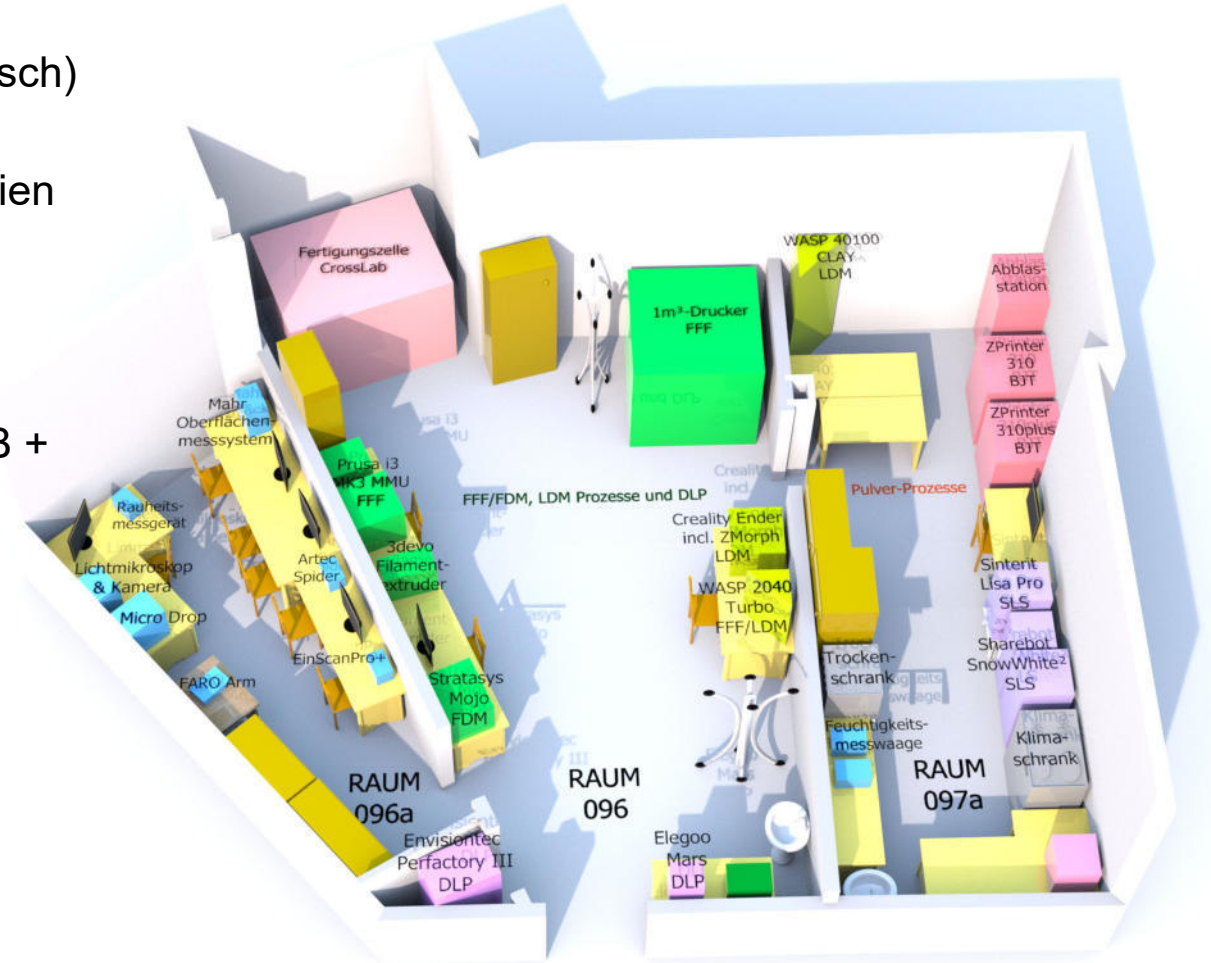
Ausblick

- ➔ Biologische Reststoffe bieten ein großes Potential für “4D”-Anwendungen
- ➔ Additive Fertigungstechnologien können die Werkstoffe prinzipiell verarbeiten
- ➔ Neue Herausforderungen an die Maschinen und Technologien entstehen -> “**resiliente Prozesse**”
- ➔ Interdisziplinäre Zusammenarbeit ist unersetzlich!



Additive Fertigung – Technologiekenntnis erweitern

- Viele AM-Prozesse (Kunststoff/Metall/biologisch/keramisch) im Labor maschinenseitig vorhanden
 - Studierende haben direkten Zugang zu allen Technologien
 - Vollumfängliche Ausbildung der Experten von morgen
-
- ➔ BJT + PBF-LB/P + MEX-TRB (2K / large scale 1m³) + VPP-UVM + PBF-LB/M + SHL-AJ + DED-Arc + DED-LB + MEX-CRB (+ PBF-EB)
 - ➔ Datenerfassung / 3D-Scanner
 - ➔ Software für CAD + Pre-Processing
 - ➔ Materialvorbereitung (Sieben + Mahlen + Extrudieren)
 - ➔ Post-Processing (Wärmebehandlung + Spanen + PeP)
 - ➔ Messtechnik (Oberfläche/Geometrie)
 - ➔ Remote-Lab im (weiteren) Aufbau



Additive Fertigung – Technologiekenntnis erweitern

Studiengänge Additive Fertigung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

**ZUKUNFT
GESTALTEN**

Bachelor

ADDITIVE FERTIGUNG
(TECHNOLOGIE, MATERIAL, DESIGN) studieren-in-freiberg.de



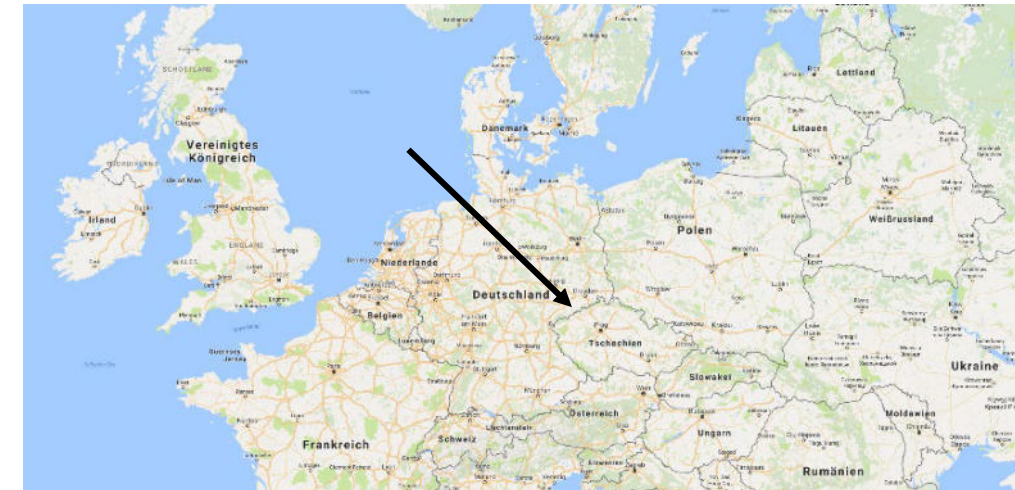
Seit Sommersemester 2024 gibt es auch den
Master-Studiengang (M.Sc.) Additive
Fertigung!

Additive Fertigung

Kontakt:

Technische Universität Bergakademie Freiberg
IMKF - Additive Fertigung
Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, Germany

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler
Tel: +49 3731 39 30 66
henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de



Plenarvorträge

Makro-SLM: Ein neues Verfahren zur schnellen additiven Fertigung von großvolumigen Metallbauteilen

Martin Erler,
Lasereinstitut Hochschule Mittweida



Laserinstitut
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE
MITTWEIDA
University of Applied Sciences

Makro-SLM

**Ein neues Verfahren zur schnellen
additiven Fertigung von
großvolumigen Metallbauteilen**

Prof. Dr.-Ing. André Streek

Martin Erler, M.Sc.

Sebastian Weinhold, M.Sc.

Michael Pfeifer, M.Sc.

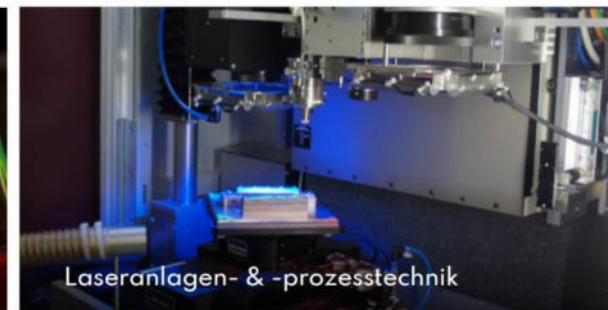
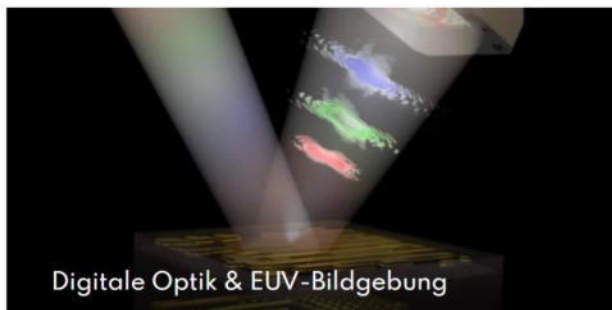
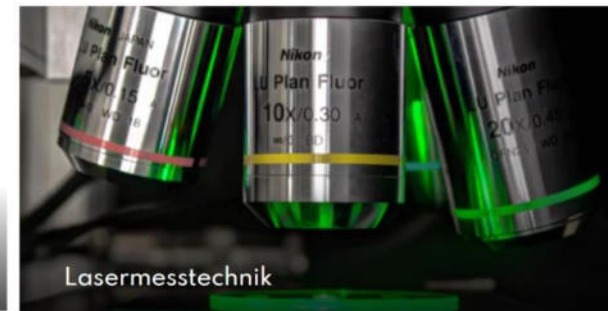
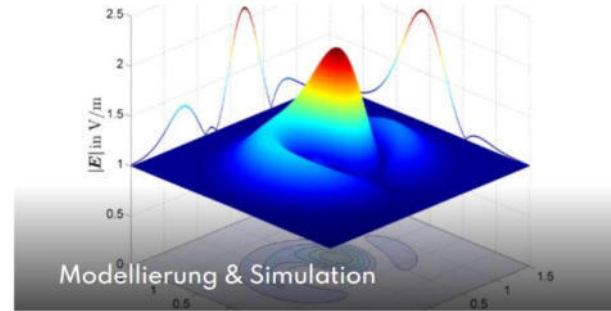
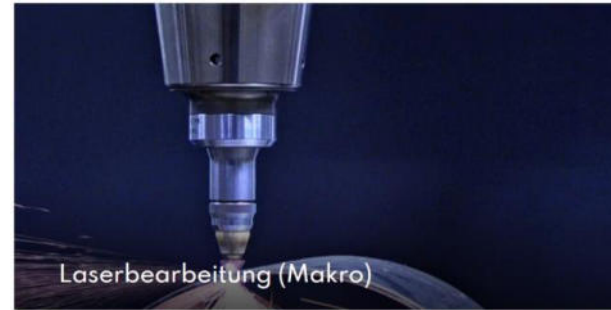
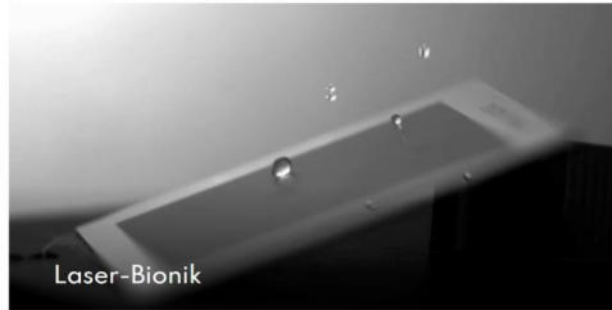
Andreas Kotsch, M.Eng.



www.laser.hs-mittweida.de

Technologische Schwerpunkte am LHM

- anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung im Bereich der Lasertechnik
- über 50 Jahre Erfahrung im Bereich der Laserforschung

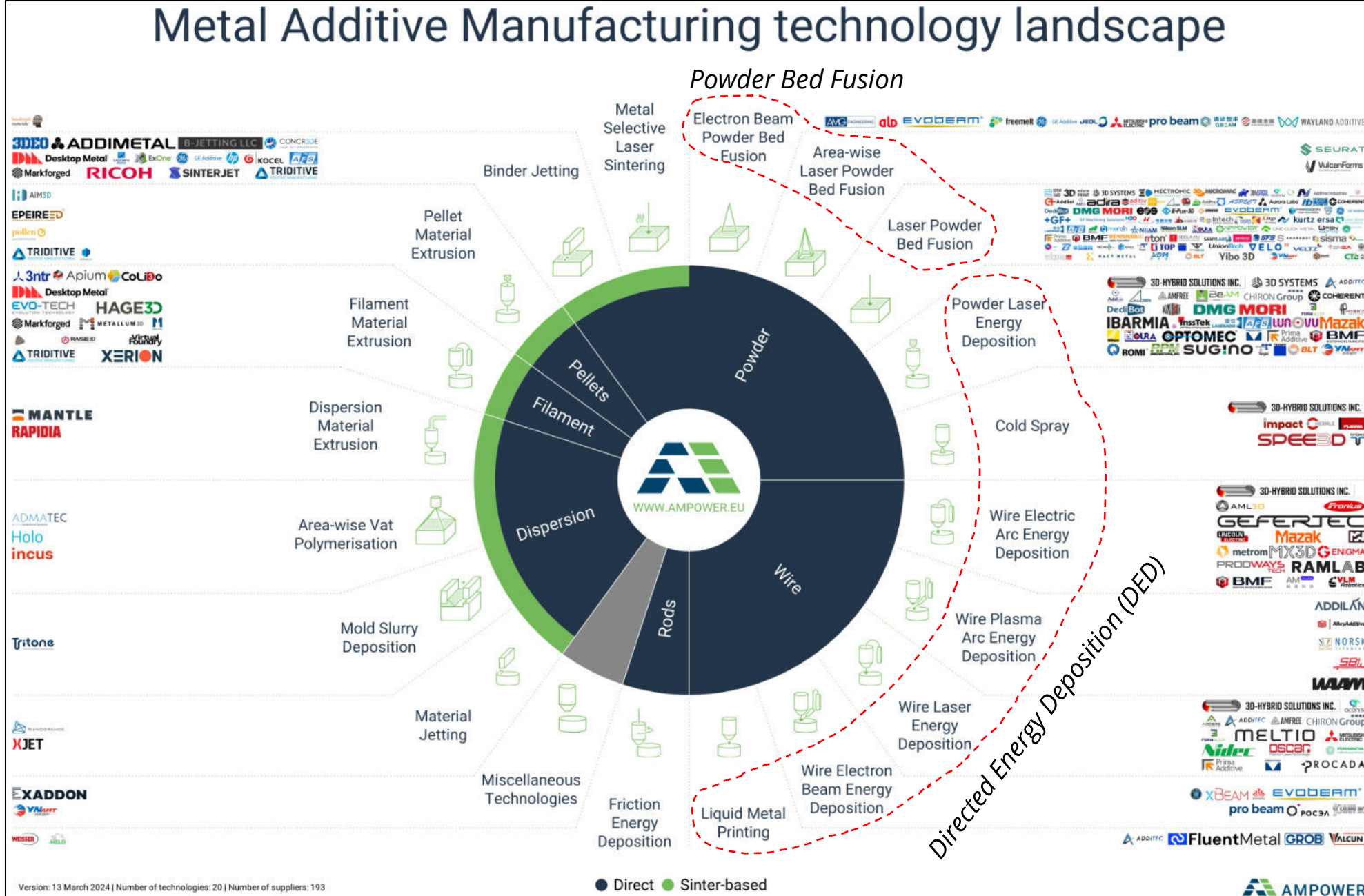


Metal Additive Manufacturing technology landscape

Aktuell 20 verschiedene Technologien!!!

Unterscheidung in der Art des Ausgangsmaterials und der Energieeinbringung

einstufig: Metall wird direkt aufgeschmolzen
oder
 zweistufig: Mittels Binder wird ein Grünling hergestellt und anschließend im Ofen versintert



Prinzip:

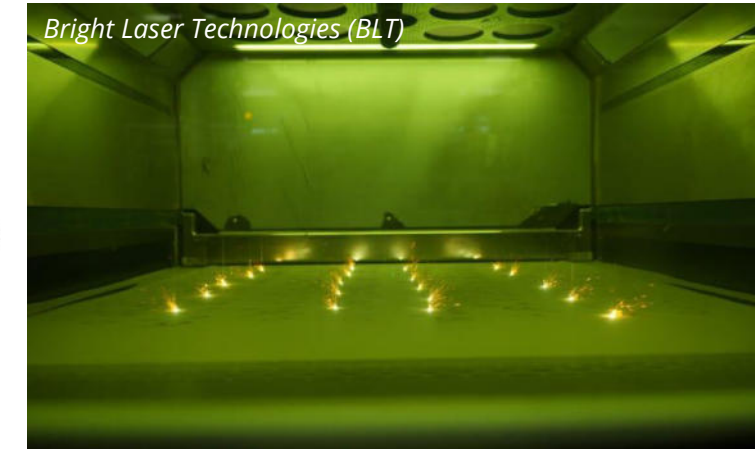
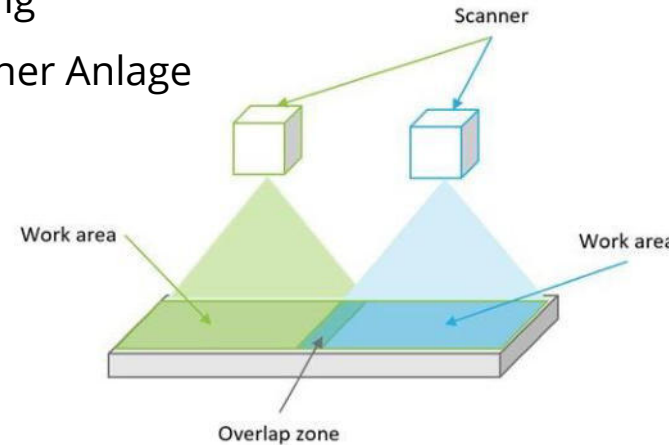
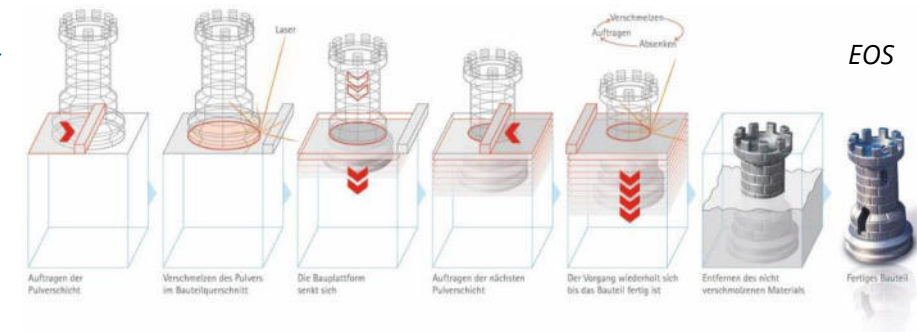
- Laser-Powder-Bed-Fusion (SLM oder L-PBF)
- Steigerung der Produktivität durch Parallelisierung
- Einsatz von bis zu 64 x 700 W Lasersysteme in einer Anlage

Vorteile:

- Bauraum von bis zu **2 x 2 x 1 m³ (x, y, z)**
- hohe Strukturauflösung von 80 - 200 µm
- Bauteilkomplexität nahezu unbegrenzt
- hohe Aufbauraten bis 1.000 cm³/h

Nachteile:

- hochkomplexe und teure Maschine
- reaktives und gesundheitsschädliches Pulver → Handling schwierig
- große Mengen Pulver für die Erstbefüllung notwendig
- Bauraumgröße begrenzt



Prinzip:

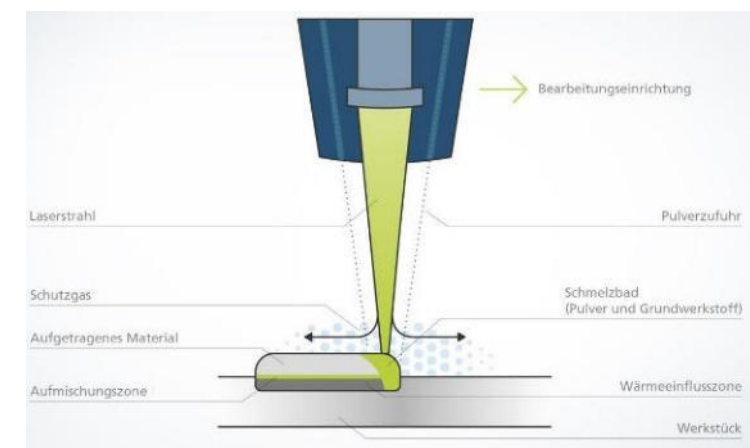
- Directed Energy Deposition (z.B. WAAM, Laserauftragschweißen)
- Ausgangsmaterial liegt als Pulver oder Draht vor

Vorteile:

- Bauraum nahezu unbegrenzt bei einfacher Bauteilkomplexität
- keine reaktiven und gesundheitsschädlichen Pulver (bei Draht)
- nur so viel Ausgangsmaterial, wie für das Bauteil notwendig
- hohe Aufbauraten bis 1.200 cm³/h
- Fertigung schwerer und großer Bauteile möglich

Nachteile:

- komplexe Bahnsteuerung
- geringe Strukturauflösungen (> 2 mm)
- Bauteilkomplexität begrenzt (z.B. keine Brücken)
- größerer Nachbearbeitungsaufwand



TRUMPF

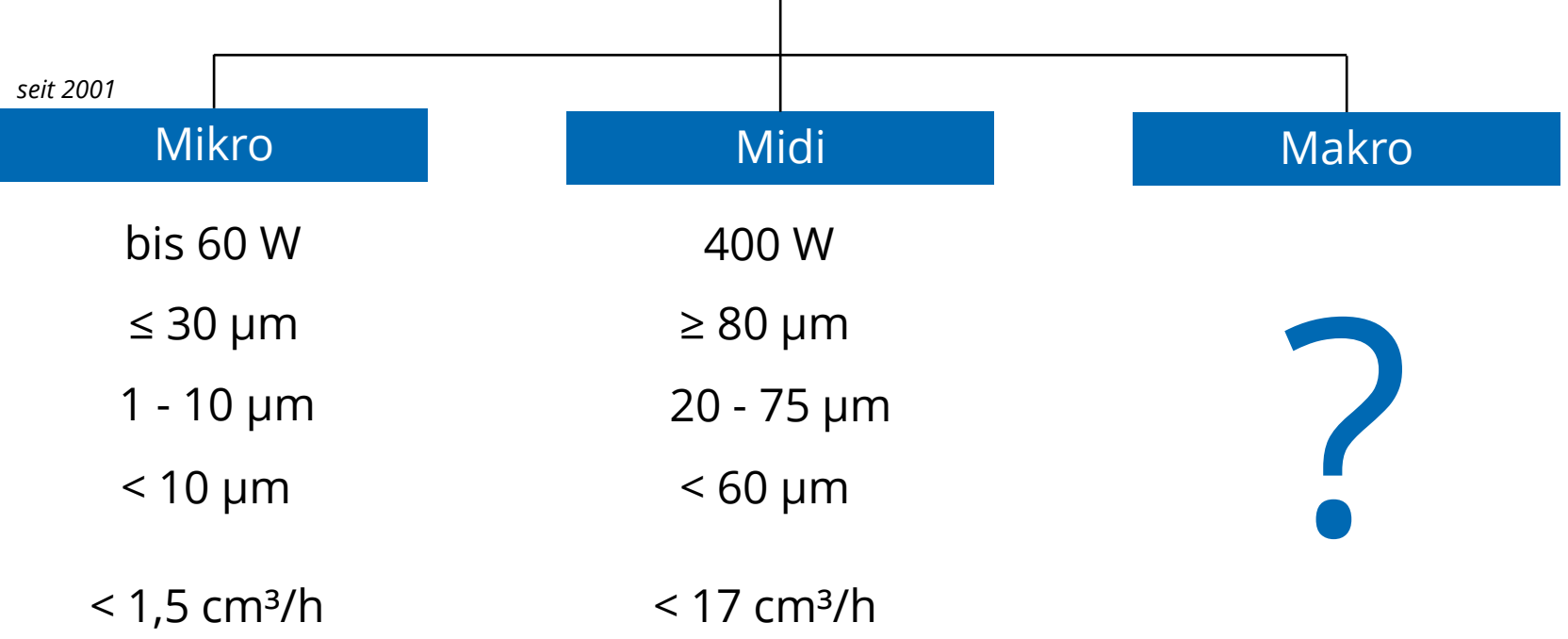


Relativity Space

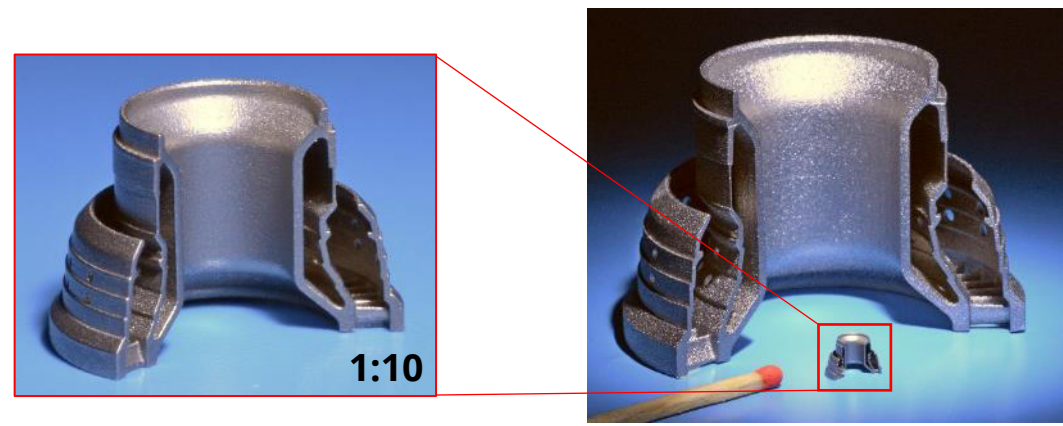


GEFERTEC

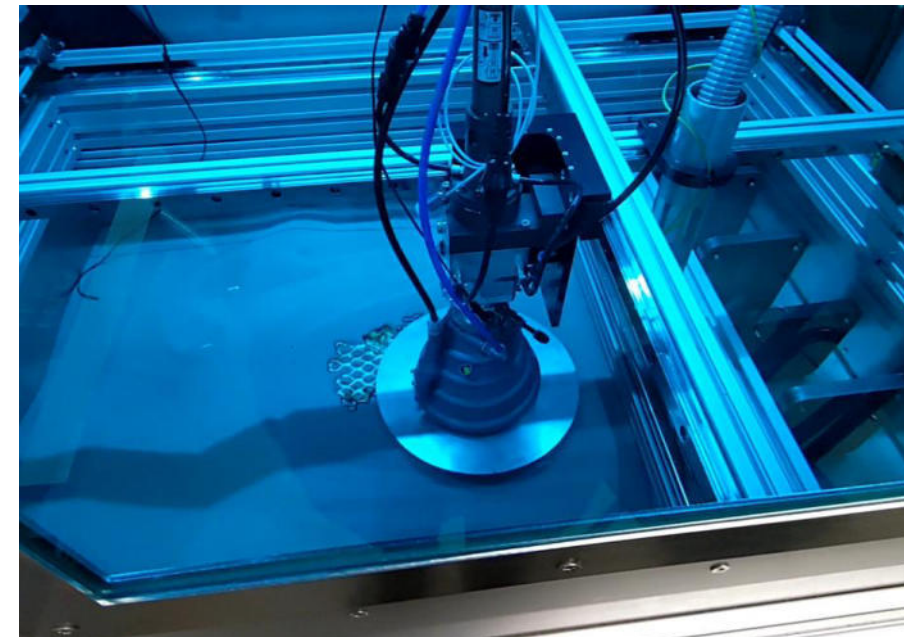
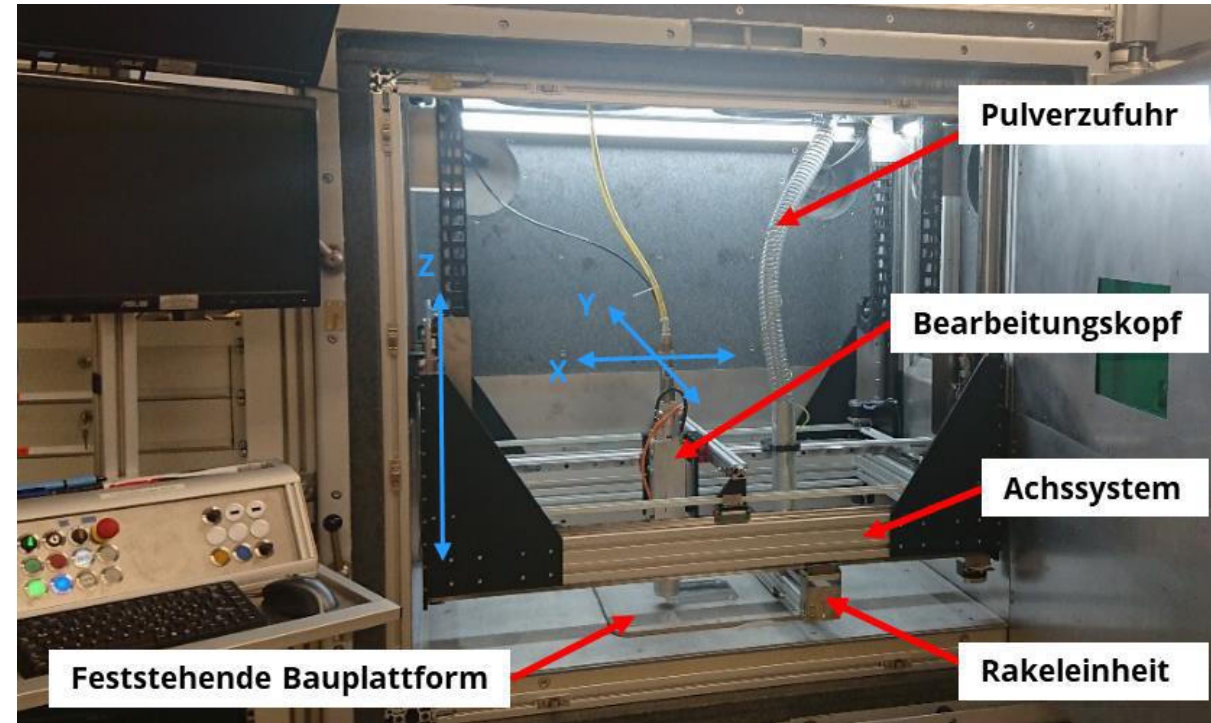
Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM oder L-PBF)



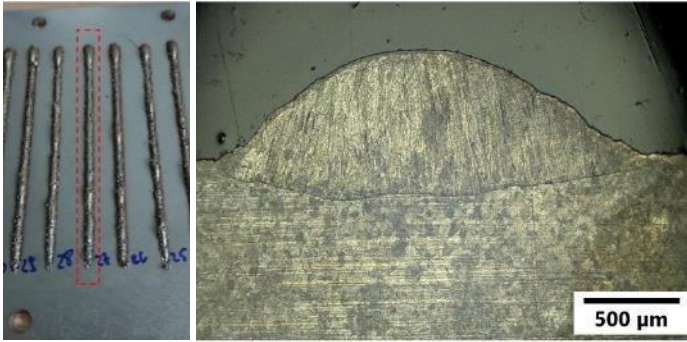
- Laserleistung
- Spotdurchmesser
- Schichtdicken
- Pulverkorngroßen
- Aufbauraten (Edelstahl)



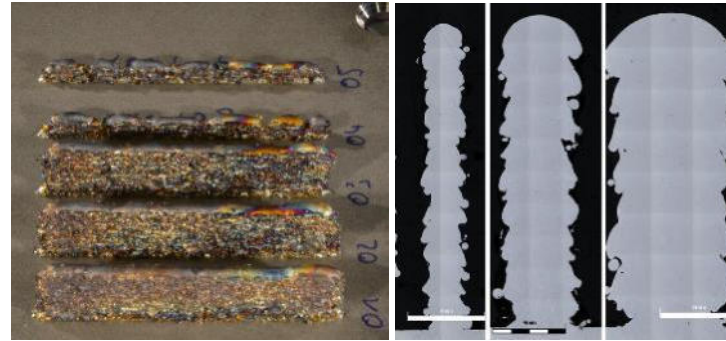
- einfaches, kostengünstiges und skalierbares Anlagenkonzept
- großer Bauraum von **1 x 0,8 x 0,5 m³**
- feststehende Bauplattform und sich nach oben bewegendes Achssystem
- Schmelzprozess findet unter Schutzgasglocke statt
- Hochleistungslaser mit 8 kW (Einzelstrahl)
- variabler Spotdurchmesser von 2 bis 6 mm
- Verwendung von grobem Metallgranulat > 200 µm
 - *Faktor 10 günstiger als SLM-Pulver (teils unter 5 €/kg)*
 - *einfaches Handling (keine Explosions- oder Gesundheitsgefahr)*



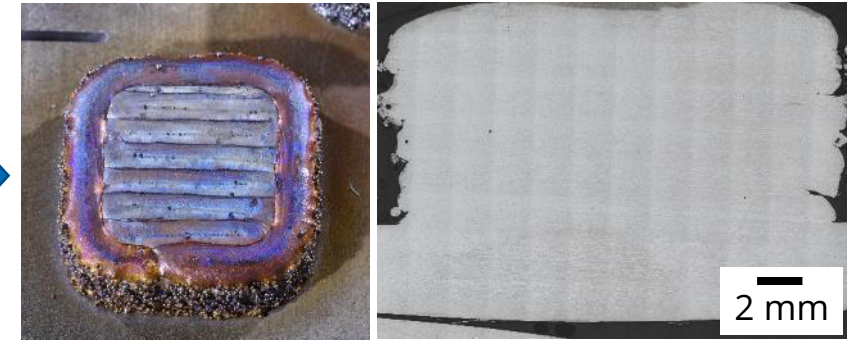
Einzelspuren



Wandaufbau mit variabler Wandstärke



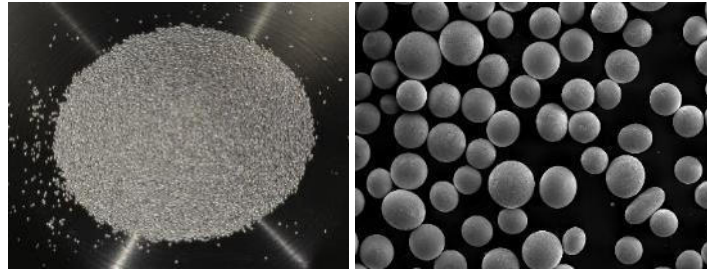
Volumenkörper



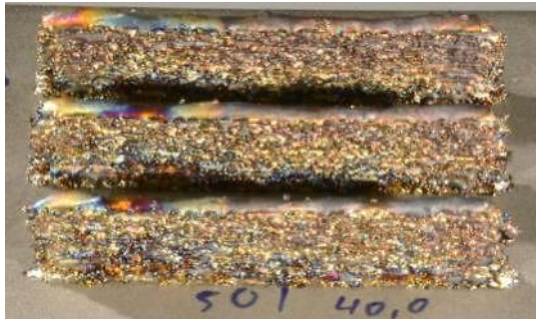
SLM-Pulver < 60 µm



Grobkorn > 200 µm



laterale Schutzgaszufuhr



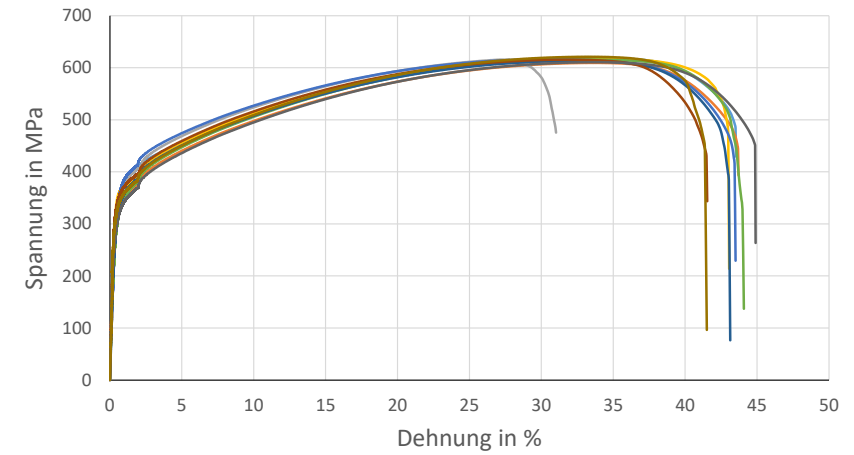
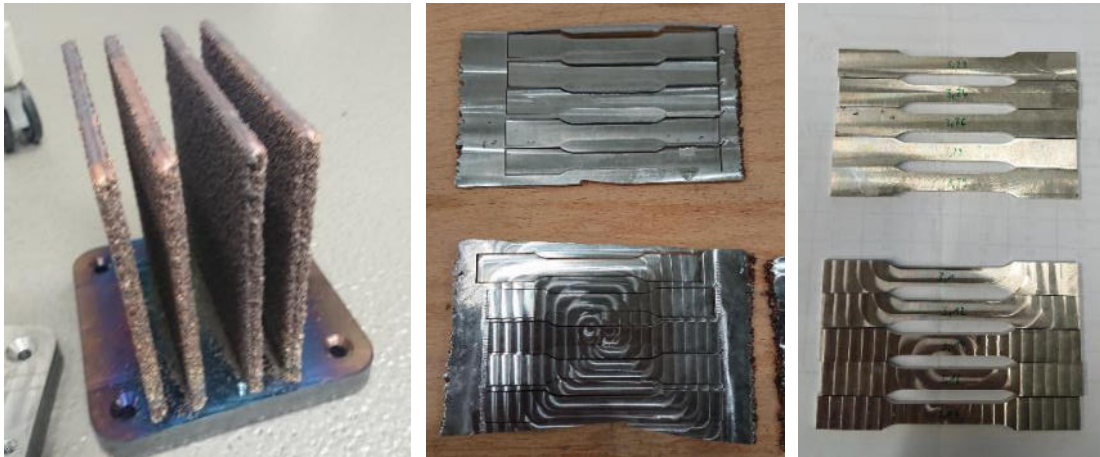
Schutzgasglocke



Ergebnisse:

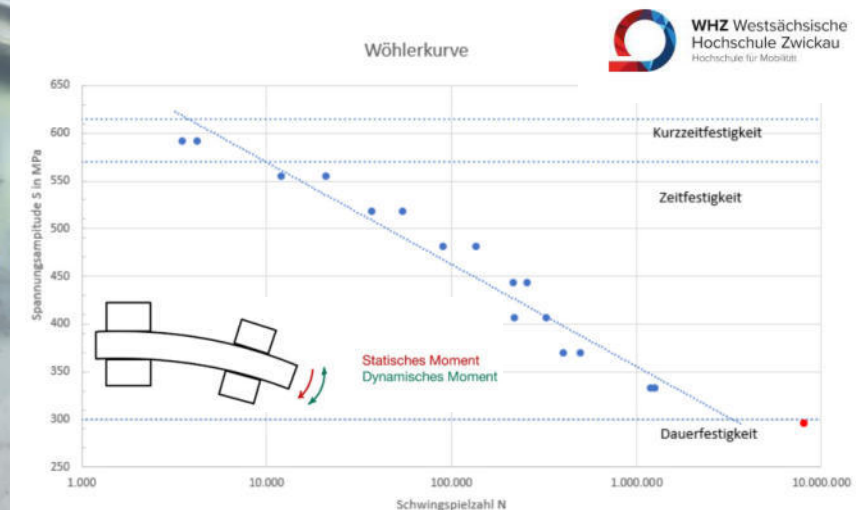
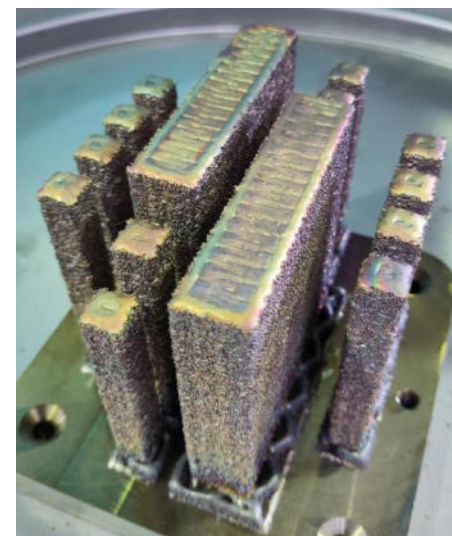
- Material: Edelstahl 1.4301
- Umsetzung von 8 kW Laserleistung
- Einzelwandbreiten: 1,8 - 5,5 mm; Schichtdicke: 0,5 - 1,5 mm
- Bauteildichte 7,8 g/cm³ (≥ 99,5 %)
- Aufbauraten bis 1.300 cm³/h (entspricht: 10 kg/h)
- minimale Prozess-Nebenprodukte (Verdampfung, Spritzer)
- effektiver Energieeintrag ($E_v = 30 \text{ J/cm}^3$; $SLM > 60 \text{ J/cm}^3$)

- Zugversuche von horizontalen und vertikalen Proben

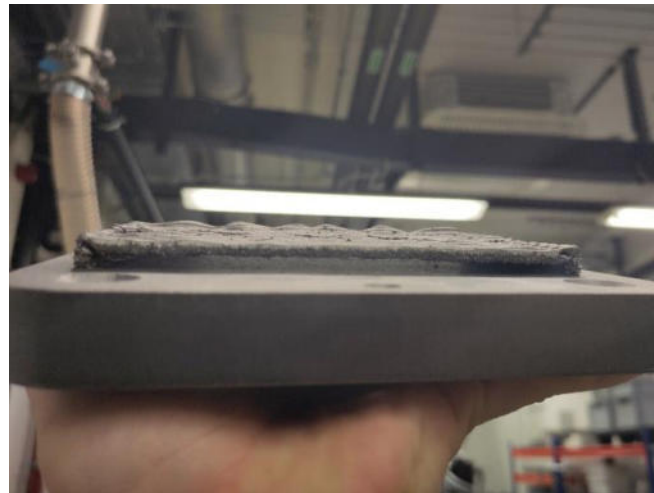
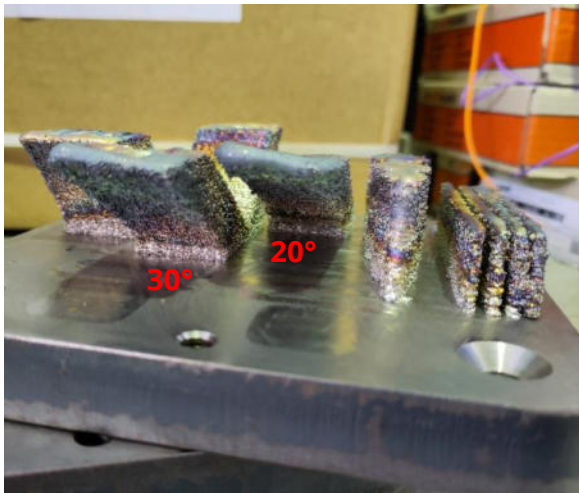
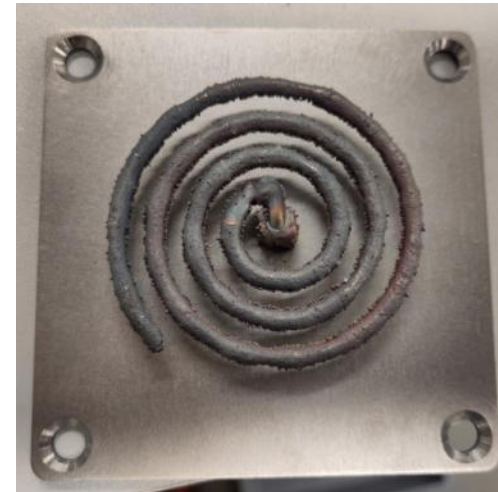
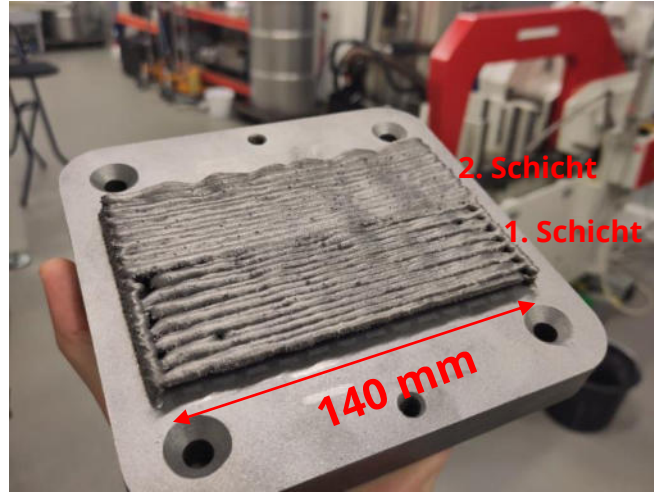
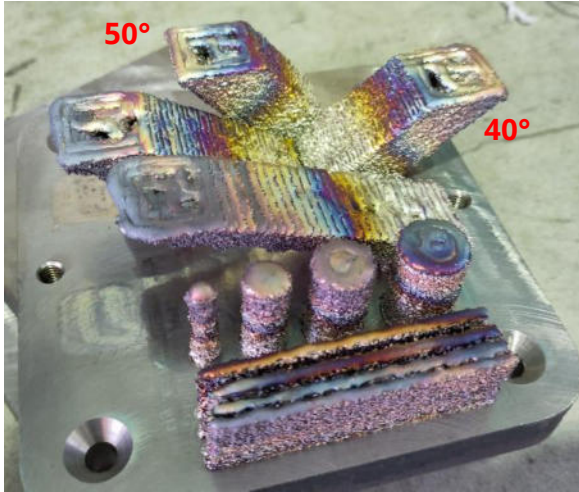


	1.4301 (Vollmaterial, DIN EN 10088-3)	Makro-SLM (Proben horizontal / liegend)	Makro-SLM (Proben vertikal / stehend)
Zugfestigkeit, R_m	500 - 700 MPa	615 ± 3,6 MPa	614 ± 2,6 MPa
Dehngrenze, $R_{p0,2}$	≥ 190 MPa	321 ± 21,2 MPa	315 ± 11,4 MPa
Bruchdehnung, A	≥ 25 %	43 ± 1,1 %	44,2 ± 1,9 %

- dynamische Belastungstests:
Dauerfestigkeit (ab 1 Mio. Zyklen) → 300 MPa



- Überhangwinkel bis 20° und Brücken bis 140 mm wurden realisiert
- freitragende Strukturen sind möglich



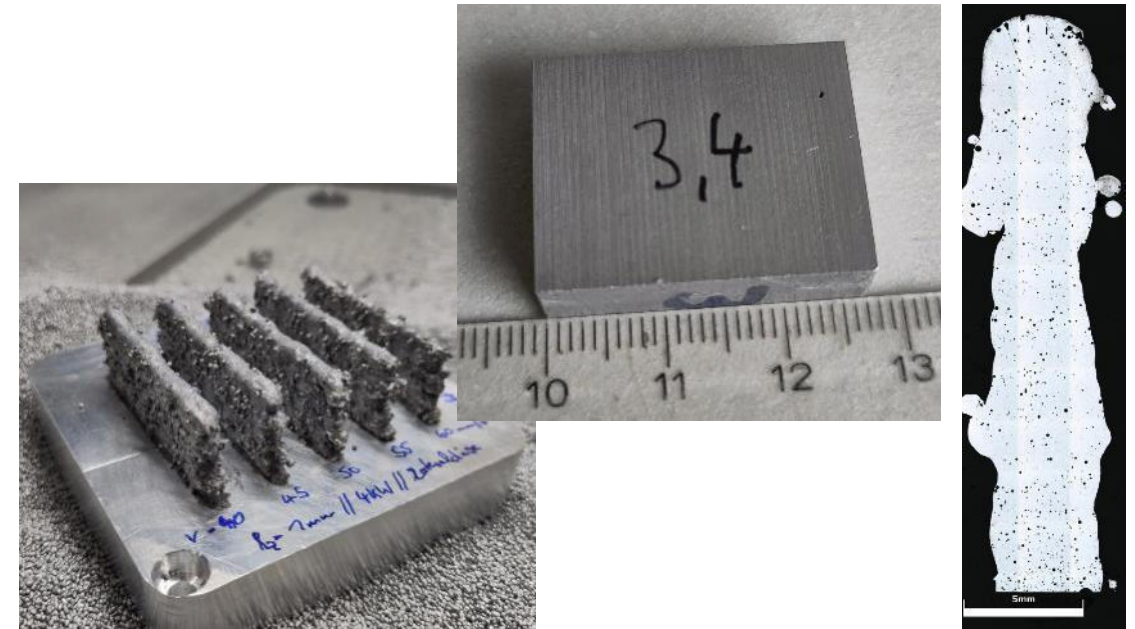
Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5)

- vergleichbare Ergebnisse zu 1.4301
- Bauteildichte $\geq 7,8 \text{ g/cm}^3$ ($\geq 99,5 \%$)
- Weitere Untersuchungen stehen noch aus.



Aluminiumlegierung AlSi10Mg

- vergrößerte Spurbreiten und höhere Geschwindigkeiten
→ Steigerung der Aufbaurrate von 50 - 70 %
- starke Porenbildung! → Wasserstoffporosität?
- Bauteildichte $\geq 2,6 \text{ g/cm}^3$ ($\geq 96 \%$)
- Weitere Untersuchungen stehen noch aus.



Makro-SLM Erste Demonstrator

- Material: Edelstahl 1.4301
- Laserleistung: 4 kW
- Bauzeit: 1 h
- reale Aufbaurate: 275 cm³/h (2,2 kg/h)
- Überhang von 40 mm realisierbar!

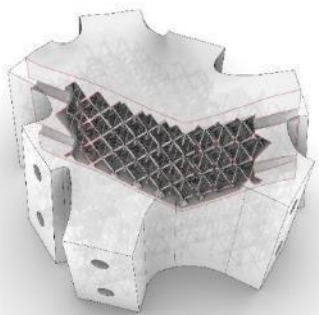
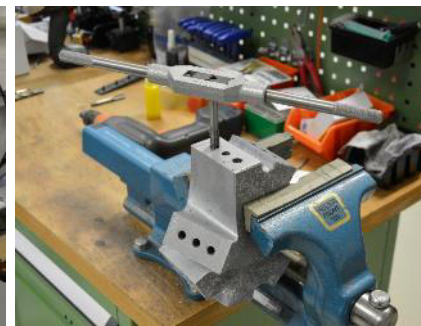
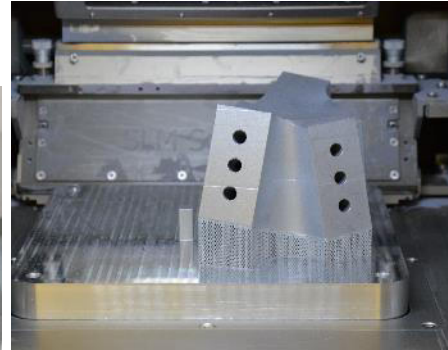
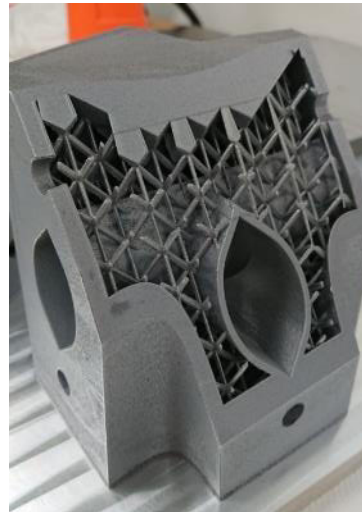




- Material: Edelstahl 1.4301
- Laserleistung: 4 kW
- Bauzeit: 4 h
- reale Aufbaurate: 350 cm³/h (2,8 kg/h)

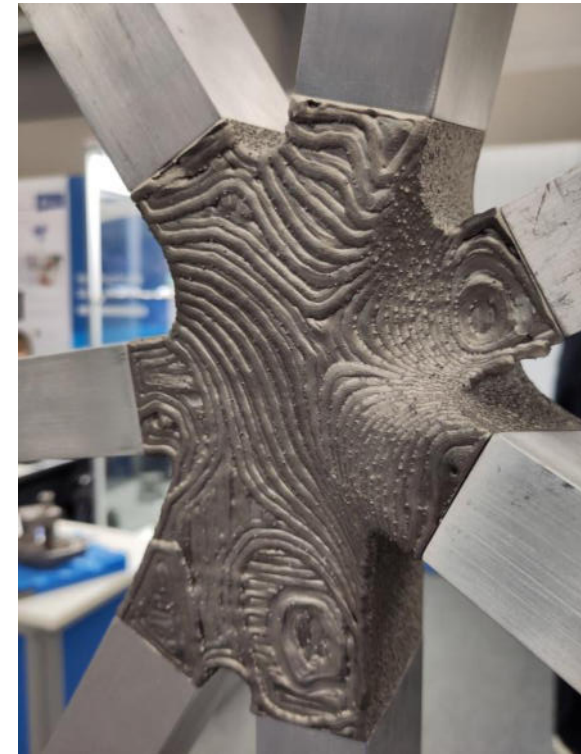
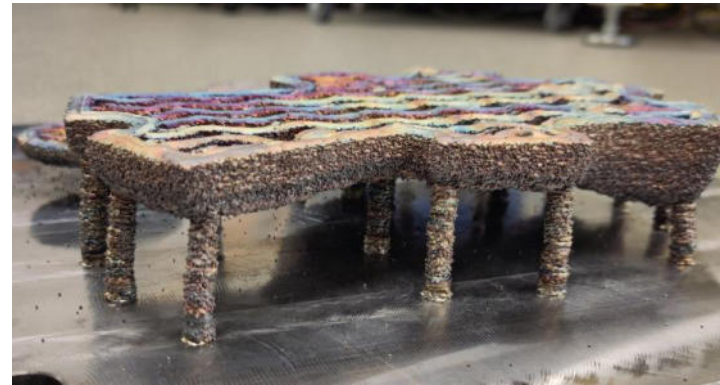
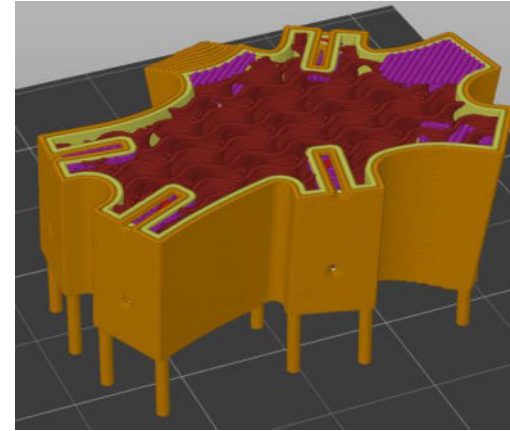
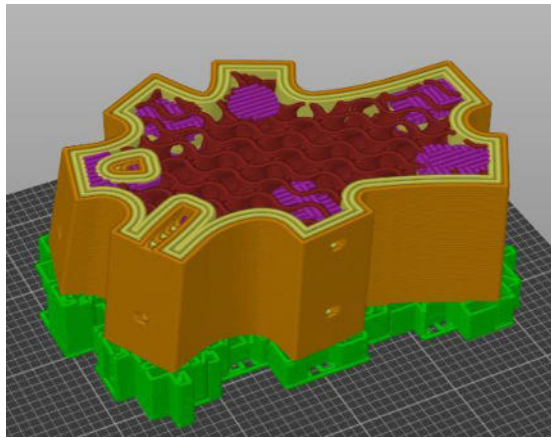


Fertigung von individuellen Knotenverbindungen zur Realisierung einer beliebigen Freiformnetzstruktur für Gebäudefassaden



Mit „Midi“-SLM gefertigt:

- Fertigungskosten von ~ 1.000 € (nur Material-, Gas- und Energiekosten)
- Bauzeit für Knotenverbinder ~ 80 h



- Edelstahl 1.4301
- Laserleistung: 4 kW
- mit Konturoffset von 3 mm für die Zerspanung der Funktionsflächen
- Bauzeit von 80 h auf **5 h** reduziert
- reale Aufbaurate: 312,5 cm³/h (2,5 kg/h)
- Fertigungskosten von 1.000 € auf **150 €** reduziert



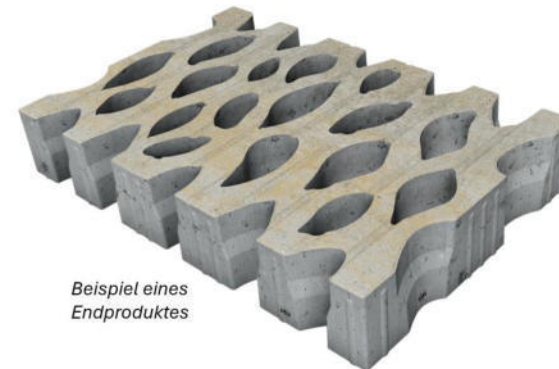
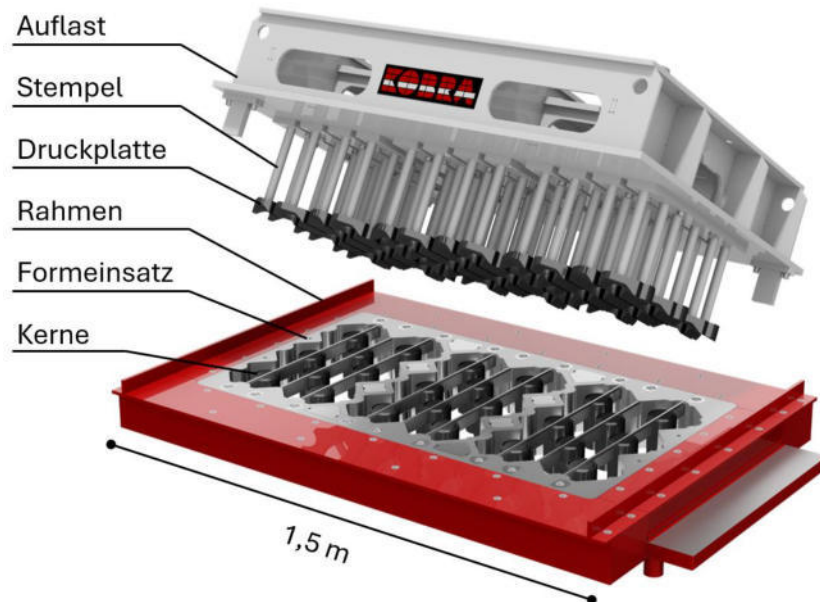
Kobra Formen GmbH

AS
Fakultät
Architektur und
Sozialwissenschaften

-HTWK

FLEX
FORSCHUNG LEHRE EXPERIMENT

topologieoptimierte Leichtbau-Struktur für den Formenbau:



Beispiel eines
Endproduktes



Ziele:

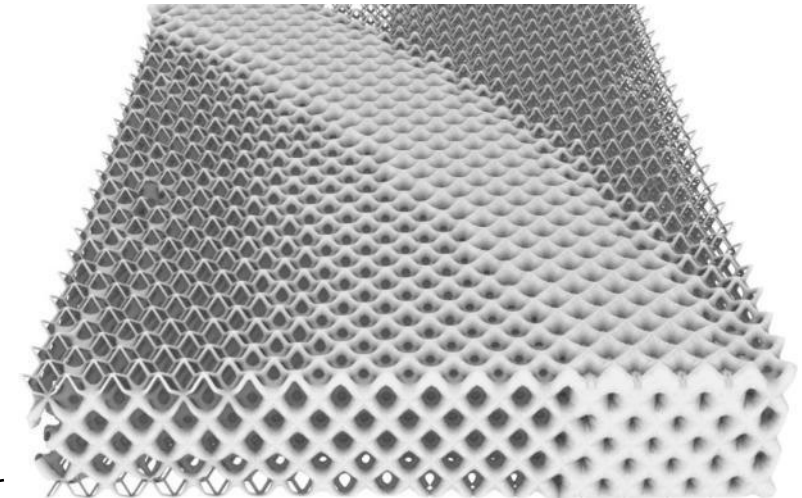
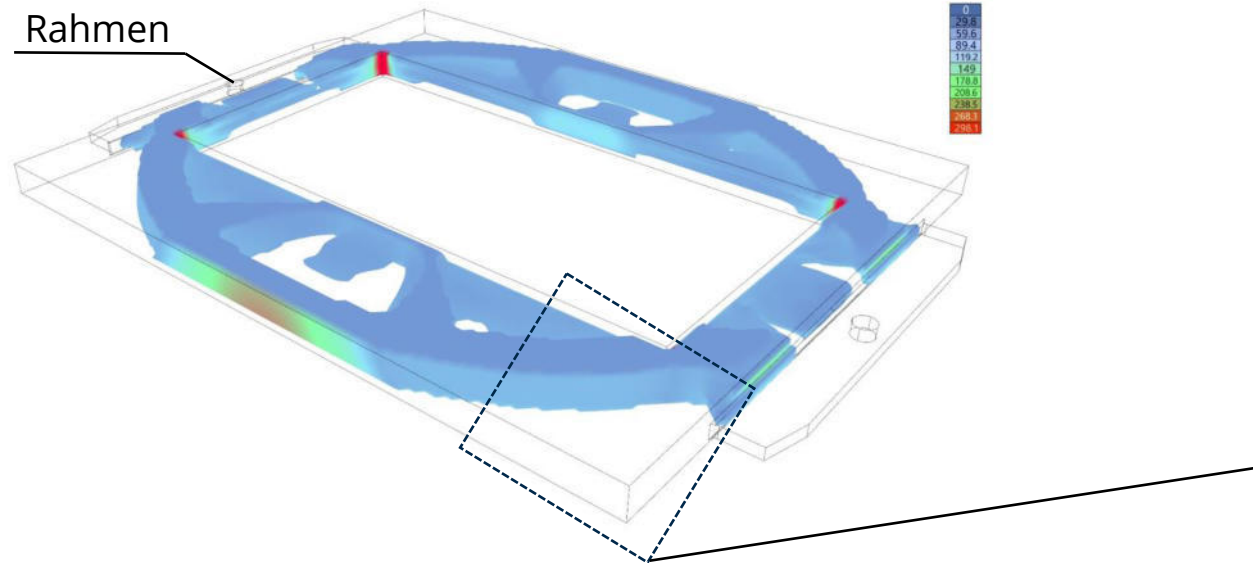
- Reduzierung der Bauteilmasse und des Abfalls
→ konventionell bedeutet das mehr Abfall aber im 3D-Druck weniger Bauzeit
- Reduzierung der Fertigungszeiten
→ Topologieoptimierung und Leichtbaustrukturen (variable Fülldichte)
- Integration weiterer Features
→ Beeinflussung des Dämpfungsverhaltens, Einbringung von Sensorik usw.



Kobra Formen GmbH

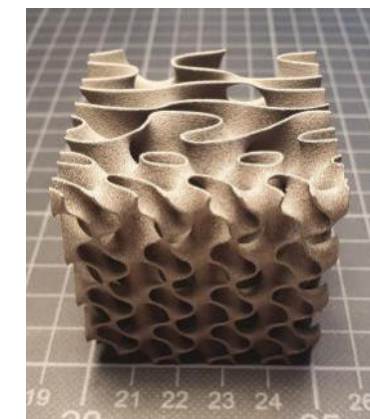

 AS Fakultät
Architektur und
Sozialwissenschaften
 


topologieoptimierte Leichtbau-Struktur für den Formenbau:

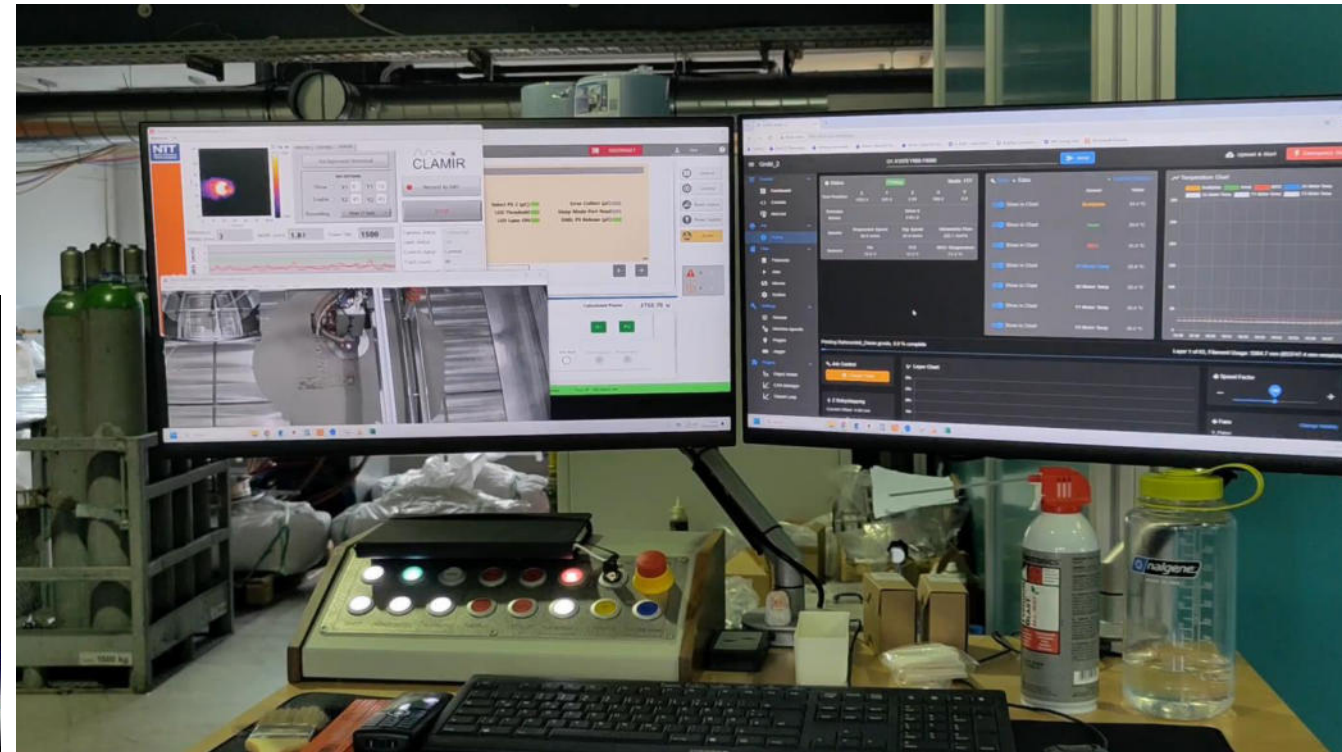
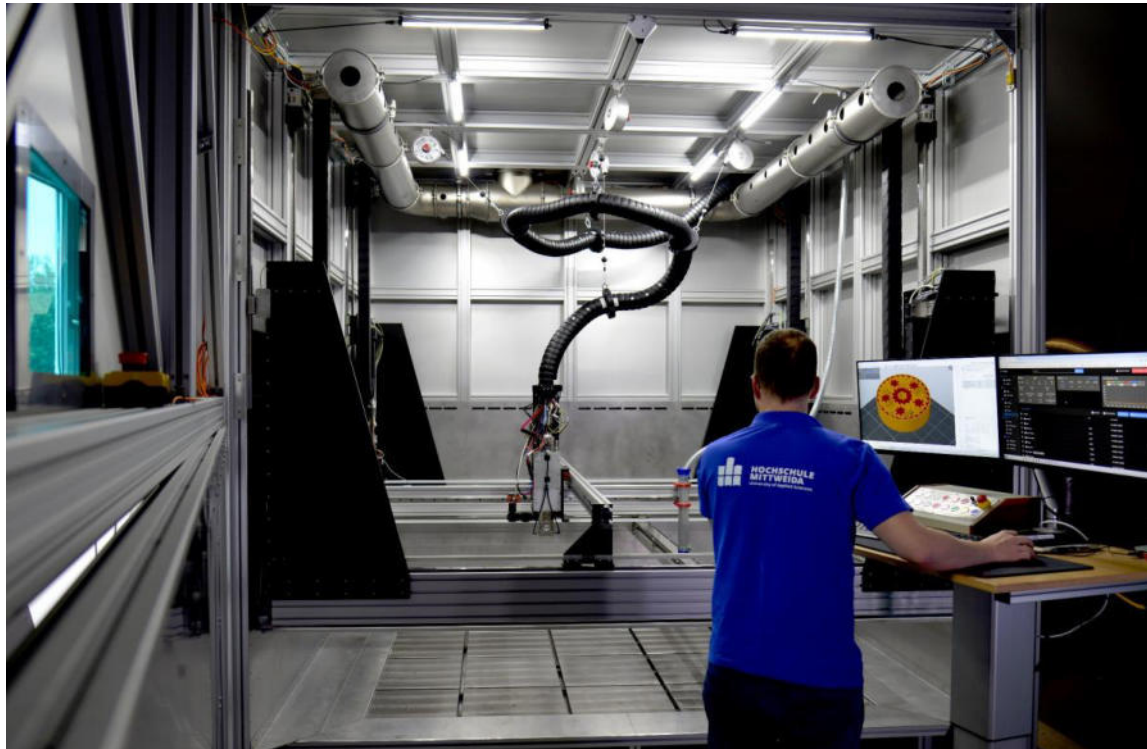


Ziele:

- Reduzierung der Bauteilmasse und des Abfalls
→ konventionell bedeutet das mehr Abfall aber im 3D-Druck weniger Bauzeit
- Reduzierung der Fertigungszeiten
→ Topologieoptimierung und Leichtbaustrukturen (variable Fülldichte)
- Integration weiterer Features
→ Beeinflussung des Dämpfungsverhaltens, Einbringung von Sensorik usw.

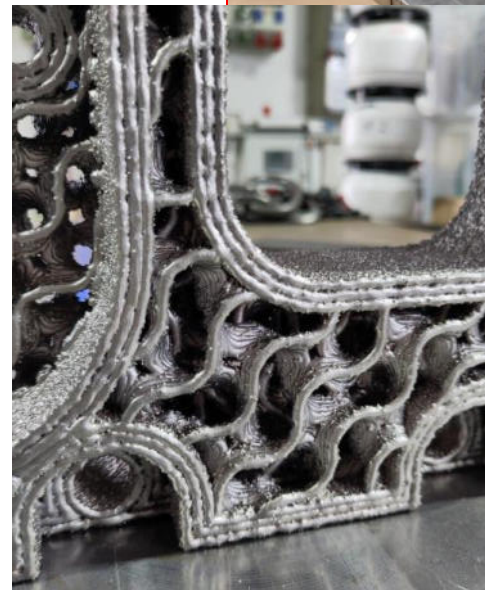
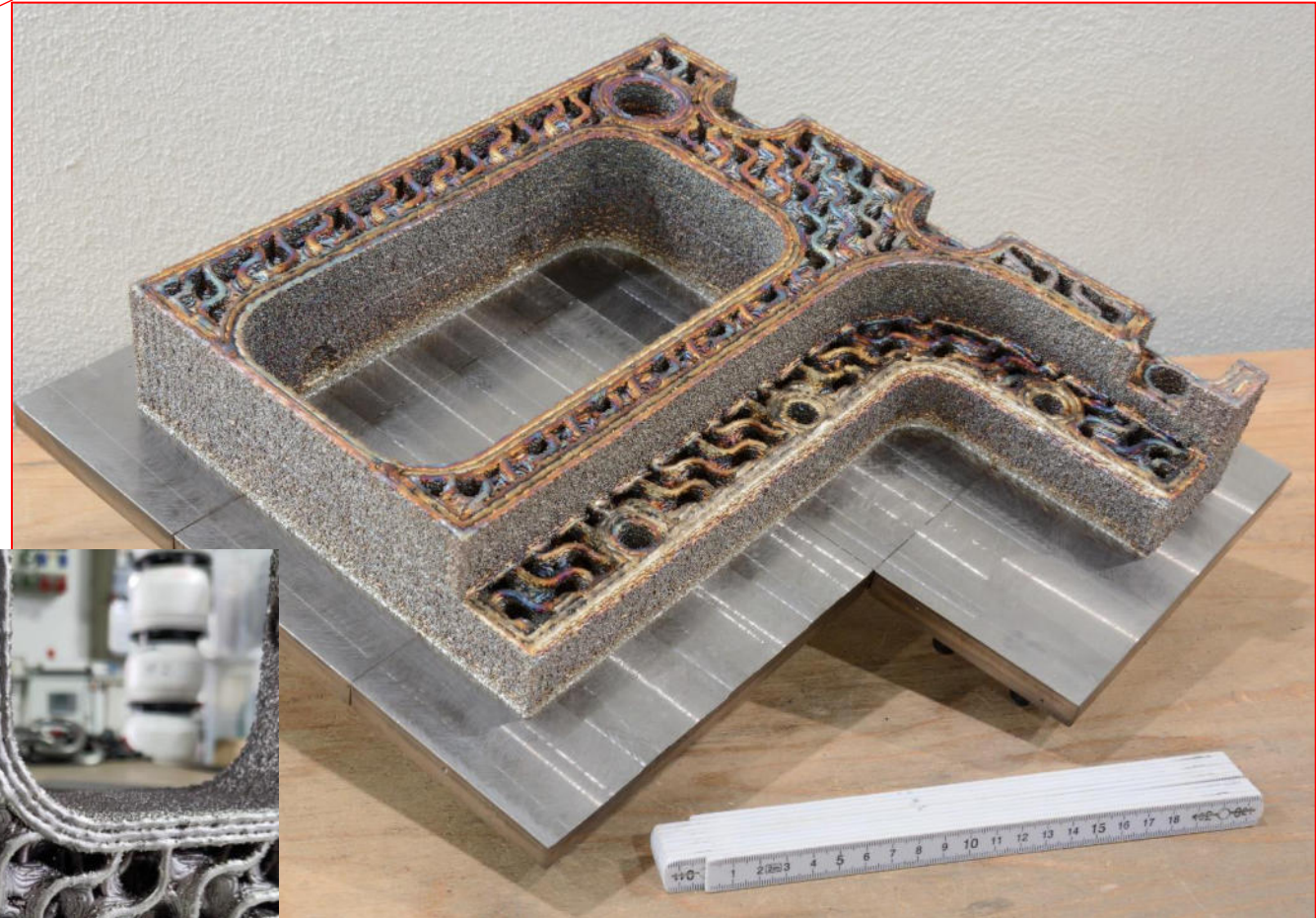
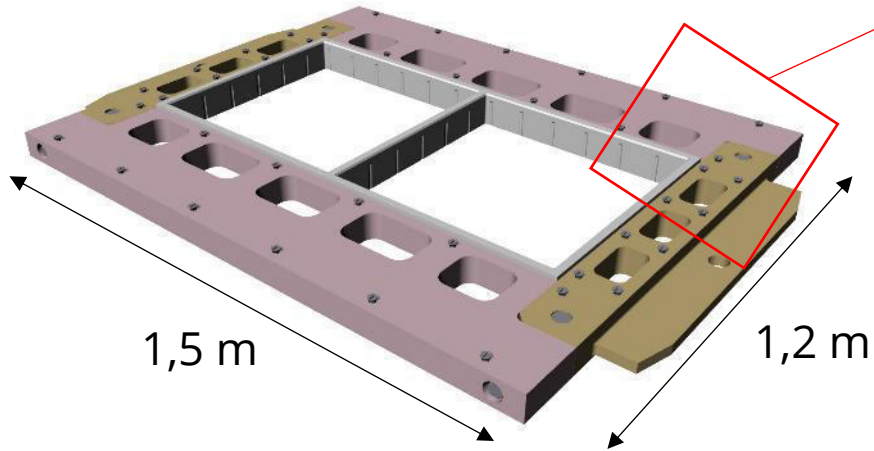


- Bauraum: **2 x 2 x 1 m³**
- Laserleistung bis 8 kW
- variabler Spotdurchmesser
- Leistungsregelung mittels IR-Kamera



- Kühlung im Maschinenbett
- Handling von bis zu 20 Tonnen Metallgranulat
- Abtrennung des Bauteils mit Diamantseilsäge

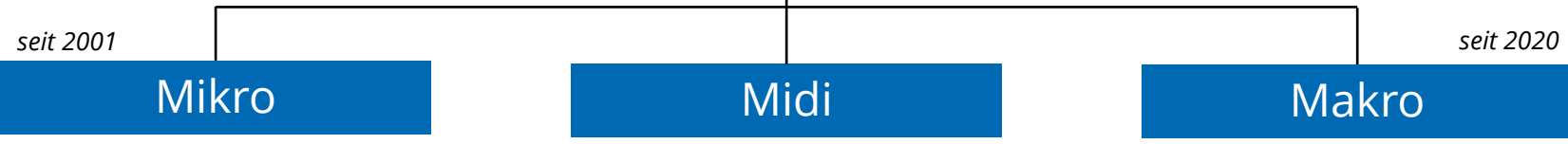
topologieoptimierte Leichtbau-Struktur für den Formenbau:



Ziele:

- Reduzierung der Bauteilmasse
- Reduzierung der Fertigungszeiten
- Integration weiterer Features

Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM oder L-PBF)

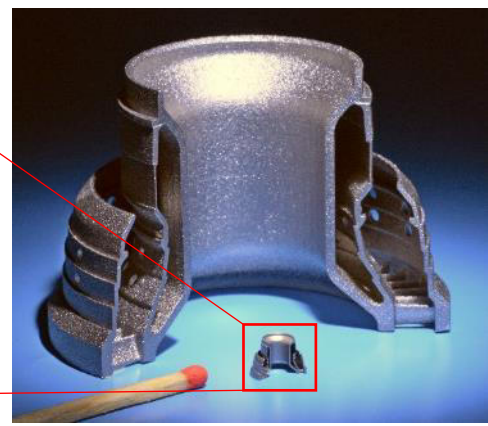


- Laserleistung
- Spotdurchmesser
- Schichtdicken
- Pulverkorngößen

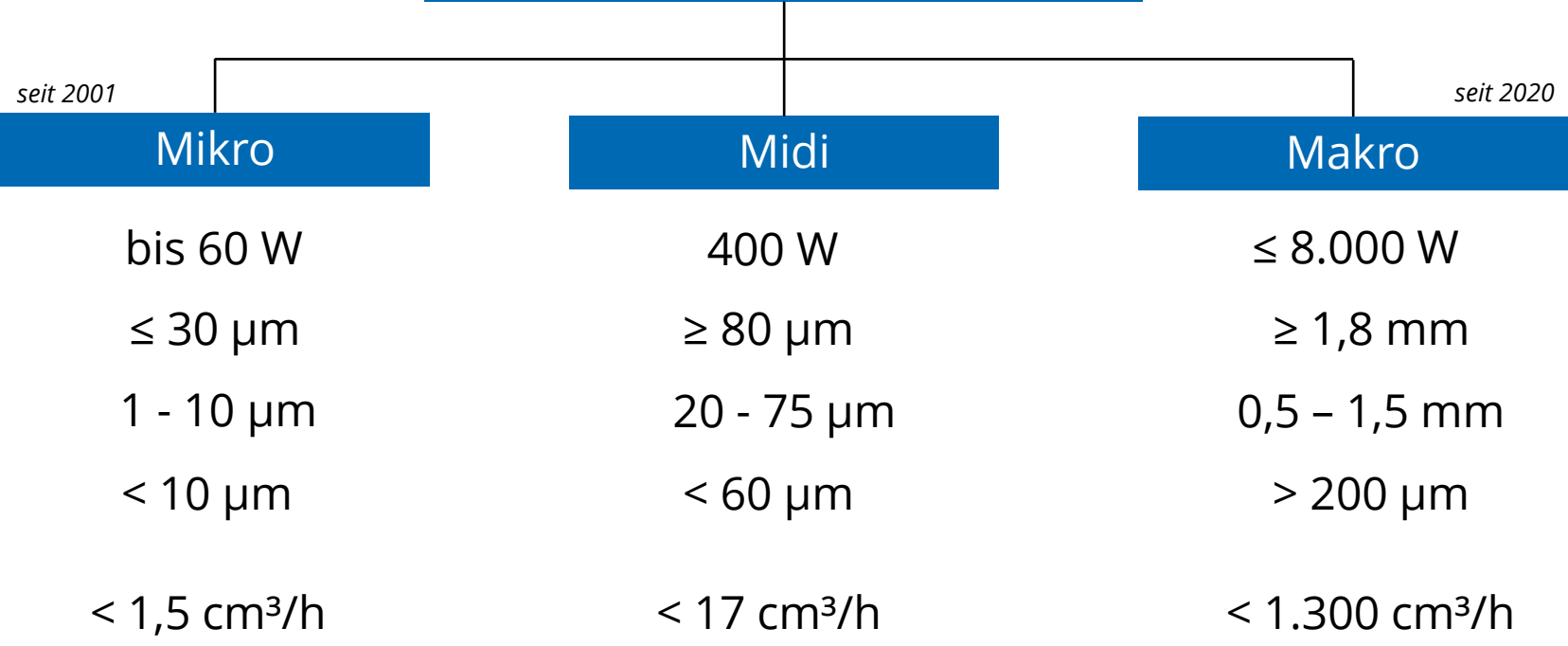
Aufbauraten (@Edelstahl)

bis 60 W
 $\leq 30 \mu\text{m}$
 1 - 10 μm
 $< 10 \mu\text{m}$
 $< 1,5 \text{ cm}^3/\text{h}$

400 W
 $\geq 80 \mu\text{m}$
 20 - 75 μm
 $< 60 \mu\text{m}$
 $< 17 \text{ cm}^3/\text{h}$

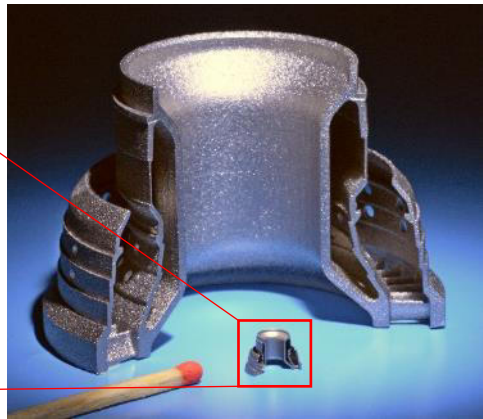


Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM oder L-PBF)

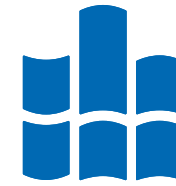


Aufbauraten (@ Edelmetall)

- Laserleistung
- Spotdurchmesser
- Schichtdicken
- Pulverkorngrößen



Vielen Dank



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

Martin Erler
- Additive Fertigung -

Laserinstitut Hochschule Mittweida
Technikumplatz 17 | 09648 Mittweida

T +49 (0) 3727 58-1841
erler2@hs-mittweida.de
www.laser.hs-mittweida.de

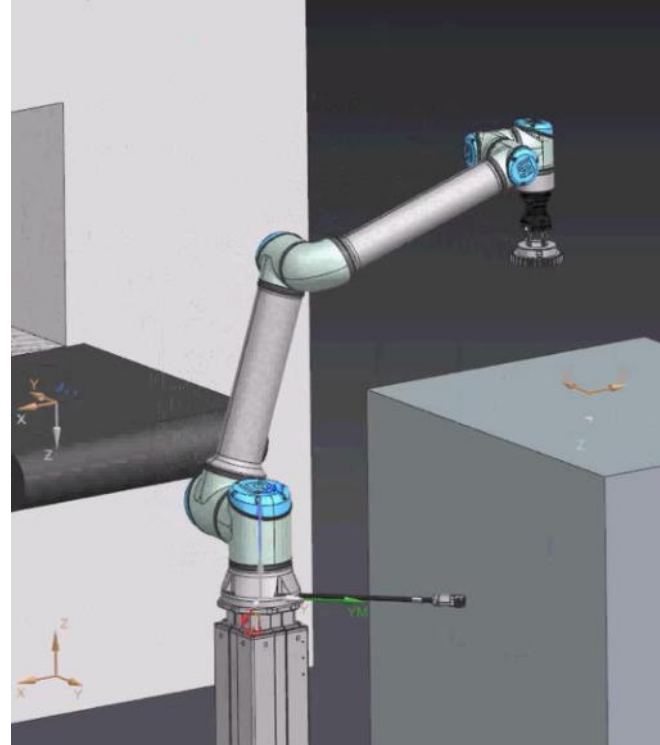
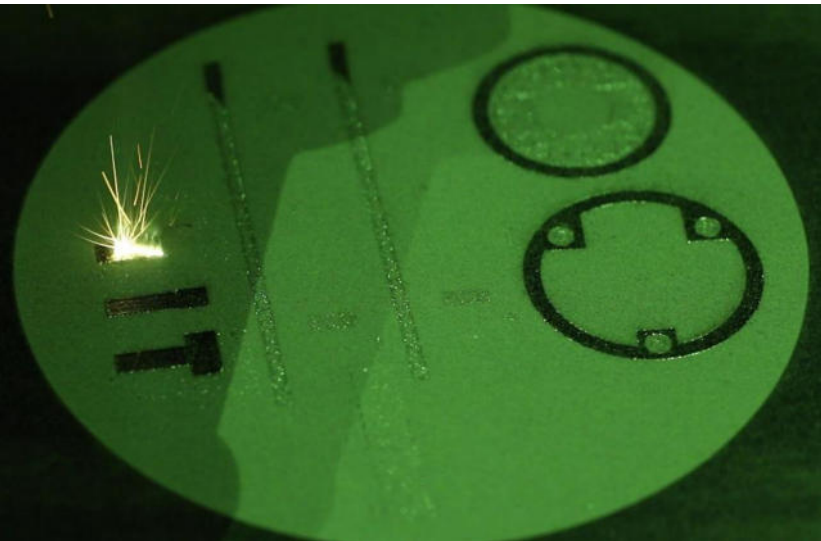
Laserinstitut Hochschule Mittweida
Schillerstraße 10 | 09648 Mittweida

www.laser.hs-mittweida.de

Session 1: metallbasierter 3D- Druck

**3D-Metalldruck in der Praxis - konstruktive
Herangehensweise und digitale Werkzeuge**

Hans-Werner Theobald, Alexander Hoffmann,



-  Zeit
-  Energie
-  Material
-  Geld

Additive Fertigung: zum optimierten Robotergreifer mit prozessintegrierten Digitalwerkzeugen

Agenda

- Begrüßung
- Unsere Firmen und unser Ökosystem
- Ausgangssituation / Problemstellung / Ideen / Entwurfsentscheidungen
- Schrittweise Anpassung und Optimierung des Greifers
- Zusammenfassung der Ergebnisse
- Fragen / Kontaktmöglichkeiten

Partnerschaftlich zum Erfolg



Produktionsdienstleistung –
powder bed fusion

- Stahl: 1.4404, 1.4542
- Bronze CuSn10

Praxistraining - additive
Fertigung Metall

Produkte

- Mini Strahltrommel
- Werkstückanschlag

Siemens PLM Solution Partner,
zertifiziert nach TISAX & ISO 9001

Ganzheitliche, schlanke Lösungen
für Nachhaltigkeit und Effizienz
in der Diskreten Fertigung

über 20 Jahre Integration und
Automatisierung führender An-
wendungen (Teamcenter, NX).

Strategischer Partner für
die Digitale Fabrik (Industrie 4.0)

Hersteller von NX, Teamcenter,
Sinumerik, Mcenter, Simcenter,
Opcenter, Solidedge, Mendix,
MindSphere, Simatic u.v.a.m.

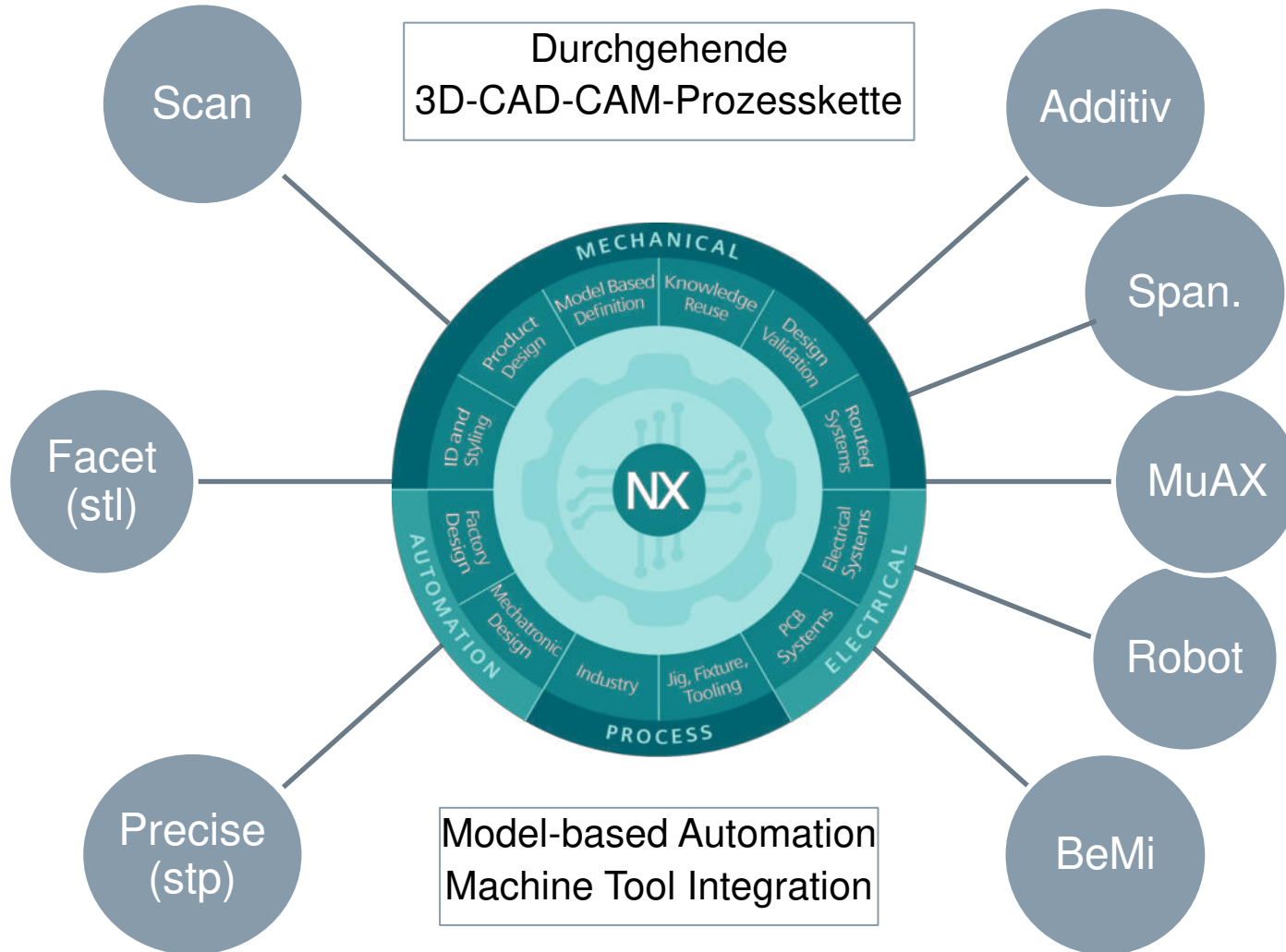
Unmittelbarer, weltweiter Zugriff
auf die Entwicklung und Service

Diskreter Fertiger

Software-Systemhaus

Technologielieferant

Ökosystem = Siemens NX & TruPrint



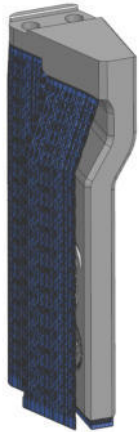
Solution Partner	SIEMENS
PLM	



Quelle: www.trumpf.com

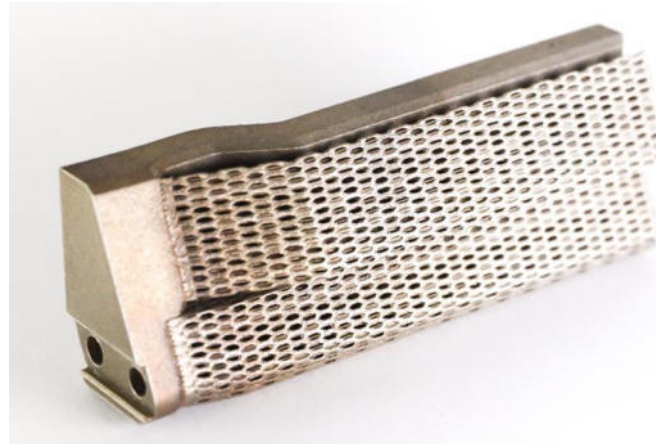
Ökosystem im Detail: pbf-lb

Siemens NX
TruTops Print



- Konstruktion / Reparatur
- Ausrichtung
- Fertigungsaufmaße
- Stützstrukturen
- Slicen

TruPrint 1000
(powder bed fusion – laser beam)



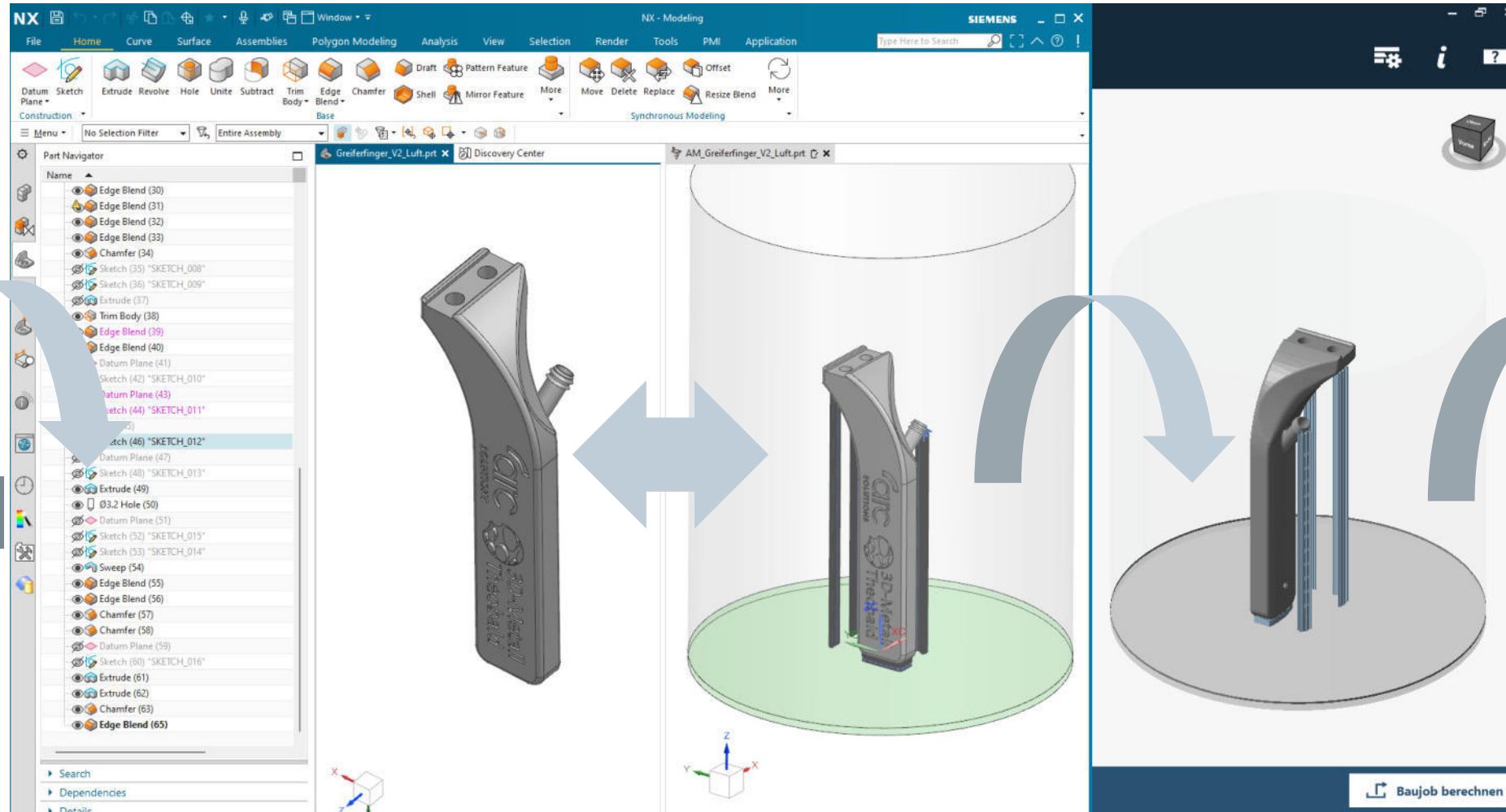
- Maschine vorbereiten
- Drucken
- Pulver entfernen
- Werkstücke entnehmen

Maschinelle Zerspanung,
Handwerkzeug, Strahlanlage



- Abtrennung Plattform
- Entfernung Stützen
- Fräsen / Bohren
- Schleifen / Feilen
- Strahlen

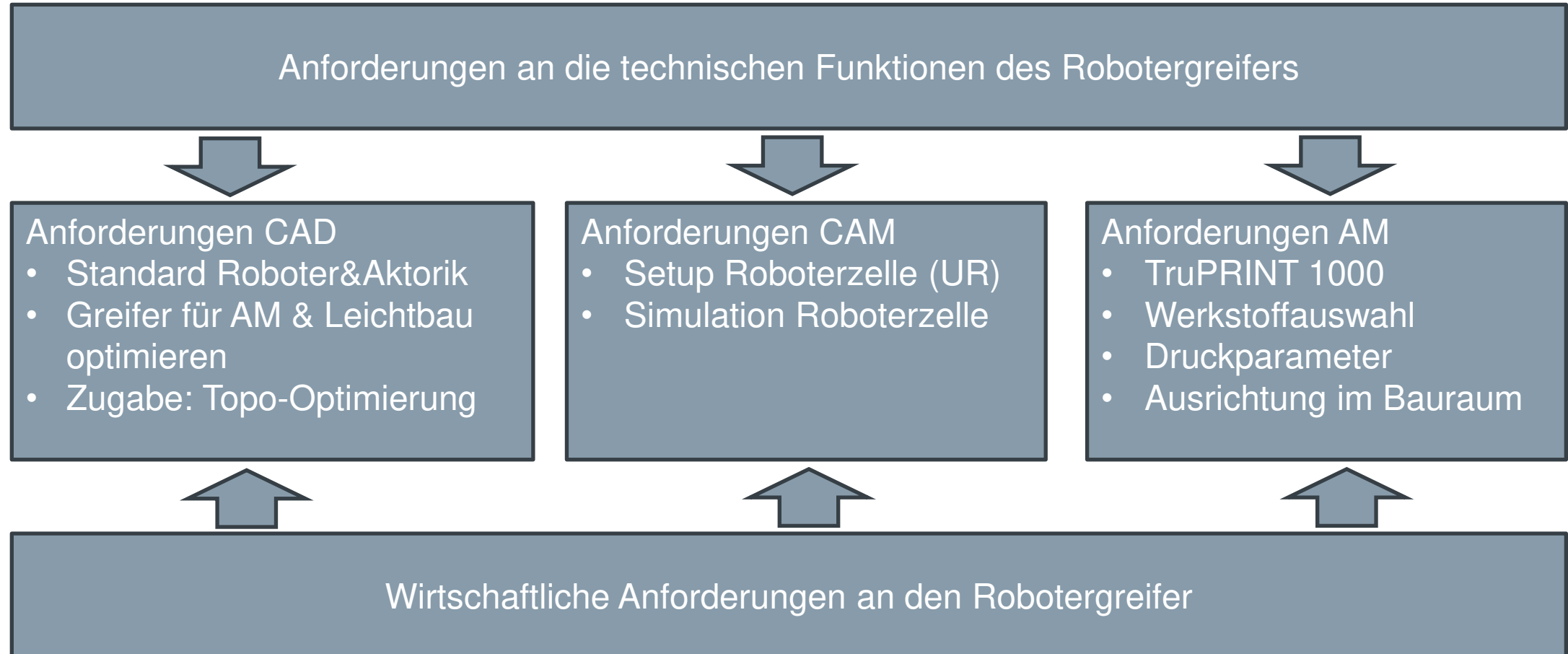
Durchgängigkeit des digitalen Prozesses



Kunde

Maschine

Robotergreifer: Anforderungen an Digitale Tools

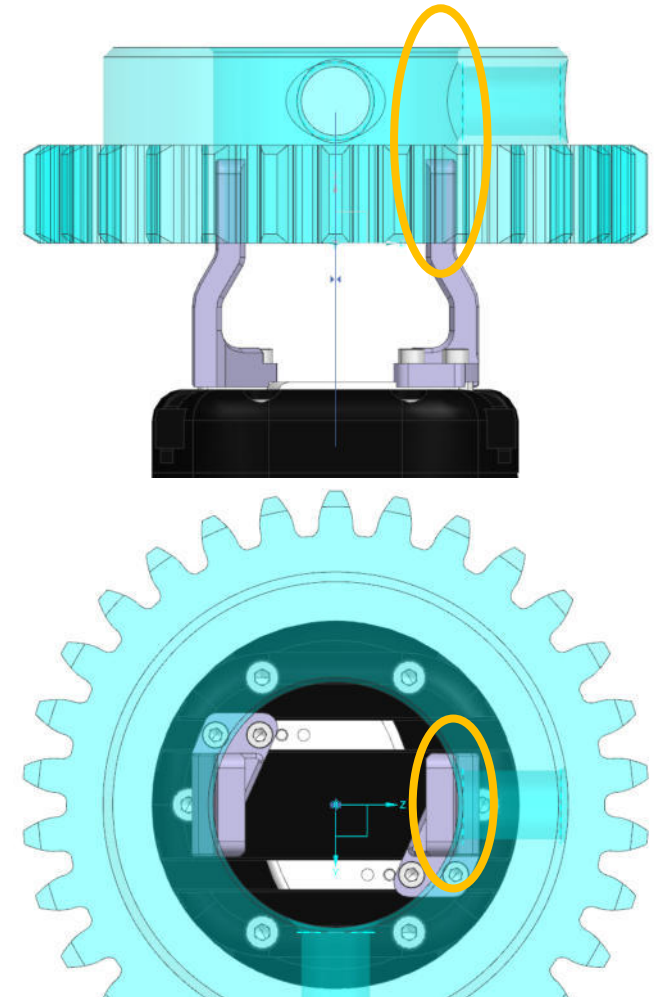


Robotergreifer: Ausgangssituation / Präzisierung

Aufgabe: Entnahme eines Zahnrades aus einem Reinigungsbad soll mittels Roboter (Universal Robot) und Standard Aktorik erfolgen

Problemstellung > Ideen/Lösungsansätze:

- Komplizierte Außenform des Werkstücks
> innen greifen
- Geringer Innendurchmesser des Zahnrades
> filigraner, trotzdem stabiler Greifer
> Gleichzeitig kann Gewicht und Platz gespart werden!!
- Taktzeitoptimierung zum nächsten Prozessschritt - „Härten“
> im Prozeß integriertes Trocknen
- Energieeinsparung und erhöhter Aktionsradius
> Leichtbau = reduzierte Massen



Robotergreifer: Entwurf / Lösungsweg

Entwurfsentscheidungen:

- 1) Roboter: UR10
- 2) Hand E - adaptiver Robotergreifer von Fa. Robotiq
- 3) neues Greif-Werkzeug, von uns angepasst und optimiert
- 4) Integrierte Funktion: Druckluft zum Trocken des Zahnrades
- 5) Da das Reinigungsbad chemisch aktiv ist, wird ein korrosionsfestes Material benötigt: 1.4404

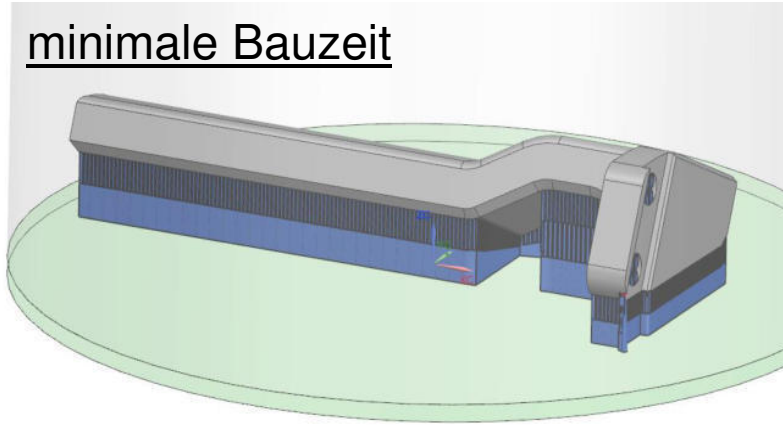


Übersicht der Optimierungsschritte

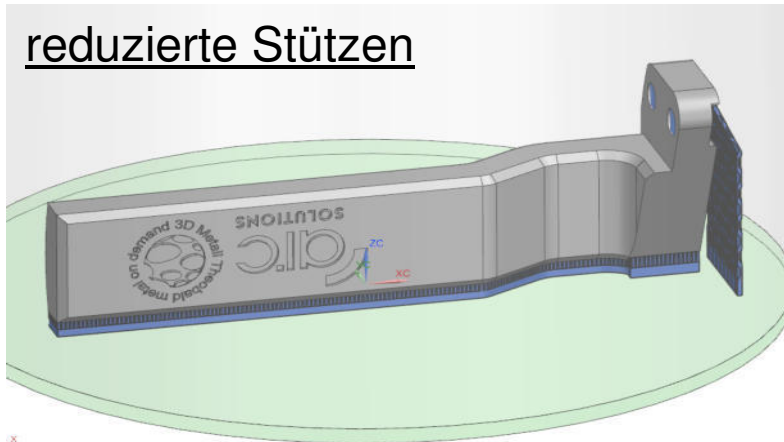
#	Beschreibung	Gewicht pro Stk.	Kosteneinsparung durch ..	Prozessverbesserung
1	klassisches Design, von innen greifen, angepaßte Form und Dimension	67,5 g		
2	(1) + konstruktive Anpassung auf AM	67,2g	Reduktion Nachbearbeitung	
3	(2) + Funktionsintegration (Luft)	66,7g		kürzeres, sicheres Trocknen
4	(3) + konventioneller Leichtbau	37,6g	Geringeres Aufschmelzvolumen	
5	(3) + Topologieoptimierung	28,9g	Noch geringeres Aufschmelzvolumen	

Ausrichtung des Werkstücks im Bauraum

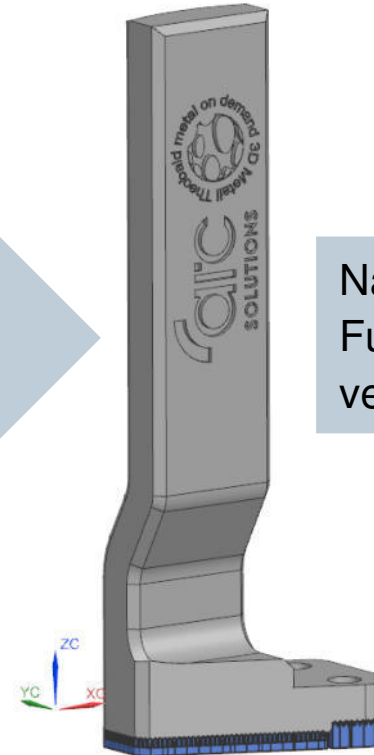
minimale Bauzeit



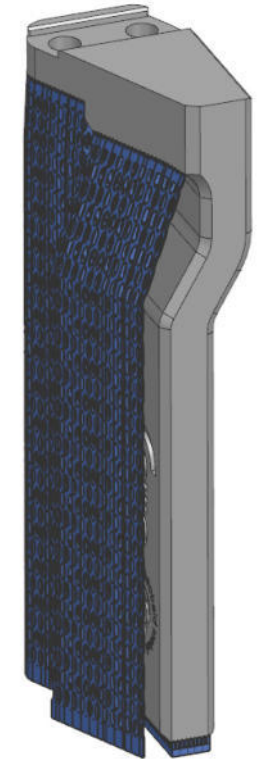
reduzierte Stützen



minimale Stützstrukturen



produzierte Variante



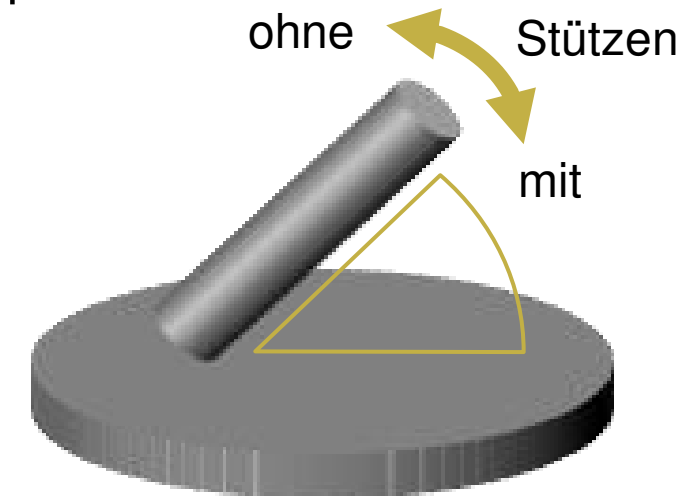
Verzug vermeiden

Nachbearbeitung Funktionsflächen vermeiden

Ausgangspunkt der Optimierung !

Randbedingungen des AM - Prozesses

- Bauraum AM-Anlage: Durchmesser <100mm, Höhe <130mm
- Downskin-Winkel: Standard 35°
- Wandstärke: Senkrecht ab 0,15mm
- Bohrungen: ab 0,5mm
- Schlitze ab 0,2mm



- Werkstoffeigenschaften am Beispiel 1.4404

1.4404	Zugfestigkeit R_m	Bruchdehnung A_t	Kerbschlagarbeit KV	Quelle
Additiv – Z-Achse	585 +/- 10 N/mm ²	54 +/- 2 %	150 +/- 10 J	HTWK Leipzig, Prof. Rosemann
Kaltgewalzt	530 - 680 N/mm ²	Min. 40 %	60 J	https://www.rostfrei-stahl.com/

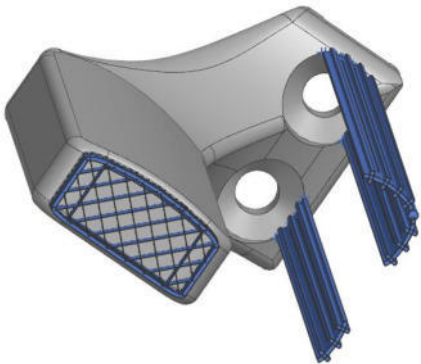
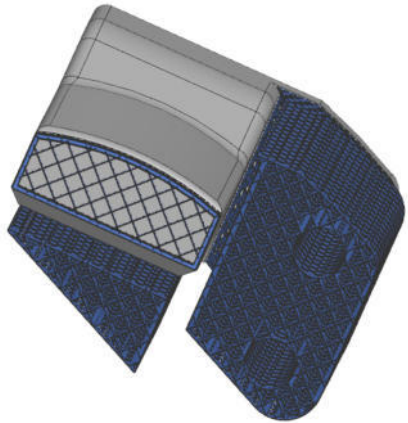
Konstruktive Anpassung für AM

Vorteile

- Keine Absätze durch Volumensprünge
- Geringere Bauzeit durch Reduktion Supports
- Geringerer Nachbearbeitungsaufwand durch
 - Weniger Supports
 - Vermeidung einer Fräsbearbeitung

Aber

- Keine Gewichtsersparnis
- Keine funktionelle Erweiterung

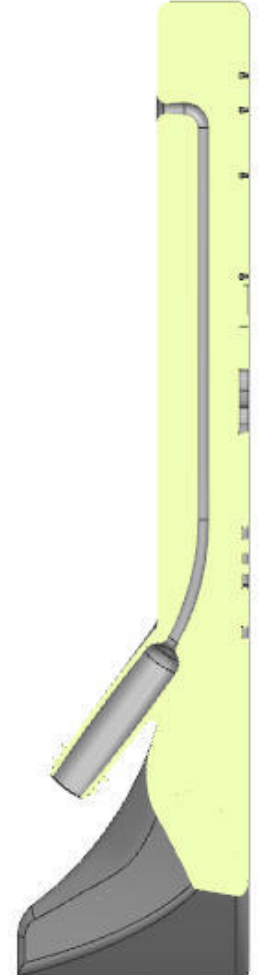
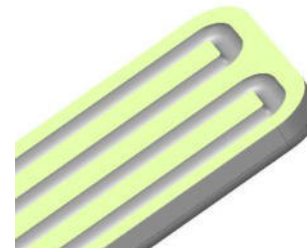
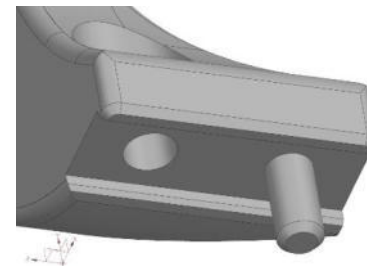
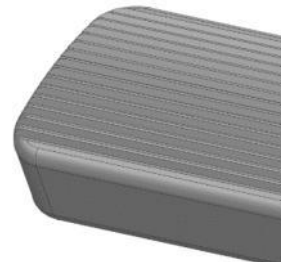


Funktionsintegration - Druckluft

Vorteile

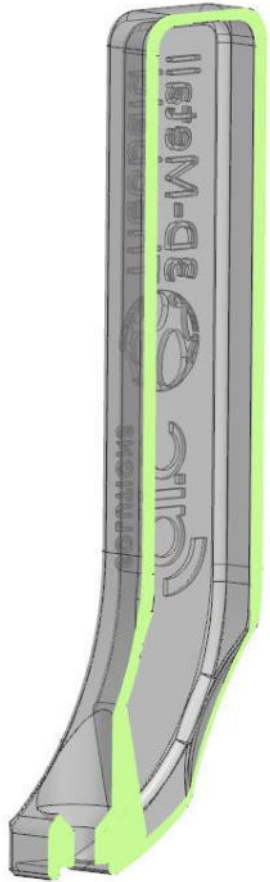
- Fast keine Mehrkosten in der Herstellung
- Einsparung von Montageaufwand für Druckluftleitung
- Kein Einkauf von Druckluftanschlüssen
- Platzersparnis in der Baugruppe (Kollisionsvermeidung)
- Prozess: schnelleres Trocknen der Zahnräder

weitere Möglichkeiten der Funktionsintegration



Einbringen Gitterstruktur (Leichtbau 1)

Abzugsvolumen



Gitterstruktur (Lattice)



Optimierungsergebnis

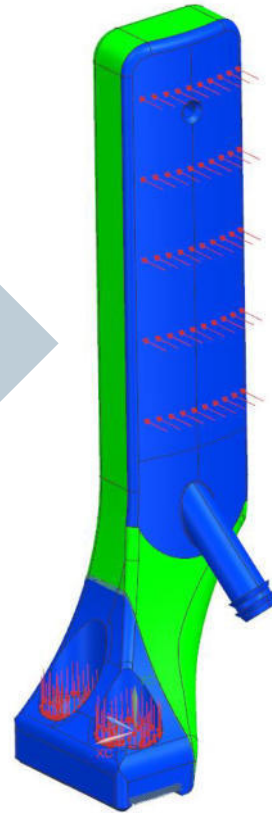


Topologieoptimierung (Leichtbau 2)

Design vs.
Non-Design Space



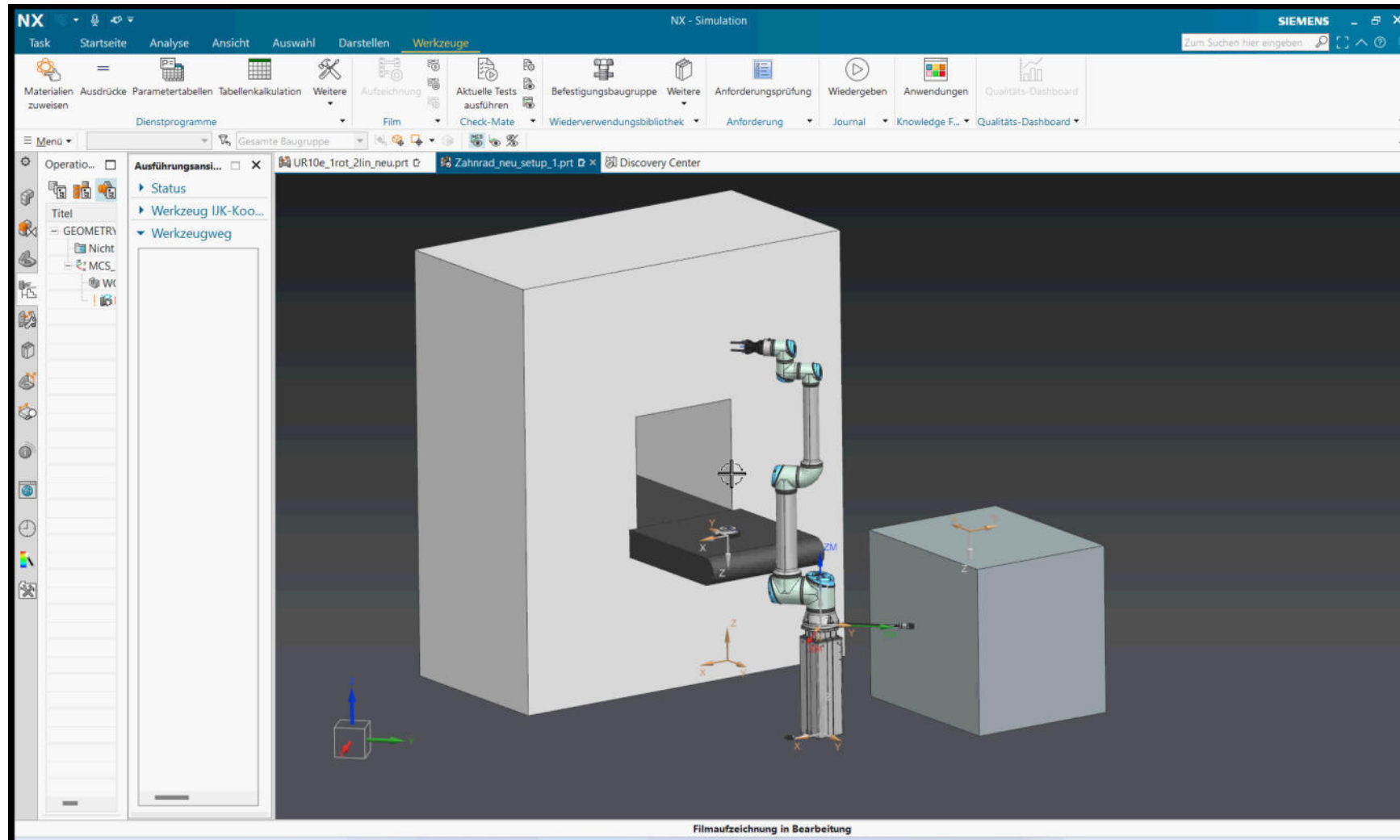
Last- und
Lagerungsbedingungen



Optimierungsergebnis



VIDEO: Einsatz des Greifers mit UR10



Optimierungsergebnis - Herstellkosten

Ursprung
112 €/Stk.*



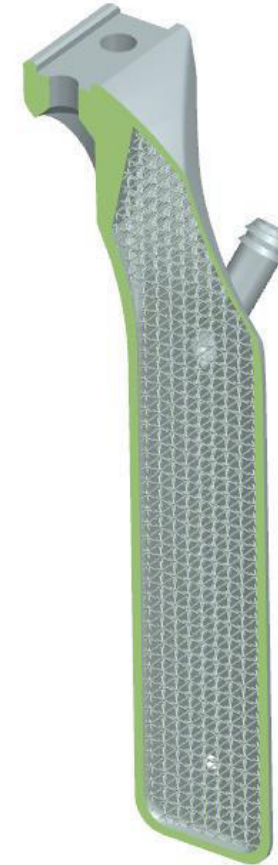
AM-Konstruktion
85€/Stk.*



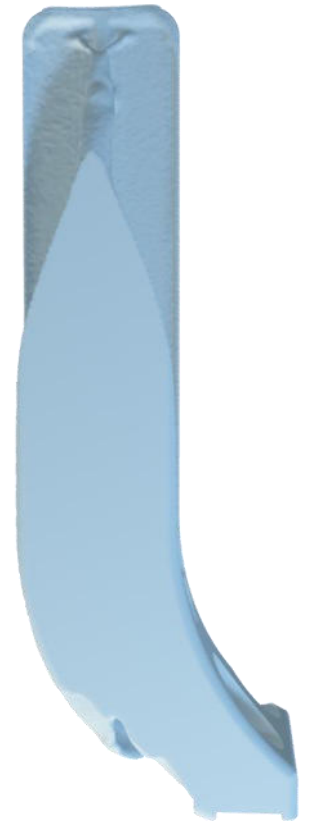
Funktionsintegration
88€/Stk.*



Leichtbau 1
73€/Stk.*



Leichtbau 2
59 €/Stk.*



* HK Losgröße 10Stk.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit ..

.. jetzt ist Zeit für Ihre Fragen!

Kontakt:

Hans-Werner Theobald

theobald@3d-metall-theobald.de, +49 341 491 2175

3D-Metall Theobald e.K. | Karl-Heine-Straße 99 | 04229 Leipzig



Alexander Hoffmann

ah@arcsolutions.de, +49 170 2866124

ARC Solutions GmbH | Annaberger Straße 73 | 09111 Chemnitz



Zeit



Energie



Material



Geld

Veranstaltungen im Netzwerk

**VDI-Leipzig: 27.11.24 3D-Druck Stammtisch
Ersatzteile additiv fertigen**



**Building 3D: 19.-22.11. Gemeinschaftsstand
Formnext / Frankfurt/Main**



Zeit



Energie



Material



Geld

Session 1: metallbasierter 3D- Druck

**Untersuchung der kumulierten
Energieverbräuche für unterschiedliche
Fertigungsvarianten in der Prototypen- und
Ersatzteilerfertigung**

Marcus Viertel, Hochschule Anhalt

Untersuchung der kumulierten Energieverbräuche für unterschiedliche Fertigungsvarianten in der Prototypen- und Ersatzteilerfertigung

Marcus Viertel

Daniel Landenberger

Sebastian Gersch

www.hs-anhalt.de/CAM

Gliederung

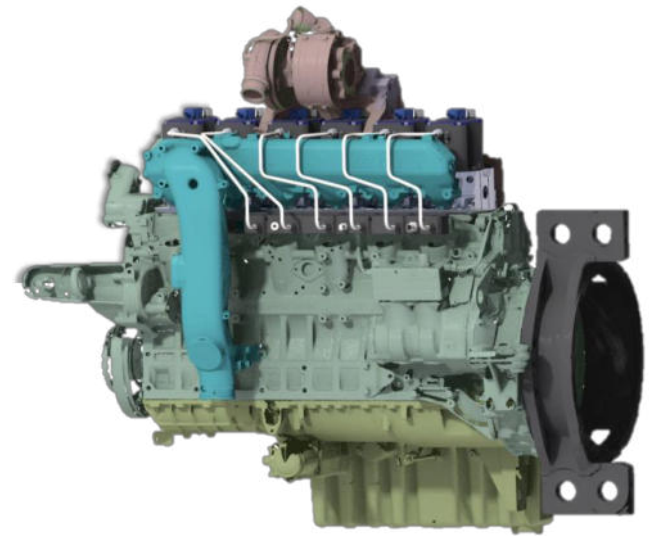
- Ausgangssituation und Ziele
- Fertigungsprozesse
- Maschinen
- Versuchsaufbau Messungen
- Messergebnisse
- Berechnungen und Szenarien
- Zusammenfassung

Ausgangssituation und Ziele - Einordnung des Projekts

Forschungsprojekt zur Erneuerung von Dieselloks
(TRAINS)

- Forschungspartner WTZ Roßlau gGmbH
- Umbau des Motors auf Wasserstoffverbrenner
- konstruktive Änderungen im Bereich des Zylinderkopfes und des Ventildeckels
- Notwendige Neufertigung von 6 Ventildeckelbaugruppen
- Ermittlung des kumulierten Energieverbrauchs (KEV) nach [VDI4600]

 **WTZ**
INNOVATIVE SCIENCE & RESEARCH



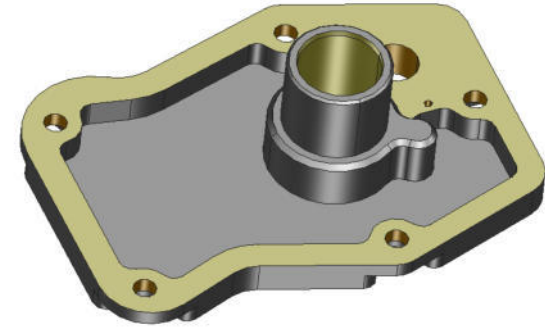
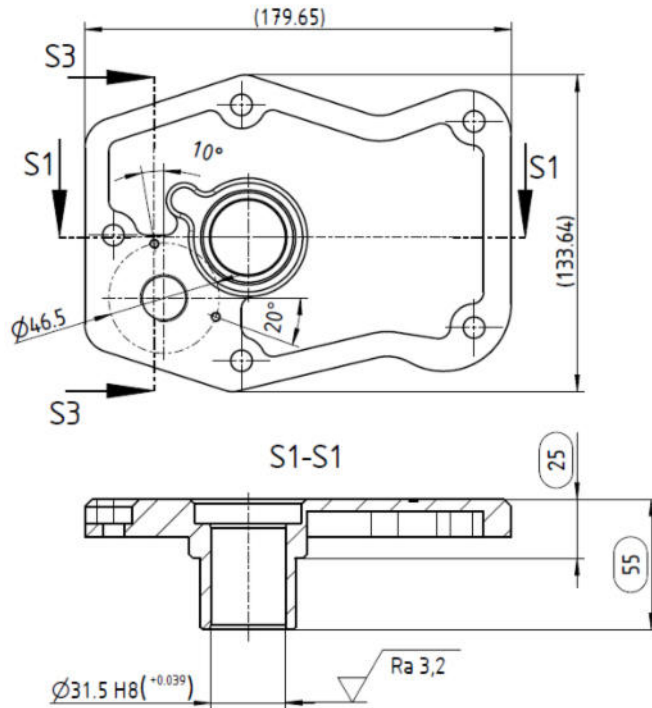
Quelle: WTZ, Dessau-Roßlau

Ausgangssituation und Ziele - Werkstückbeschreibung

- Fertigung aus einem Rohteil
- Berücksichtigung von Sensoren →
Abmessungen gegenüber ursprünglichem
Ventildeckel vergrößert
- Werkstoff AlMgSi-1 (EN AW-6082 / 3.2315)



Ausgangssituation und Ziele - konstruktive Anforderungen Werkstück

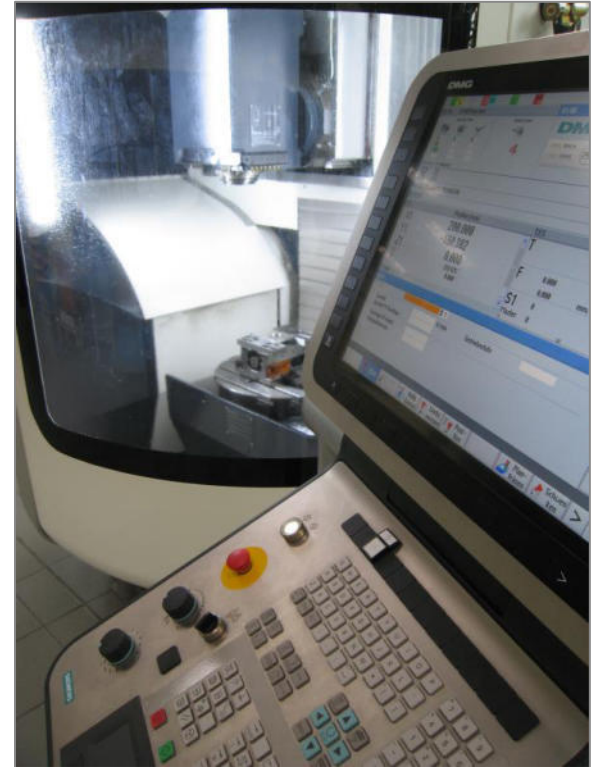


Fertigungsprozesse

Schritt	Fertigungsprozess 1 – Zerspanung	Fertigungsprozess 2 – Additive Fertigung und spanende Nachbearbeitung
1	Zusägen Rohteil 140 x 185 x 60 mm ³	Additive Fertigung im Pulverbettverfahren (Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen LPBF) <ul style="list-style-type: none"> • Prozesslaufzeit 3D-Druck 9 h 25 min • Schichtdicke 60 µm
2	Fräs-/Bohrbearbeitung <ul style="list-style-type: none"> • 3 NC-Programme in 2 Aufspannungen • NC-Programmierung mittels Tebis • Programmlaufzeit 3 h 58 min (Haupt- u. Nebenzeit) 	Reinigen
3		Absägen des Werkstücks von der Bauplatte
4		Spanende Nachbearbeitung <ul style="list-style-type: none"> • 2 NC-Programme in 2 Aufspannungen • NC-Programmierung mittels Tebis • Programmlaufzeit 21 min

Maschine zur Fräs-/Bohrbearbeitung

- Fräsen/Bohren:
 - 5-Achs-Bearbeitungszentrum
DMU40 monoBlock von DMG
 - Drehtisch und Schwenkkopf
 - Motorspindel
 - Schwallkühlung
 - Späneförderer
 - $P_{\max} = 32 \text{ kW}$



Maschine zur additiven Fertigung

- Additive Fertigung
 - SLM280 von SLM Solutions
 - Bauraumgröße
 $275 \times 275 \times 365 \text{ mm}^3$
 - Laserleistung 400/700 W
 - $P_{\text{max}} = 16 \text{ kW}$
- Zusatzaggregate additive Fertigung
 - Kühlung
- (Siebeinheit)
- Bauplattensäge



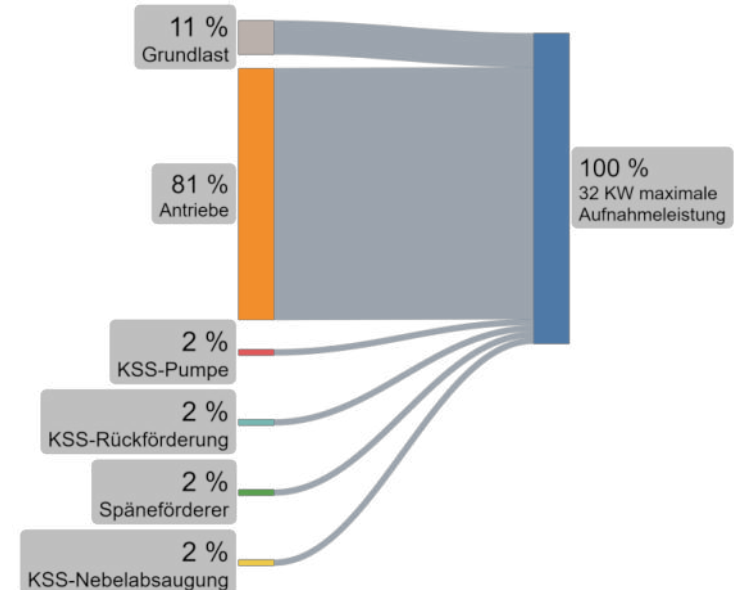
Versuchsaufbau

Bearbeitungszentrum DMU40 monoBlock	Anlage zur additiven Fertigung SLM280
<ul style="list-style-type: none">• Shelly Pro 3EM (validiert mittels PQ-Box a-eberle)• Abfrage mittels http Request• Messfrequenz ca. 1 Hz	<ul style="list-style-type: none">• PQ-Box a-eberle• Systeminterne Datenspeicherung• Messfrequenz ca. 1 Hz



Messergebnisse spanende Bearbeitung DMU40 monoBlock

- Grundlast Ø 3.4 kW (ohne laufende Spindel, keine Bewegung der Achsen)
- Verbrauch zusammengesetzt aus mech. Zerspanungsprozess und weiteren zyklischen Verbrauchern
 - Pumpe Kühlschmierstoff (KSS) ca. 0.6 kW
 - KSS-Rückförderpumpe ca. 0.7 kW
 - Späneförderer ca. 0.5 kW
 - KSS-Emulsionsnebelabsaugung ca. 0.7 kW
- Gesamt-Endenergieverbrauch
 - Zerspanung aus dem Vollen: 20.8 kWh
 - Spanende Nachbearbeitung: 1.7 kWh

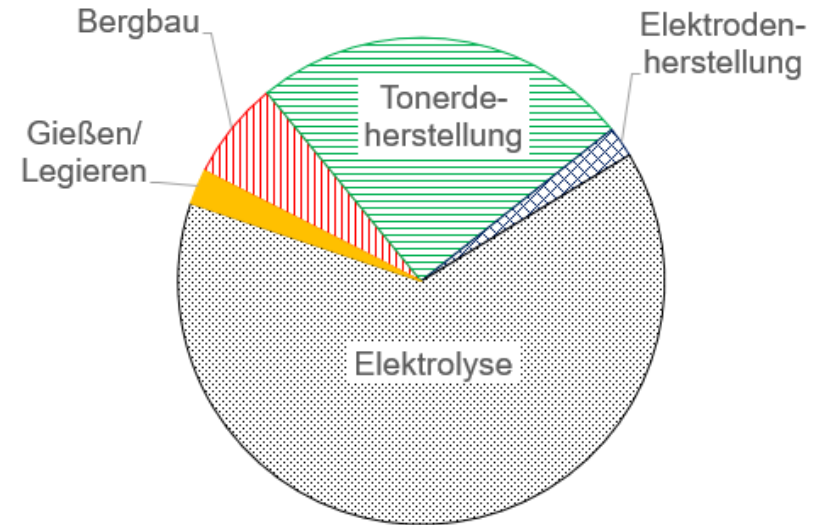


Messergebnisse additive Fertigung SLM280

- Grundlast \varnothing 0.7 kW
- Gleichmäßiger Verbrauch Anlage im Betrieb \varnothing 2.2 kW
- Kühlung 4 kW zyklisch
- Zusatzverbraucher nachgelagert
 - Wärmeschrank $P_{\max} = 13$ kW
 - Bauplattensäge $P_{\max} = 3.5$ kW
- Gesamt-Endenergieverbrauch 47.7 kWh
 - incl. nachgelagerter Peripheriegeräte (Wärmeschrank, Sägen usw.)
 - Verbräuche der Peripherie mittels Anschlussleistung berechnet

Spezifischer Primärenergieverbrauch Primäraluminiumherstellung

- Spezifischer Primärenergieverbrauch Primäraluminium: 47.2 kWh/kg
- Berücksichtigung von
 - Elektrischer Energie
 - Thermischer Energie
 - Energie für Transporte
- Keine Berücksichtigung von stofflichen Energieinhalten (bspw. Anode)
- Hauptenergieträger: Strom
- Prozessschritte
 - Bergbau Bauxit
 - Tonerdeherstellung
 - Anodenherstellung
 - Elektrolyse
 - Gießen/Legieren

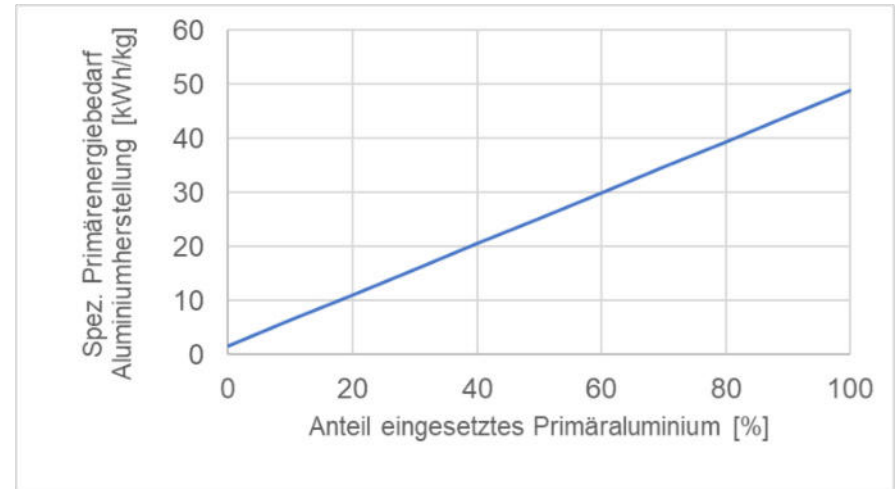


Endenergieanteile der Prozessschritte zur Primäraluminiumherstellung

Quellen: Spezifische Energieverbräuche einzelner Prozessschritte [KLO18]; Bereitstellungswirkungsgrad Erdgas: [JOC04], S. 108

Spezifischer Primärenergieverbrauch Sekundäraluminiumherstellung

- Spezifischer Primärenergieverbrauch Sekundäraluminium: 1.7 kWh/kg ([FRI10], S. 35)
- 13 % Primäraluminiumanteil
- Hauptenergieträger: Erdgas
- Annahme: Primär- und Sekundärrohstoffe durchlaufen Sekundärprozess



Spezifischer Primärenergieverbrauch Pulverherstellung

- Verfahren: Verdüsung mittels Gassprühen (gas atomization) [CAR22]
- Energieträger: Strom (induktive Erwärmung der Metalllegierung)
- Spez. Primärenergieverbrauch Pulverherstellung : 0.9 kWh/kg (um 350 K überhitzte Schmelze (vgl. [GAO19], S. 375), ohne Vorprozesse und Prozessgase)
- Keine Berücksichtigung der Gasaufbereitung (o. ä.)
- Keine Berücksichtigung des Ertrags
 - Entstehende Partikel nur teilweise für additive Fertigung geeignet
 - Verwendung von nicht für additive Fertigung geeigneten Partikelgrößen für andere Prozesse

Quellen: Stoffwerte Aluminium: [CZI08], S. B83/84; Bereitstellungswirkungsgrad Strom: [EU2012/27], Anhang IV

Szenarien Fertigungsprozess

	Szenario 1		Szenario 2	
	Prozess Zerspanung	Prozess 3D Druck und Zerspanung	Prozess Zerspanung	Prozess 3D Druck und Zerspanung
Randbedingungen	100 % Primäraluminium		13 % Primäraluminium	
	Kein Spänerecycling		Rest: sekundäre Vorstoffe	
KEV Herstellung Pulver [kWh]		34.3		5.9
KEV Herstellung Rohteil [kWh]	197.9		34.9	
KEV 3D-Druck [kWh]		119.3		119.3
KEV Zerspanung [kWh]	52.0	4.3	52.0	4.3
KEV gesamt [kWh]	249.9	157.9	86.9	129.5

Zusammenfassung

- Teilprozess mit größtem Energieverbrauch: Rohmaterialherstellung
- Teilprozess mit zweitgrößtem Energieverbrauch: Druckprozess
- Potentiale Energieeinsparung:
 - Kleinstmögliche Rohteilabmaße (z.B. durch optimiertes Spannen der Werkstücke)
 - Sortenreines Sammeln und Recyceln der Späne
 - Kurze Druckprozesse



Quellen

[CAR22] Carpenter Additive: Data Sheet AISi10Mg, 2022 (PDF Download 05.09.2024)

[GZI08] Czichos, H., Hennecke, M. (Hrsg.): Hütte. Das Ingenieurwissen. Springer Verlag, Heidelberg, 2008

[EU2012/27] RICHTLINIE 2012/27/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, Amtsblatt der Europäischen Union L 315/1

[FRI10] Frischenschlager, H., Karigl, B., Lampert, C. u. a.: Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich. Endbericht. Umweltbundesamt, Wien, 2010

[GAO19] Gao, C., Xiao, Z., Zou, H. u.a.: Characterization of spherical AISi10Mg powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 29 (2019), S. 374–384

[JOC04] Jochem, E.: Werkstoffeffizienz : Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe / Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, ISI. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 2004

[KLO18] Klöpffer, W., Finkbeiner, M.: Environmental Profile Report. Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe, European Aluminium, Brussels/Belgium, 2018

[VDI4600] VDI-Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA). Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2012

Kontakt

Marcus Viertel, M.Eng.

Fachpraktischer Mitarbeiter

Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen

Tel.: 03496 67 2338

E-Mail: marcus.viertel@hs-anhalt.de

Hochschule Anhalt

Bernburger Str. 55

06366 Köthen (Anhalt)

<https://www.hs-anhalt.de/CAM>

Session 2: Architektur & Bauwesen

Neuartige Materialien in der additiven Fertigung

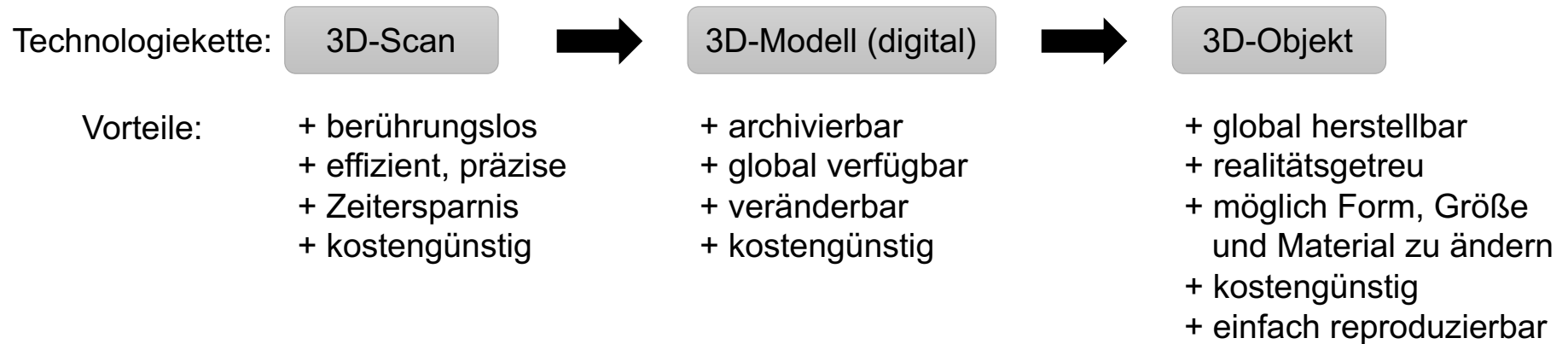
Dr. Falko Böttger-Hiller,
Beckmann-Institut für Technologieentwicklung
e.V. Chemnitz

Neue Materialien in der Additiven Fertigung

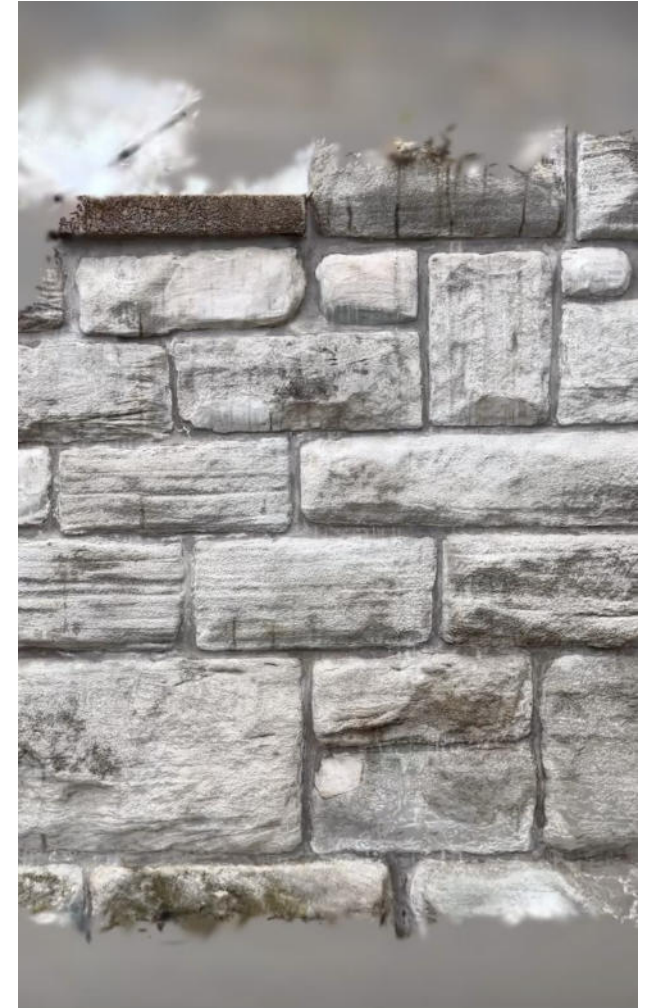


Merseburg, 16.10.2024

Motivation



3D-Scan



- **Qualität**
- **Handling**
- **Preis**

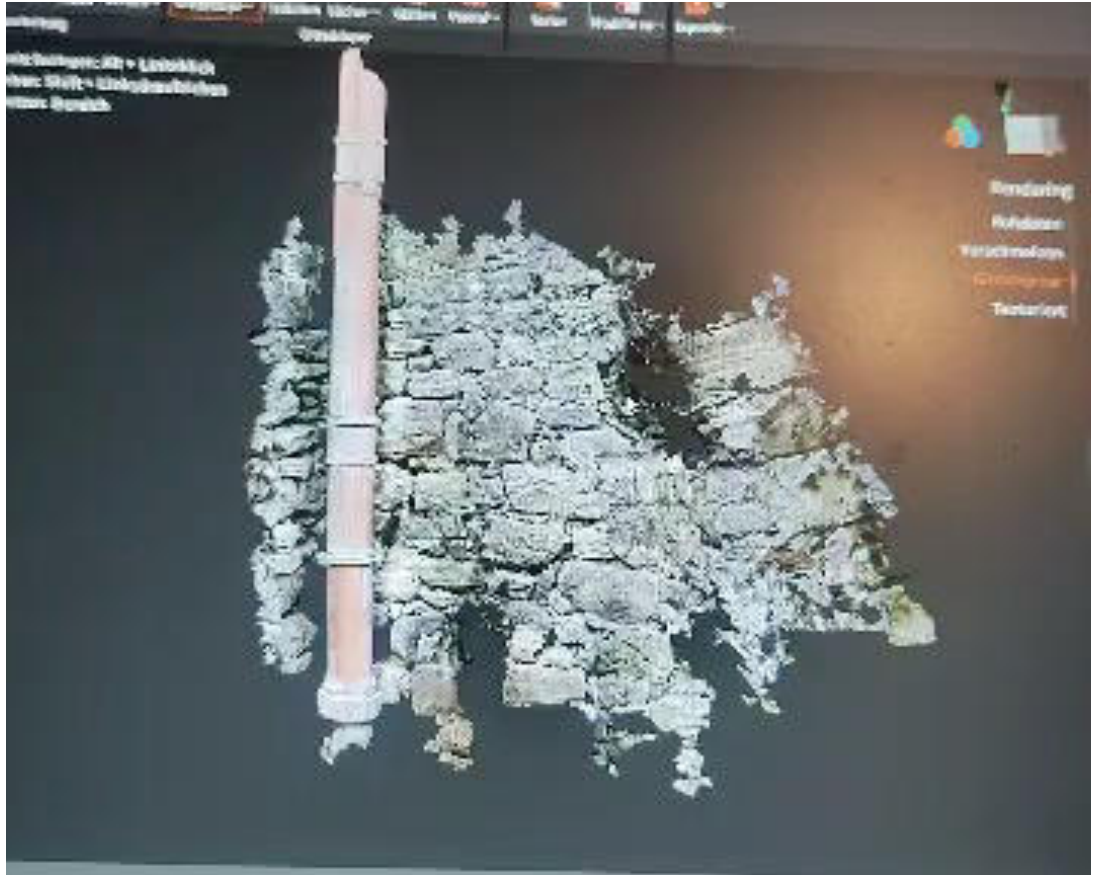
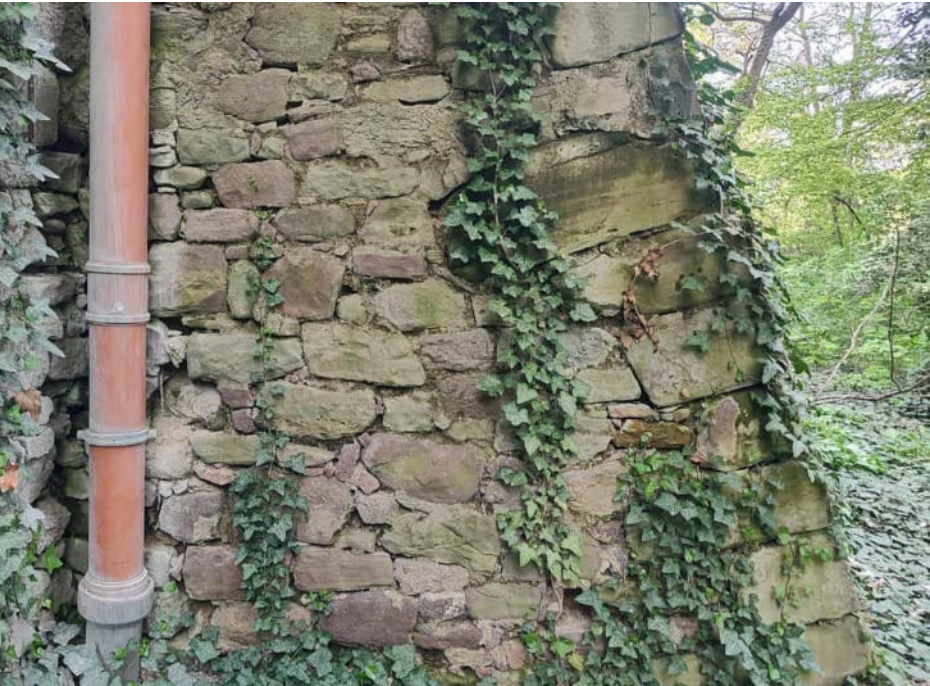
3D-Scan



3D-Scan



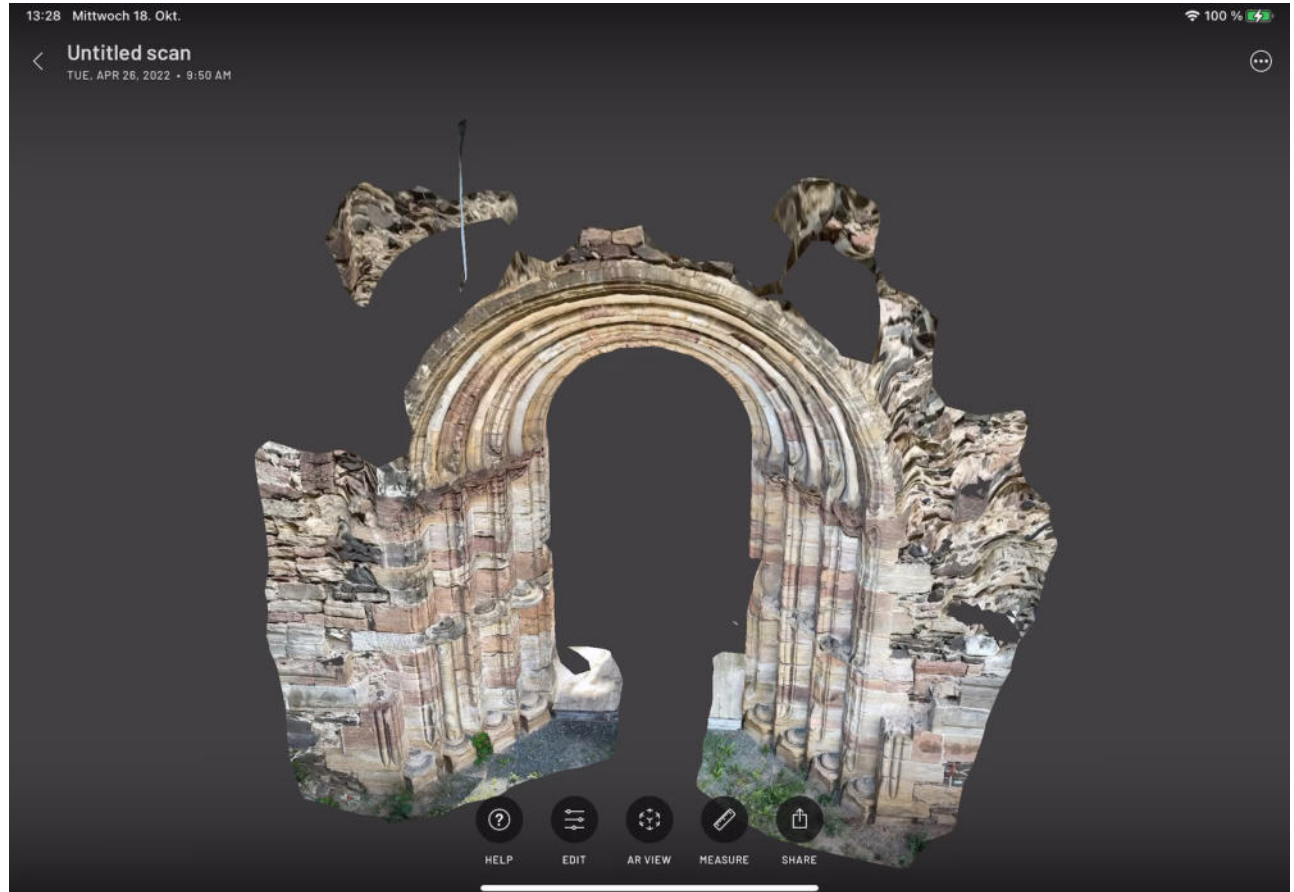
3D-Scan



3D-Scan



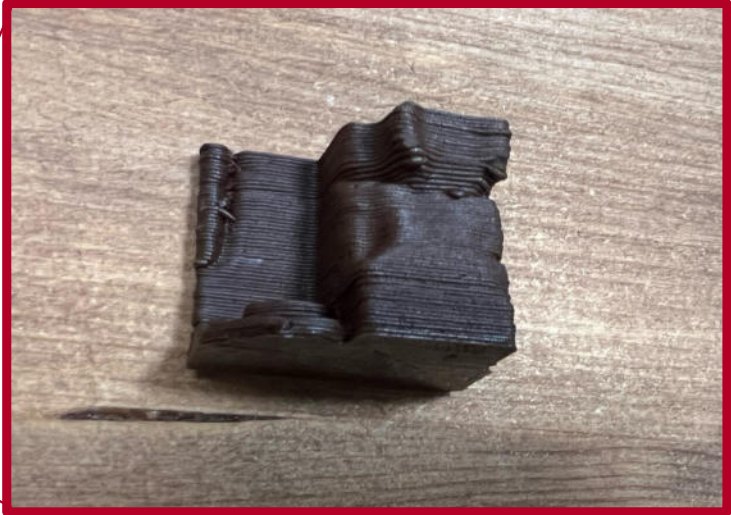
Herausforderung Restaurator



3D-Scan



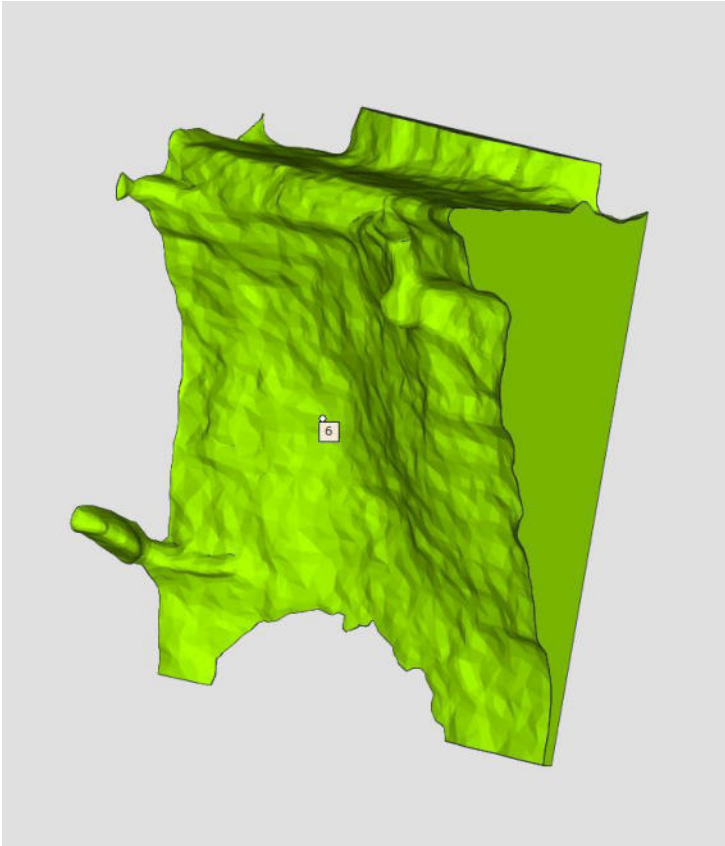
3D-Druck - Materialität



3D-Modell



3D-Modell

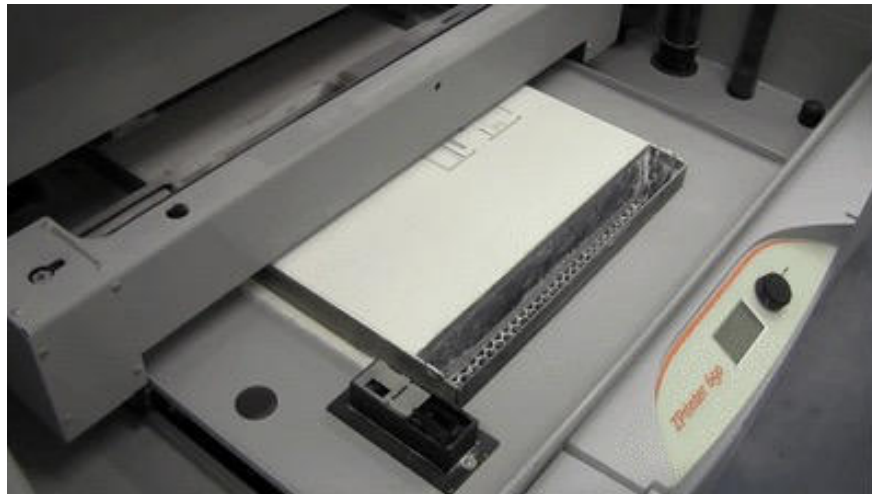


ABER... Steine Drucken???



Sondermaterialien

3D-Printing



<https://makeagif.com/gif/sandstone-inkjet-or-binder-jet-full-color-3d-printing-printie-3d-GZLoZW>

Materialauswahl



Sondermaterialien - NawaRo

- Reduzierung von Abfall für kurzlebige Bauteile
 - Gezieltes Einstellen der Lebensdauer
 - Upcycling von lokal verfügbaren Reststoffen zur weiteren Verbesserung des ökologischen Fußabdruckes
-
- ➔ Große Varianz der Eigenschaften bei biologischen Materialien
 - ➔ Auswahl der Anwendung in Abhängigkeit der Materialeigenschaften
 - ➔ Maschinenanpassung bzw. –Anpassbarkeit notwendig



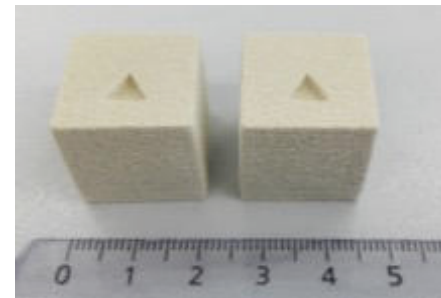
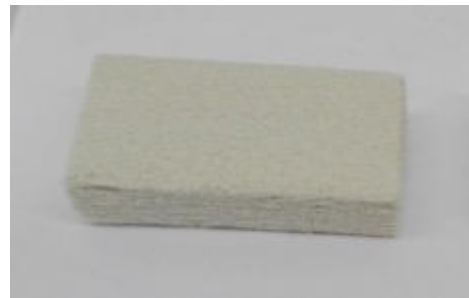
Miscanthus Partikel und 3dP Bauteile

Sondermaterialien - NawaRo



Sondermaterialien - NawaRo

- Bewertung der geometrischen Genauigkeit, Schrumpfung, Festigkeit
- Produktion diverser Testbauteile, um Komplexität und Druckbarkeit zu untersuchen

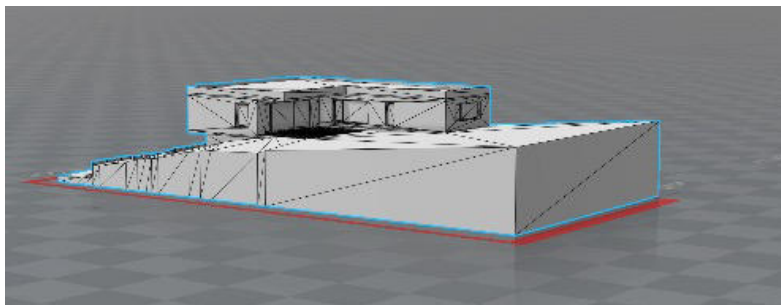
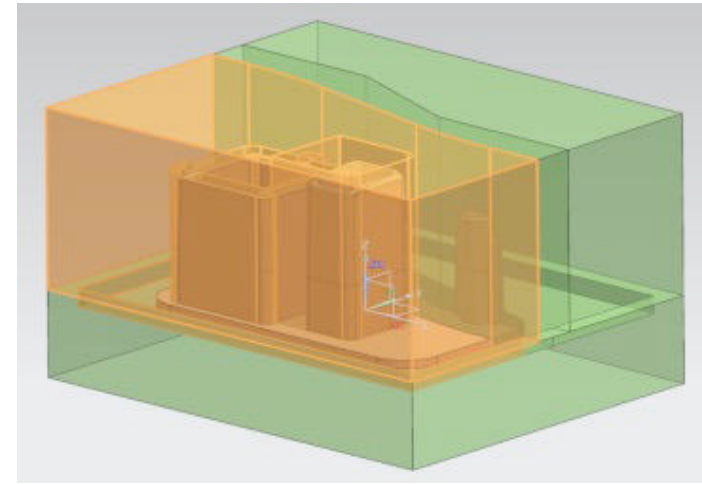
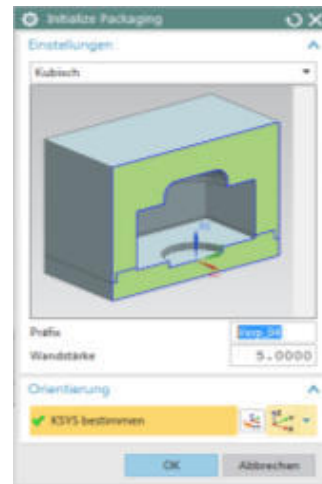
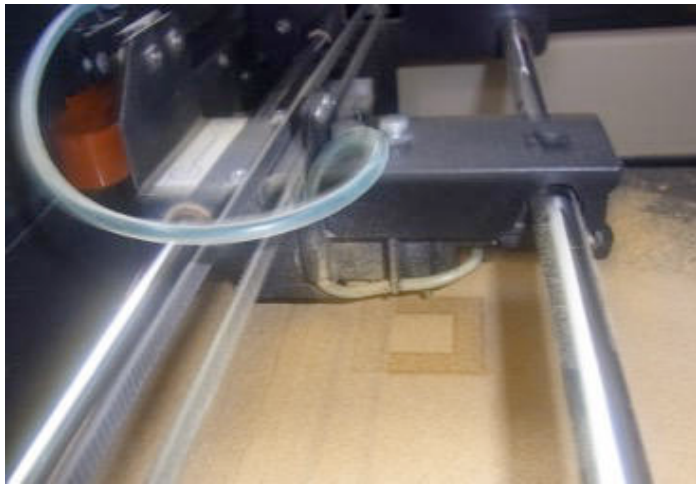


geometries a) (Miscanthus) cylinders b) (Maple) bar c) (Larch) shrinkage test part d) (Apricot stone) geometry test part



(Miscanthus) ball/hollow hemisphere b) (Apricot stone) 3D symbol c) (Miscanthus) thin walled bridge structure
d) (Sea shell) thin walled shell model

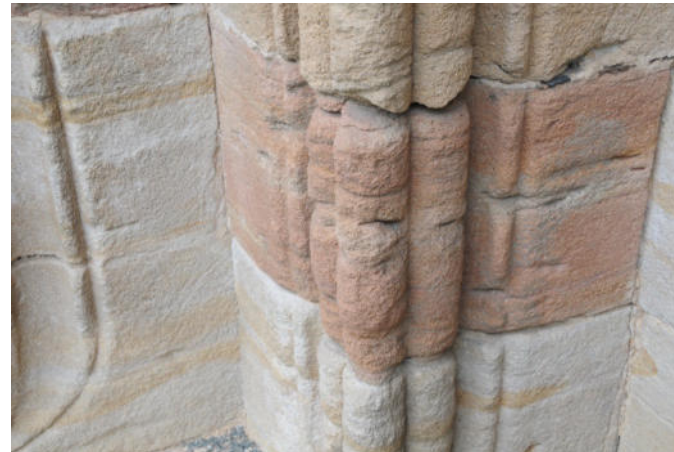
Sondermaterialien - NawaRo



Sondermaterialien - Steine



Herausforderungen - Steine



Dankeschön!



Dankeschön!

BECKMANN-INSTITUT für
Technologieentwicklung e.V.

www.beckmann-institut.de

Dr. Falko Böttger-Hiller
boettger-hiller@beckmann-institut.de



Institut für Diagnostik und
Konservierung an Denkmälern in
Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

www.idk-denkmal.de

Dr. Christoph Franzen
franzen@idk-denkmal.de



TU Freiberg
Professur Additive Fertigung

www.tu-freiberg.de

Prof. Dr. Henning Zeidler
Zeidler@imkf.tu-freiberg.de



INNOVENT e. V.
www.innovent-jena.de

Benjamin Scherer
bs@innovent-jena.de



Besuchen Sie uns!



BECKMANN-INSTITUT für
Technologieentwicklung e. V.



Dr. Falko Böttger-Hiller
boettger-hiller@beckmann-institut.de

Session 2: Architektur & Bauwesen

**Robotischer 3D-Druck von nicht-
standardisierten Porzellanstrukturen**

Michael Braun,
Bauhaus Universität Weimar

11. Mitteldeutsches Forum | 3D-Druck in der Anwendung
16. Oktober 2024 | Hochschule Merseburg

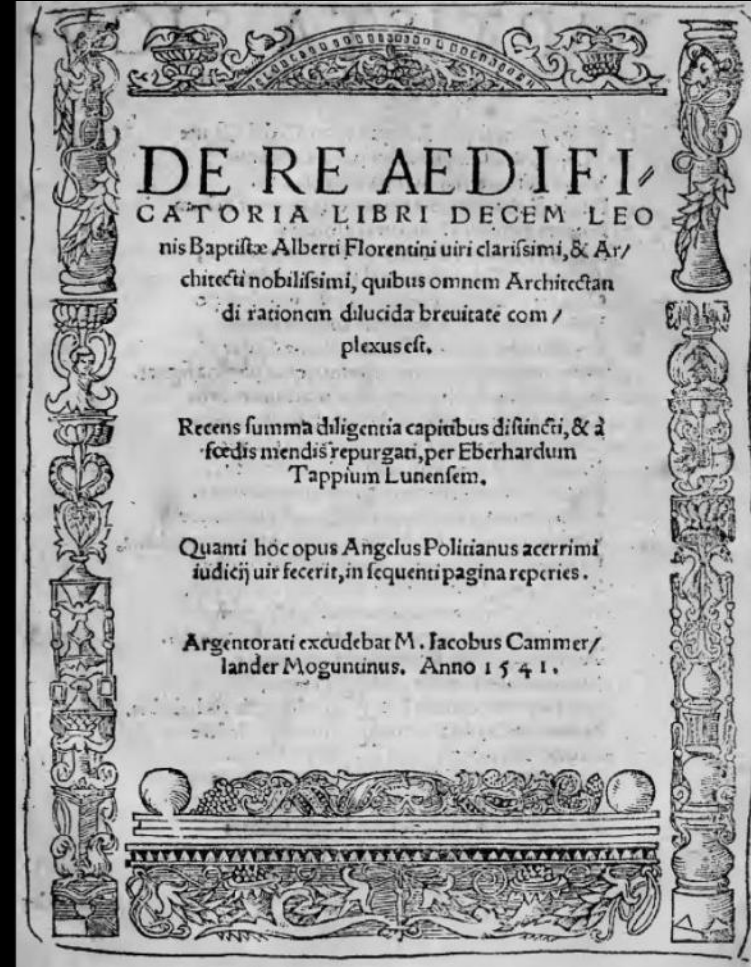
Deviation-driven Design: Robotischer 3D-Druck von nicht-standardisierten Porzellanstrukturen

M.A. Michael Braun



20 + 5

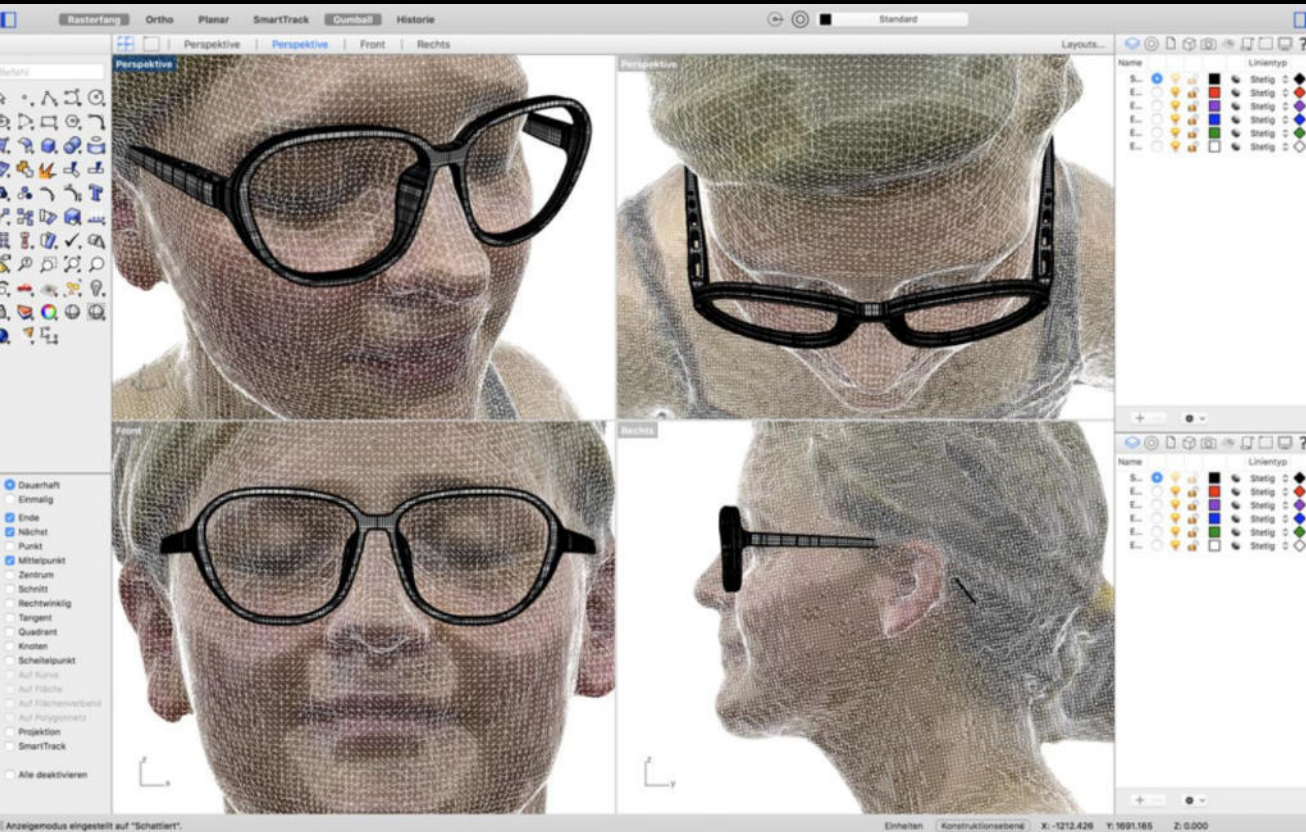




Links: Leon Battista Alberti (1404-1472); rechts: Leon Battista Alberti, De re aedificatoria, 1443-1452



Links: Ford, Model T (“Tin Lizzy”), 1913 to 1927; rechts: Henry Ford, 1863-1947



Parametrisch angepasste Brillengestelle, Michael Braun, Bauhaus-Universität Weimar, 2018

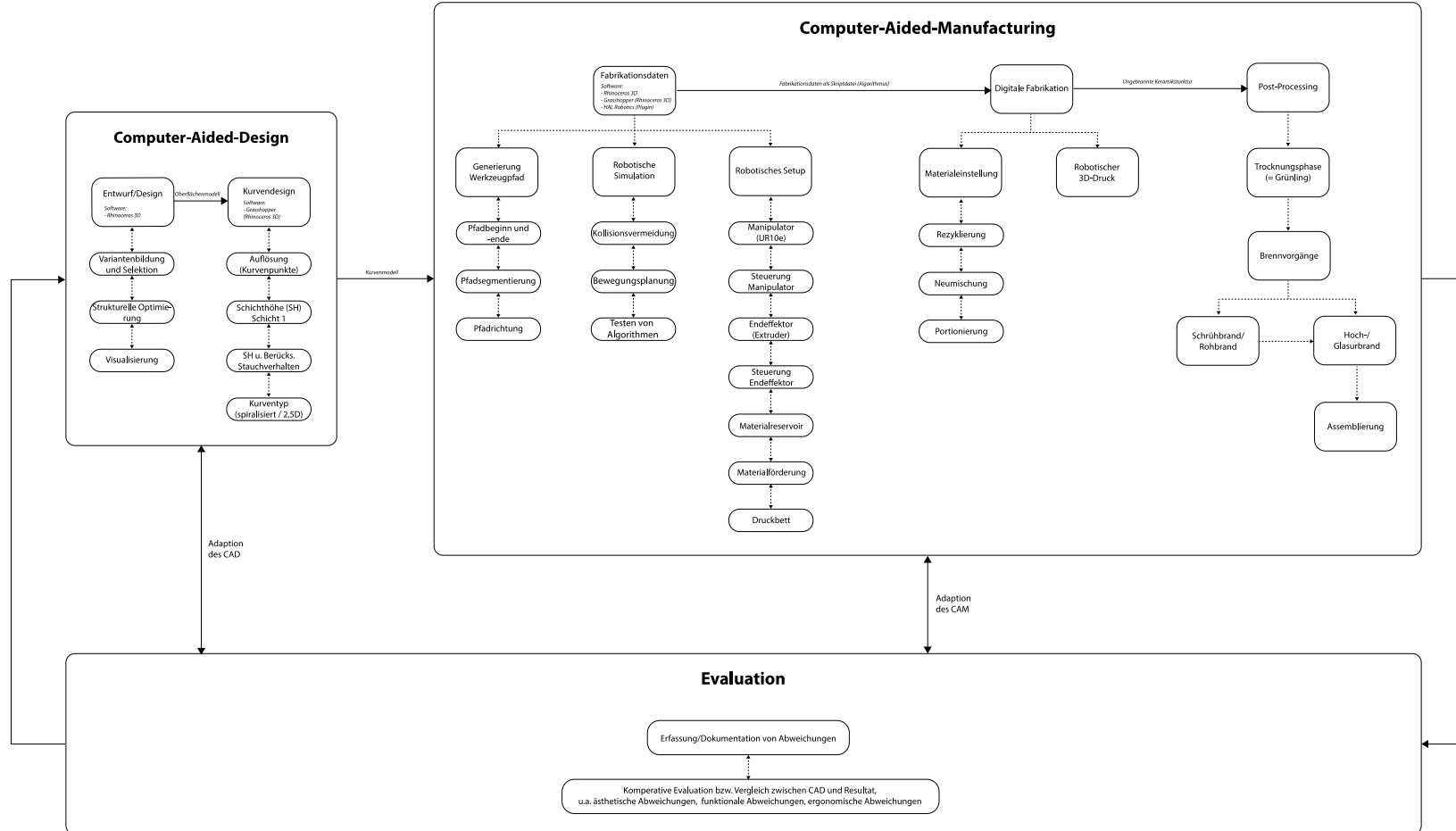
Deviation-driven Design



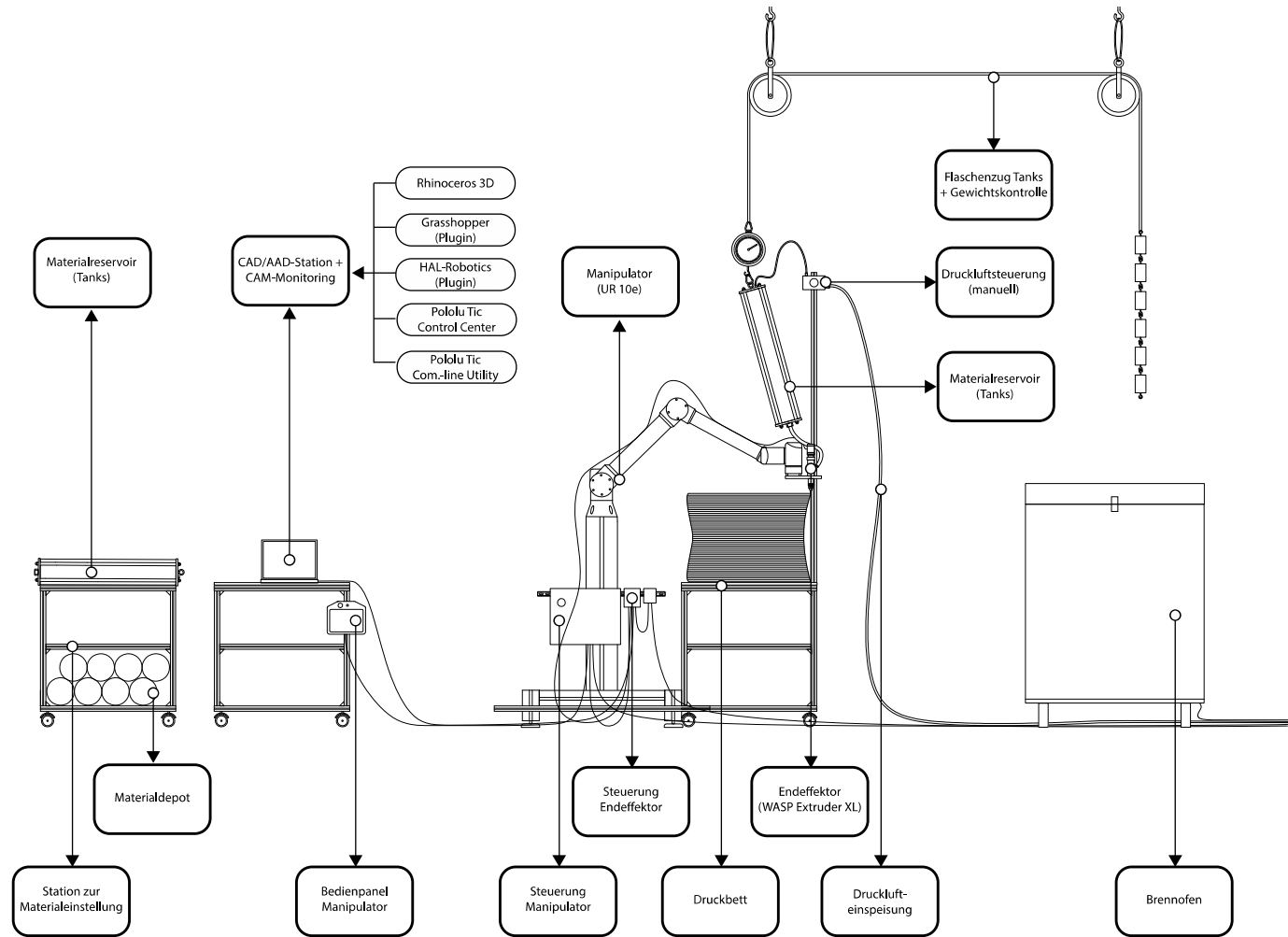
Robotischer 3D-Druck von Porzellan, Bauhaus-Universität Weimar, 2024

Deviation-driven Design:

- Aufzeigen des gestalterischen Potenzials durch gezielte Einbeziehung von Abweichungen im Fertigungsprozess.
- Abweichungen werden als kreative Impulse genutzt, nicht als Fehler.
- Der abweichungsgetriebene Entwurfsprozess integriert unerwartete Variationen aktiv in Formfindung und Materialmanipulation.
- Entwicklung neuer Designstrategien für flexible und adaptive Gestaltung von nicht-standardisierten Designs.
- Dynamisches, iteratives Gestaltungsverfahren durch Wechselwirkung zwischen digitalem Entwurf und robotergestützter Fertigung.
- Anpassung an physikalische Eigenschaften des Materials, Produktionsbedingungen und spontane Nutzeränderungen.



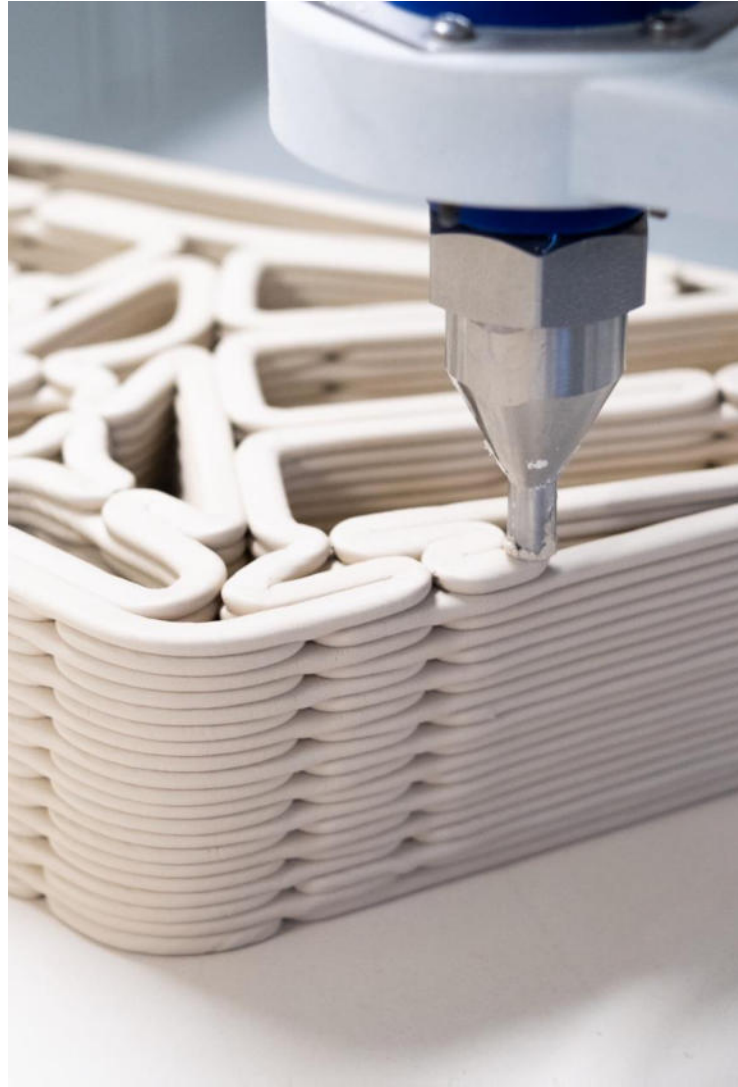
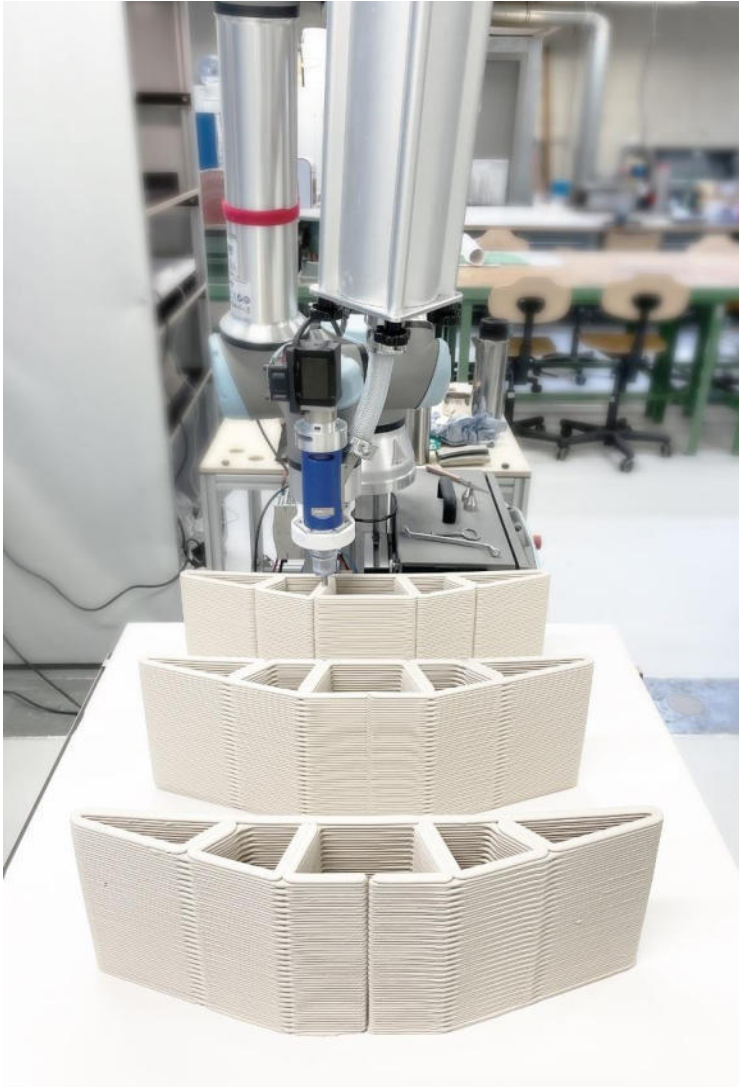
Grafische Darstellung der Deviation-driven-Design-Prozesskette: interaktiver Prozessablauf vom Entwurf bis zur Fabrikation unter besonderer Berücksichtigung von auftretenden Abweichungen zwischen CAD und CAM



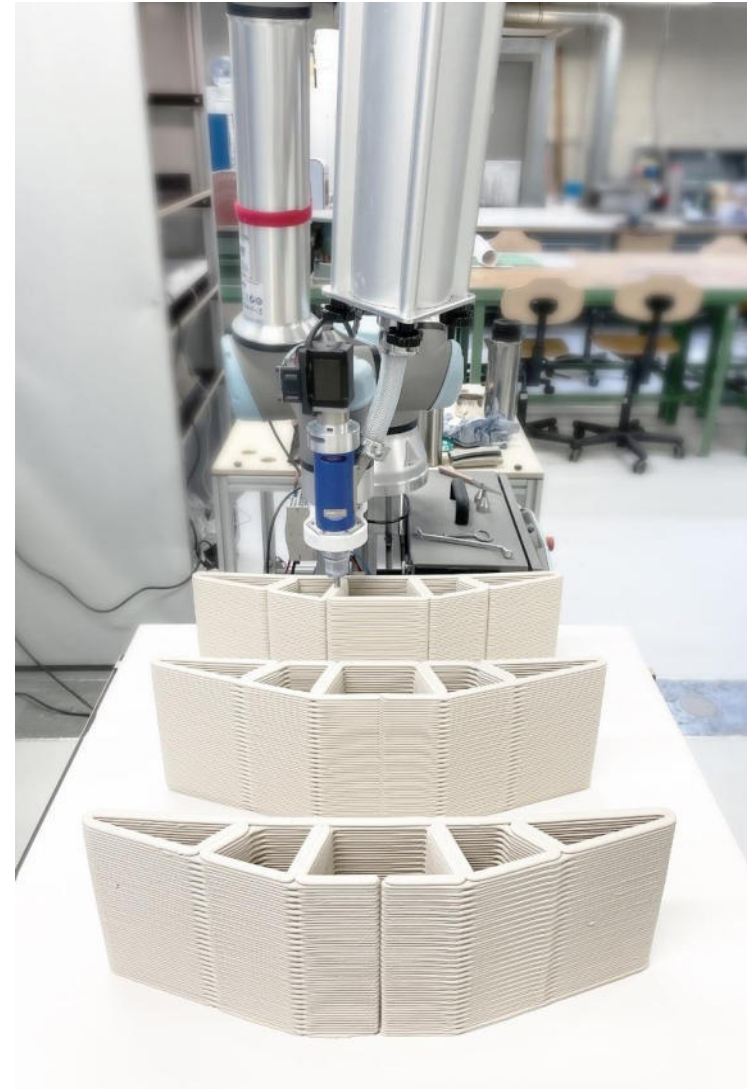
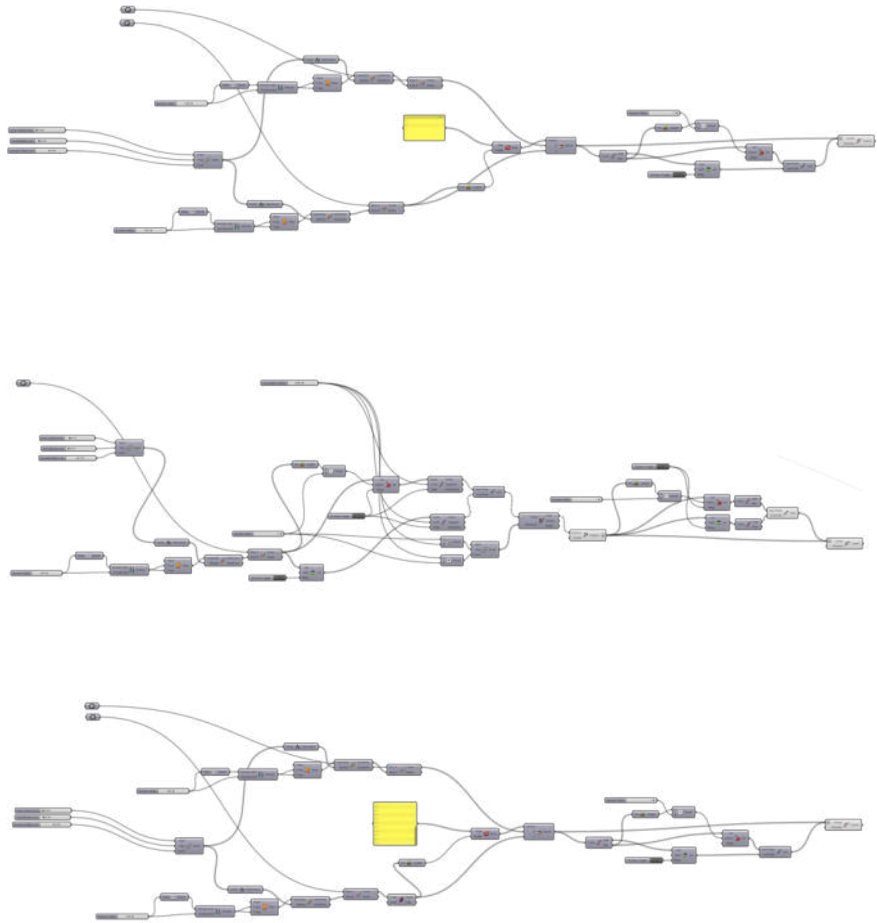
Grafische Darstellung des Setups für die robotische Extrusion von Porzellan



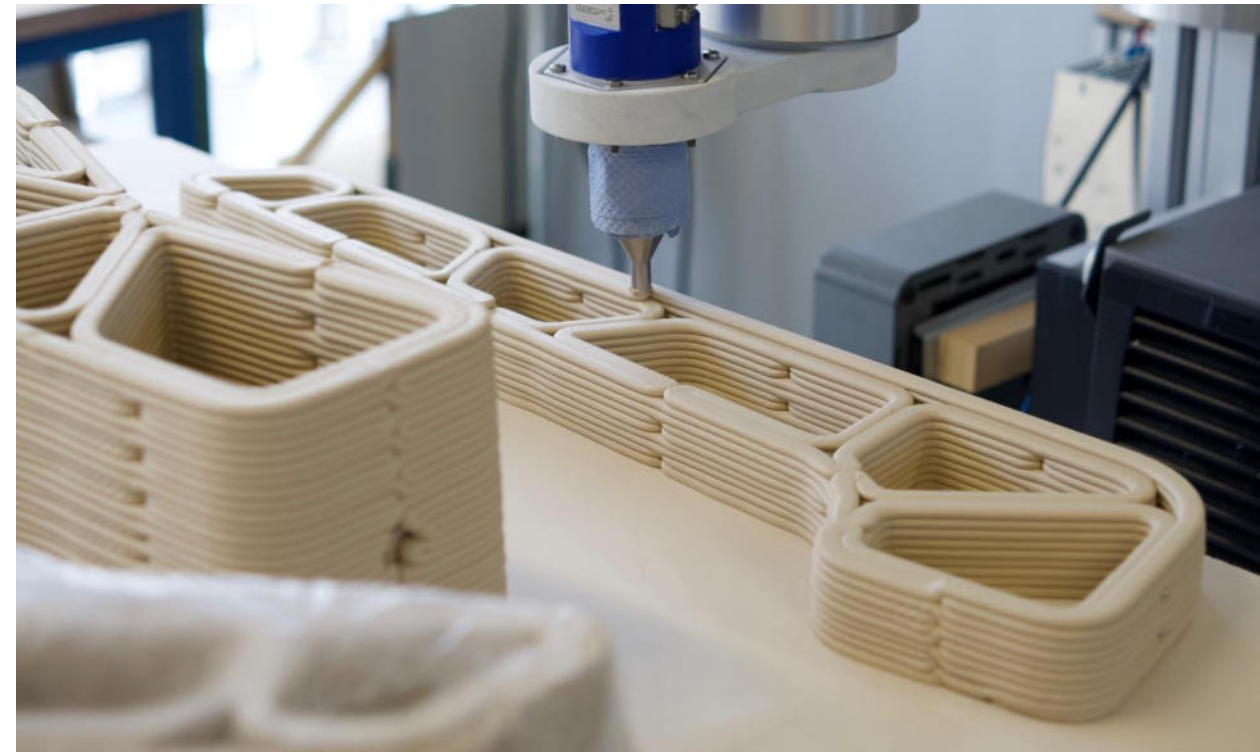
Porzellan in unterschiedlichen Zuständen: Rohmasse (links), lederhartes Porzellan während des Trocknens (Mitte), sowie lufttrockenes Porzellan vor den mehrfachen Brennvorgängen im Ofen



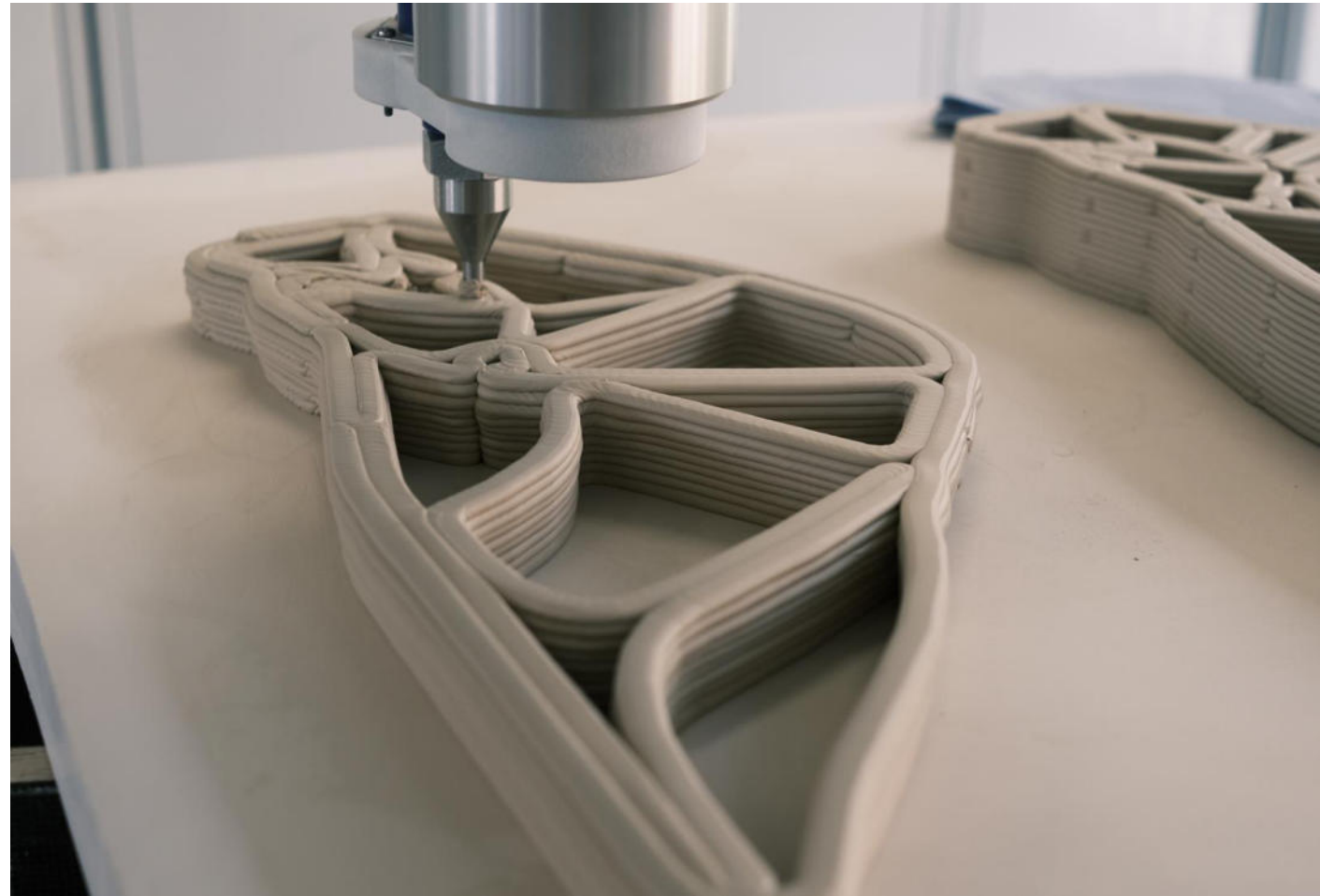
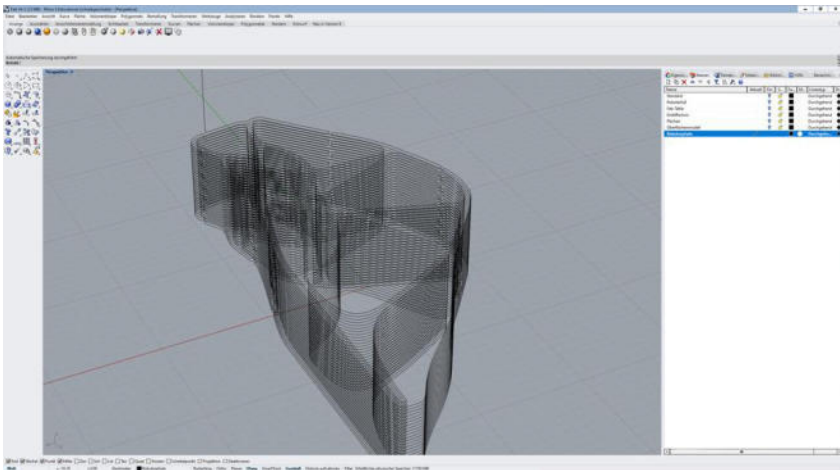
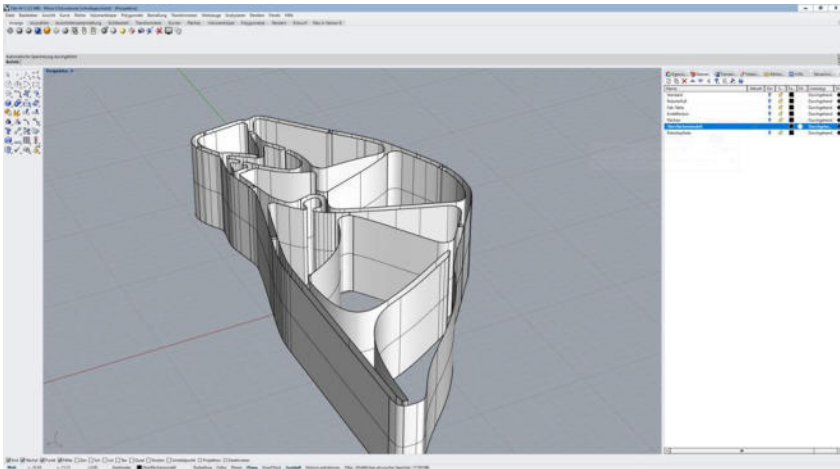
Einfluss der Roboterpfadföhrung auf die Deformation von extrudierten Porzellanstrukturen (links), Einfluss von Slicing-Prozessen auf die ästhetische und funktionale Qualität von robotisch-extrudierten Porzellanstrukturen (Mitte), Untersuchung der Assemblierung und strukturellen Integrität von Porzellanstrukturen im additiven Fertigungsprozess (rechts)



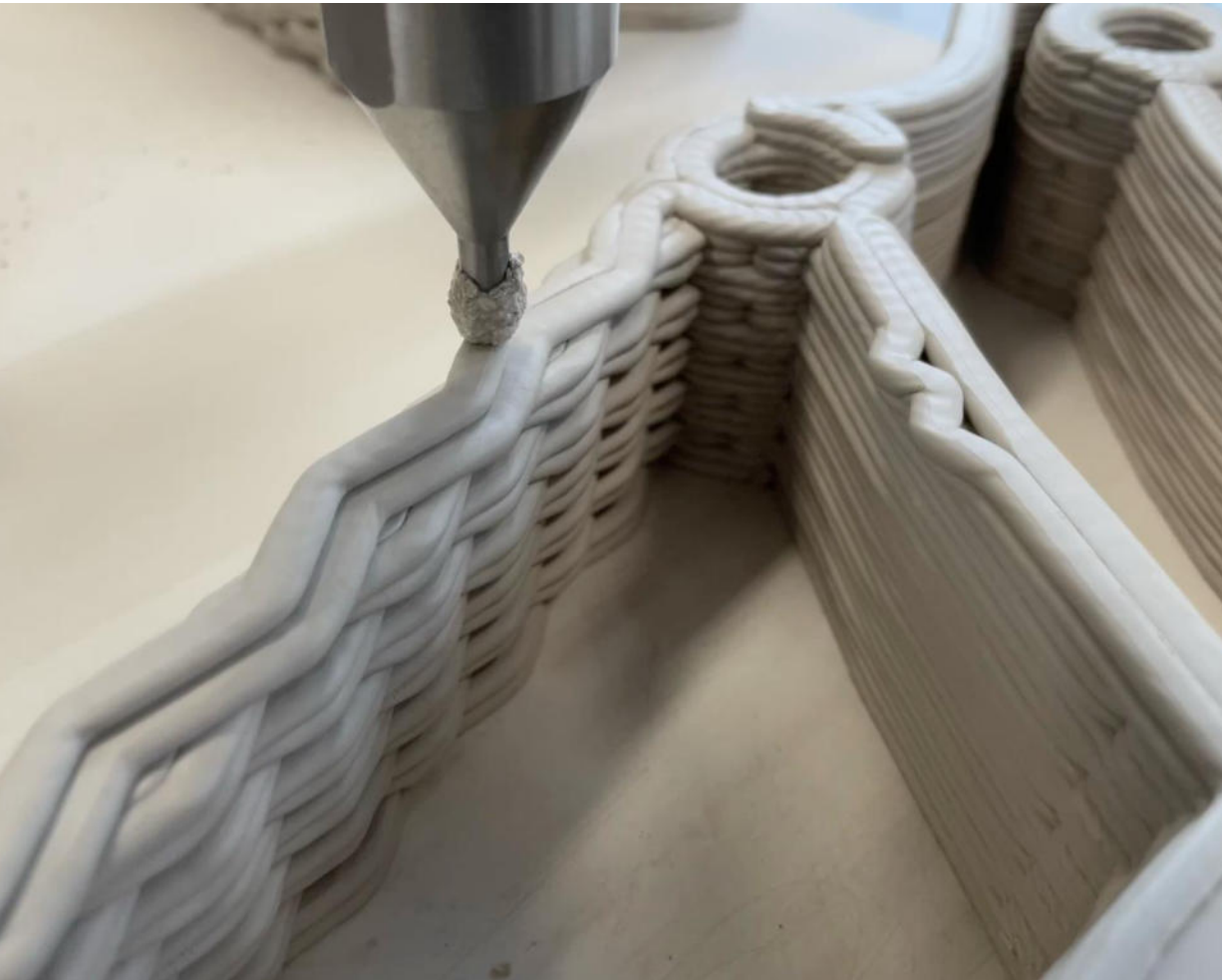
Links: Drei Grasshopper-Skripte zur Roboterpfadgenerierung mit unterschiedlichen Kurvenstrategien, rechts: Robotische Extrusion unter Verwendung von drei unterschiedlichen Kurvenintelligenzen anhand eines Entwurfs einer Porzellanstruktur



Links: Vergleich der Strukturen in dessen Grad der Deformation während der Trocknung, rechts: Multidirektionale Pfade formen ein Ornament auf der Oberfläche der Strukturen, indem jede Schicht in eine andere Richtung extrudiert wird, was Materialströme ausgleicht und Verformungen minimiert



Darstellung der computergenerierten Struktur im CAD als Oberflächenmodell (links oben) und Kurvenmodell (links unten), sowie die tatsächliche Oberflächenerscheinung des robotisch-fabrizierten Resultats (rechts)



Lokale Verwebung der Schichten fördert strukturelle Stabilität und erhöht funktionale Parameter



Untersuchte Konfigurationen: Schraubverbindungen (links), Hybride Verbindungen aus Formschluss und Spanngurten (Mitte), Hybride Verbindungen aus Formschluss und Schraubverbindungen (rechts)



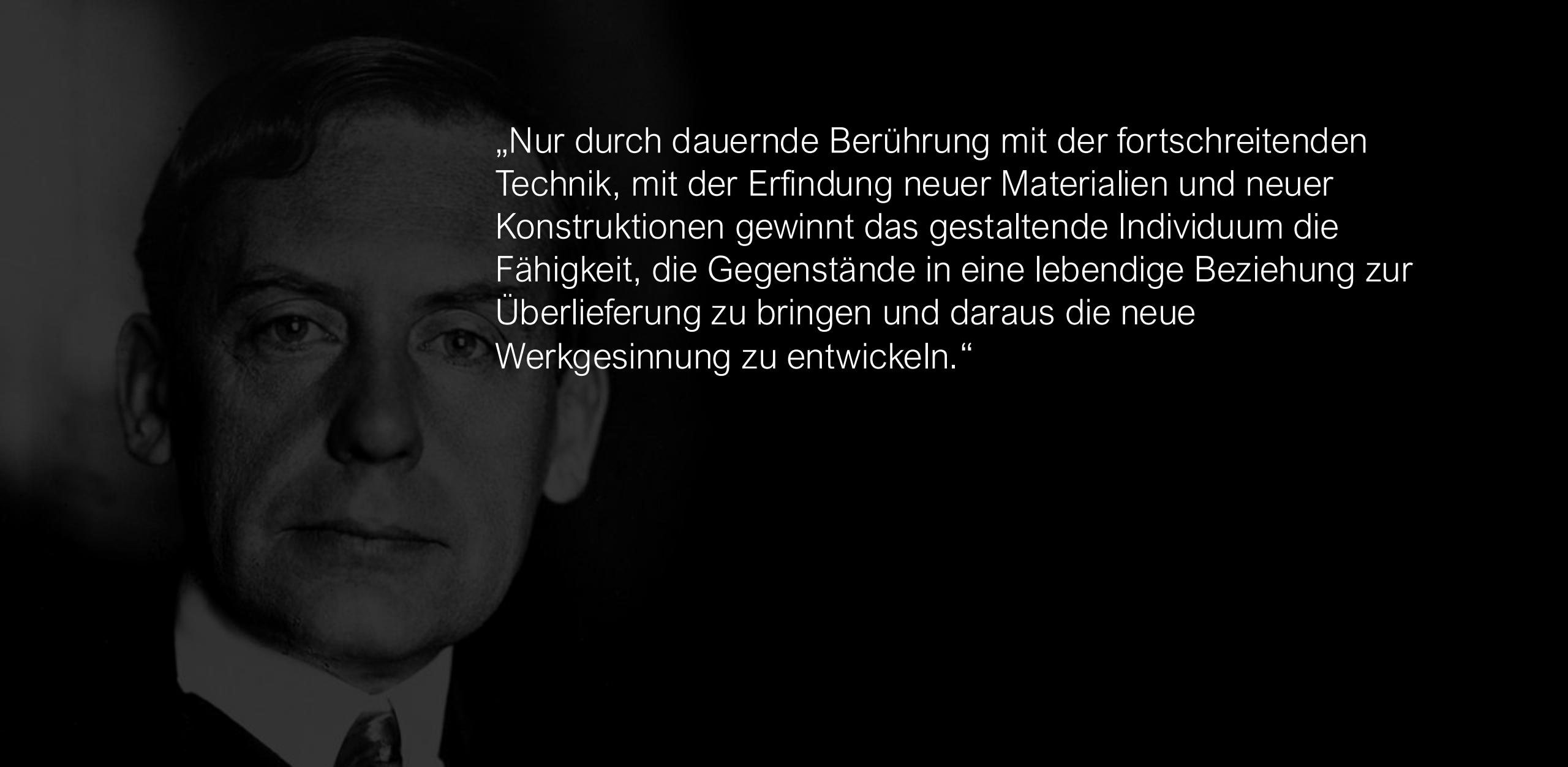
Untersuchte Konfigurationen: Schraubverbindungen (links), Hybride Verbindungen aus Formschluss und Spanngurten (Mitte), Hybride Verbindungen aus Formschluss und Schraubverbindungen (rechts)



Robotischer 3D-Druck von Porzellan, Bauhaus-Universität Weimar, 2024



Limitationen: Materialabhängigkeit, Skalierbarkeit und Reproduzierbarkeit, Fokus auf ausgewählte Parameter, Langzeitstabilität



„Nur durch dauernde Berührung mit der fortschreitenden Technik, mit der Erfindung neuer Materialien und neuer Konstruktionen gewinnt das gestaltende Individuum die Fähigkeit, die Gegenstände in eine lebendige Beziehung zur Überlieferung zu bringen und daraus die neue Werkgesinnung zu entwickeln.“



Links: Marcel Breuer, Club Chair (B3), 1927; rechts: Michael Braun, RPP-Chair (Robotic Printed Porcelain Chair), 2024

Session 2: Architektur & Bauwesen

Hanf+X

Dr. Susanne Bartholomé,
Hochschule Merseburg



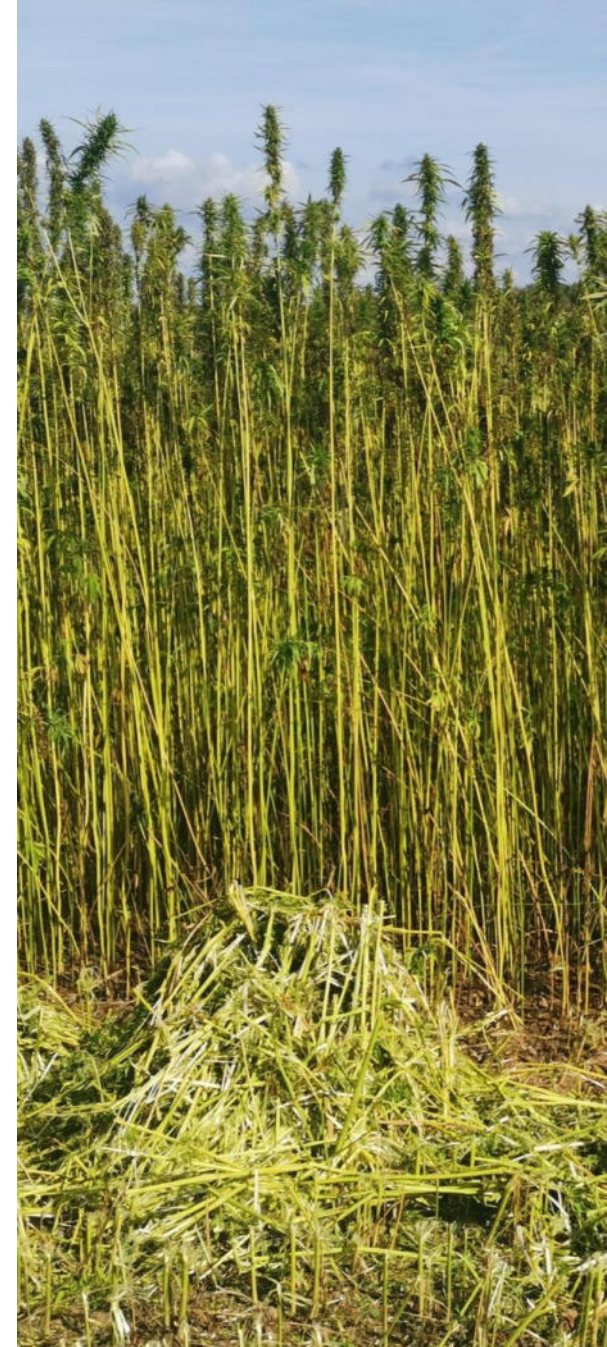
Hochschule Merseburg

11. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

Session 2: Architektur & Bauwesen

Hanf + X

Dr.-Ing. Susanne Bartholomé, Fachbereich INW | 16. Oktober 2024



Inhalt

1. Warum Hanf?
2. Hanf + Kalk
3. Hanf + Lehm
4. Hanf + Mycel
5. (Hanf)Lehm + 3D Druck



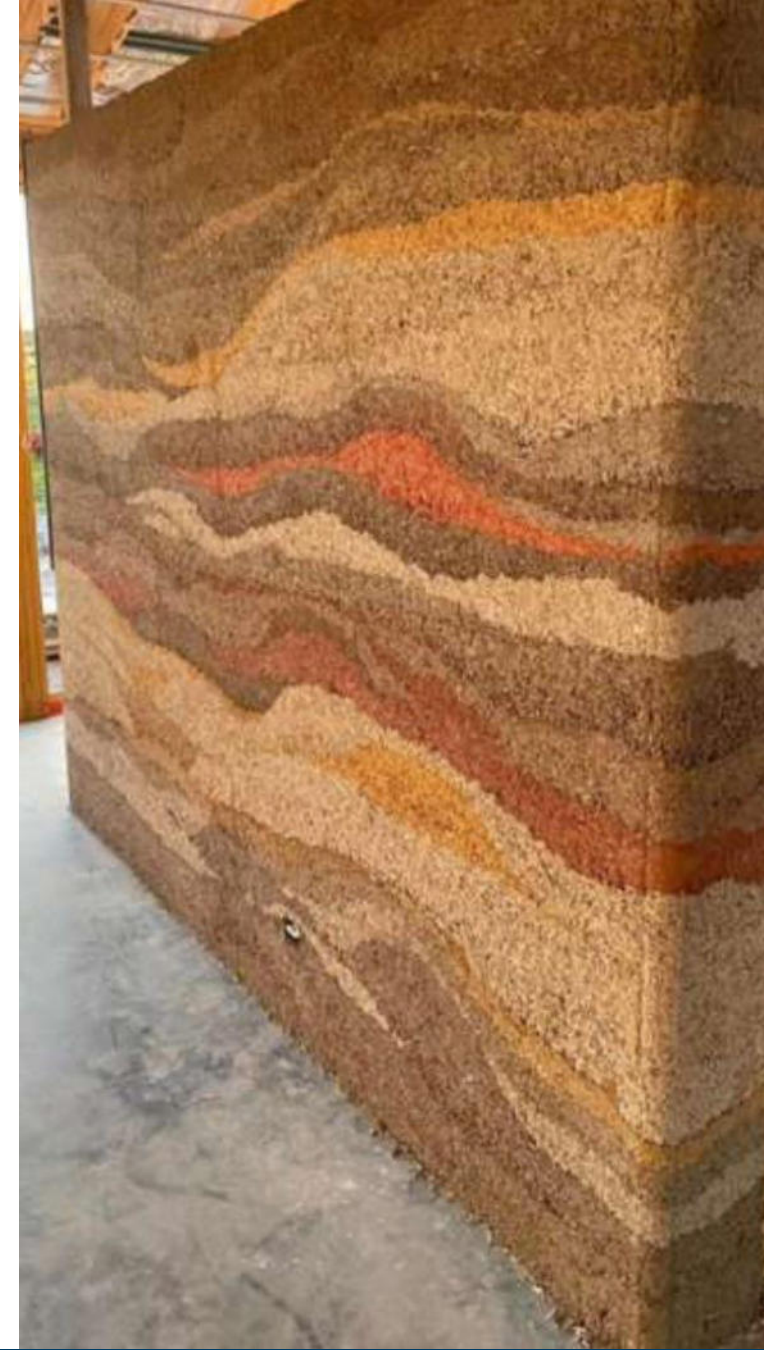
Warum Hanf?

- Wächst 50 mal schneller als ein Baum
- 4-6 cm in 3-4 Monaten
- 1 ha speichert \approx 20 t CO₂
- Geringer Wasserverbrauch
- Kein Einsatz von Pestiziden
- Diversifizierung der Fruchtfolge
- 100 % nutzbar und 100 % recyclebar



Hanf + Kalk

→ Hanfschäbe + Kalk – gestampft, gemauert, gesprüht



Hanf + Kalk

- Hitzeschutz, Schallschutz, Feuerresistenz
- Schwerentflammbar, kein Rauch, kein brennendes Abtropfen
- Raumklimaregulierend durch Diffusionsoffenheit
- Schadstoffabsorption, elmag. Abschirmung
- CO₂ – negativ (1t = -900kg CO_{2e})
- verrottungsfest, schädlingsresistent, schimmelhemmend





Hanf + Lehm

- Steine, Platten, Schüttung
- Trockeneinbau, Stampflehm mit Hanfschäben
- klimafreundlich, wiederverwertbar, leicht abbaubar





Hanf + Lehm

- Wärmedämmend, schalldämmend
- schwerentflammbar
- Wohngesunde Feuchteregulierung



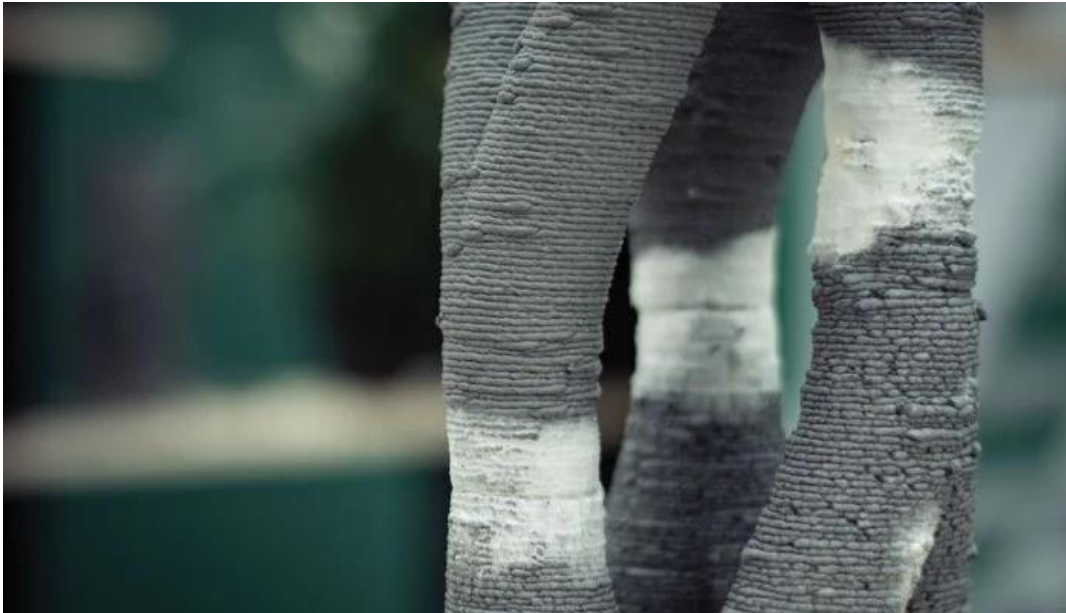
Hanf + Myzel

- Wurzelgeflecht von Pilzen
- Biologisch abbaubar bzw. kompostierbar
- Gute Dämmeigenschaften
- Herstellung ressourcenschonend, energiearm



Hanf + Myzel

- Spezielle Ästhetik
- Abhängig von Pilzart und Substrat
- Formgebung durch Pressen möglich
- 3D Druck mittels Paste aus Substrat und Pilz



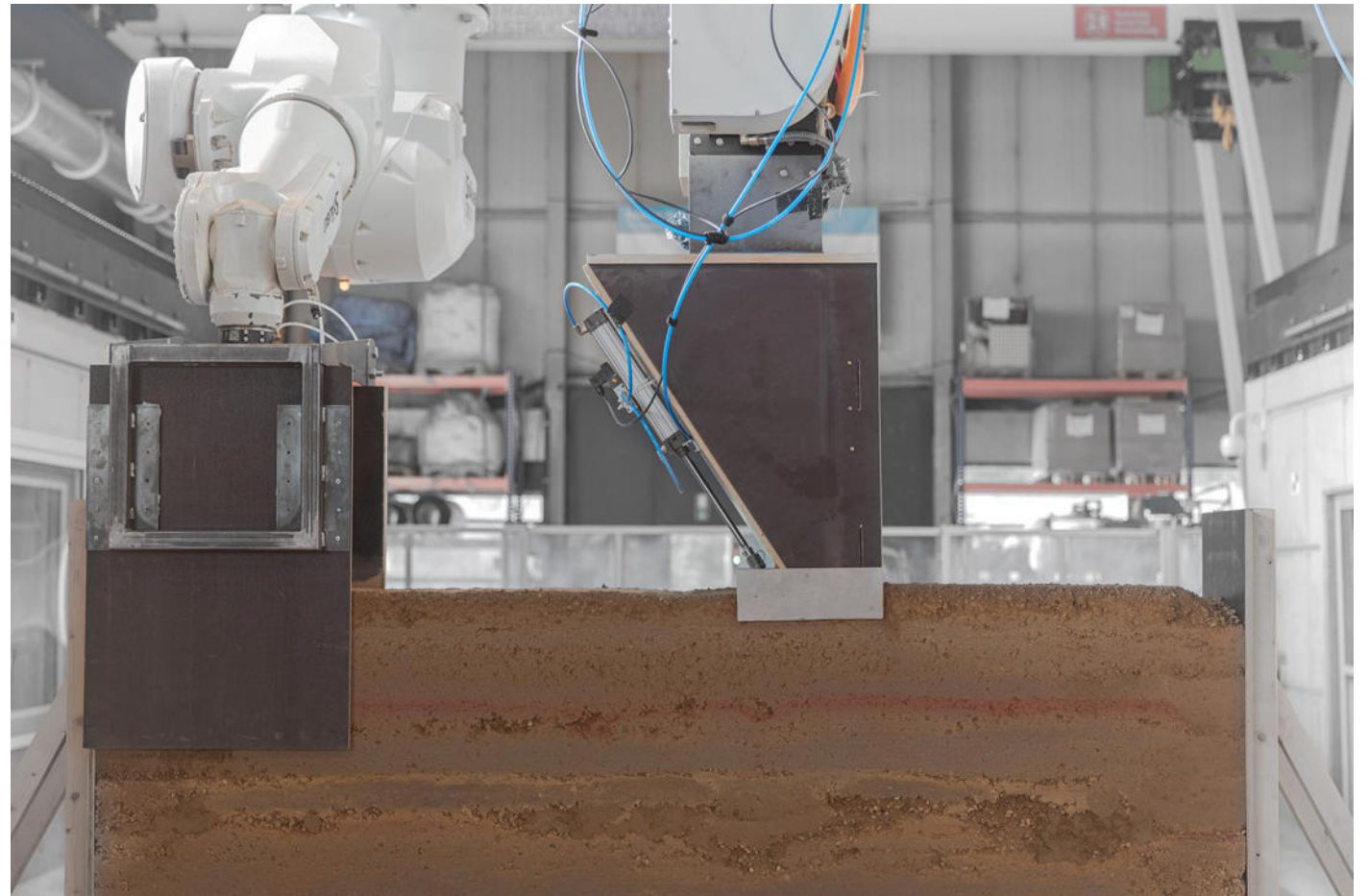
(Hanf)Lehm + 3D Druck

- Einsatz von Druckkraft beim Einbau
- Adaption aus dem Stampflehm



(Hanf)Lehm + 3D Druck

→ Vorreiter TU Braunschweig



Danke!

Dr.-Ing. Susanne Bartholomé

Leiterin NWG Bio-Rohstoffe (Hanf) - Werkstoffe

+49 3461 46 – 2536

susanne.bartholome@hs-merseburg.de

Quellen

Folie 4: Rainer Nowotny (Hanffaser Uckermark eG)

Folie 5: Henrik Pauly (Hanfingenieur)

Folie 6: Felix Drewes (klimapraaxis)

Folie 7/8: <https://hanffaser.de/produkte>

Folie 9: <https://www.iap.fraunhofer.de/de/Pressemitteilungen/2024/pilzmyzel-als-basis-fuer-nachhaltige-produkte.html>

Folie 10: https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1741?type=all&n=Grundlagen;
<https://www.3dnatives.com/de/material-myzel-3d-druck-220420241/>

Folie 11: <https://www.weleda.de/footer/dialog/presseartikel/europas-groesste-lehmbaustelle>

Folie 12: Fotos: © Joschua Gosslar/TU Braunschweig)



<https://www.hs-merseburg.de/hochschule/projekte/nutzhanf/>

Session 3:

Verbundwerkstoffe

**Herstellung und Analyse faserverstärkter
additiv gefertigter Leichtbaustrukturen auf
Basis 3D-Druck und Tapelege-Prozess**

Moritz Vyhnał,
Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und
-verarbeitung PAZ/ Fh IMWS

Herstellung und Analyse faserverstärkter additiv gefertigter Leichtbaustrukturen auf Basis 3D-Druck und Tapelege-Prozess

Abstract:

Die Fused Granular Fabrication (FGF) ist eine Großformatige Additive-Fertigungstechnologie (LFAM) und konzentriert sich auf eine kosteneffiziente granulatbasierte Herstellung, indem die Notwendigkeit für Halbfertigfilamente entfällt. Dies ermöglicht eine schnellere Produktionszeit und ein breiteres Spektrum an verwendbaren Materialien für maßgeschneiderte Verbundwerkstoffe. In dieser Studie wurden die mechanischen und morphologischen Eigenschaften von FGF-Teststrukturen aus Polyamid 6, verstärkt mit 40 % kurzen Kohlenstofffasern, untersucht. Zu diesem Zweck wurden FGF-Teststrukturen mit drei verschiedenen Parameter-Einstellungen produziert. Die FGF-gedruckten Strukturen zeigen im Allgemeinen signifikante anisotrope mechanische Eigenschaften, die durch den schichtweisen Aufbauprozess verursacht werden. Um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern und das anisotrope Verhalten der FGF-Strukturen zu reduzieren, wurden anschließend kontinuierliche unidirektionale faserverstärkte Bänder (UD-Bänder), die eine automatisierte Bandablage (ATL) verwenden, angewendet. Somit wurde eine signifikante Verbesserung der Biegefestigkeit und -steifigkeit der hergestellten FGF-Strukturen durch Hybridisierung mit 60 % glasfaserverstärkten Polyamid 6 UD-Bändern beobachtet. Da die Effektivität der UD-Bandverstärkung hauptsächlich von der Qualität der Verbindung zwischen dem UD-Band und der FGF-Struktur abhängt, wurden die Oberflächenqualität der FGF-Struktur, die Morphologie der Schnittstelle und die Parameter des Bandablageprozesses untersucht.

Session 3:

Verbundwerkstoffe

**Untersuchungen zum Einfluss von Glasfasern
auf die Eigenschaften von PC-ABS in der
granulatbasierten, additiven Fertigung**

Toni Wille,
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Untersuchungen zum Einfluss von Glasfasern auf die Eigenschaften von PC-ABS in der granulatbasierten, additiven Fertigung

T. Wille¹, A. Hopf¹, F. Neitmann¹, D. Linke¹, J. Bliedtner¹, F. Poschenrieder², S. Ryabus²

¹Ernst-Abbe-Hochschule Jena

²BKW Kunststoffe GmbH

³STURM GmbH

1. Technologische Grundlagen
2. Anlagentechnik
3. Material
4. Ergebnisse
 - 4.1 Strangmodell
 - 4.2 Faserorientierung
 - 4.3 mechanische Untersuchungen
 - 4.4 Einfluss auf den Bauteilverzug
 - 4.5 subtraktive Bearbeitung
5. Ausblick



Materialextrusion (MEX) nach DIN EN ISO 52900:

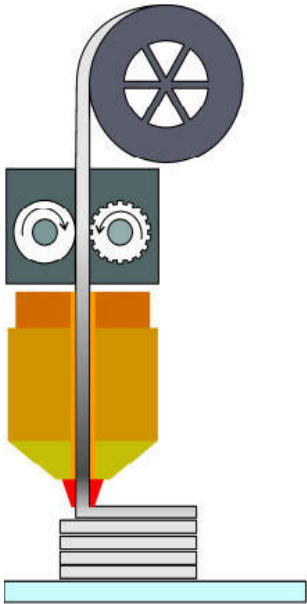


Abb. 1: Grundprinzip der Filamentextrusion
[Gonzalez-Gutierrez et al.]

Fused Layer Modelling	granulatbasiertes Schmelzschichten (LSAM)
Verfahrensprinzip	
<ul style="list-style-type: none"> Strangablageverfahren mittels Extrusion thermisch plastifizierten Materials 	
Materialzufuhr	
i.d.R. Filament	Granulat
Düsendurchmesser	
≈ 0,4 - 1,0 mm	≈ 1,0 - 6,0 mm
Materialaustragsraten	
≈ 0,01 kg/h	≈ 0,5 - 6,5 kg/h

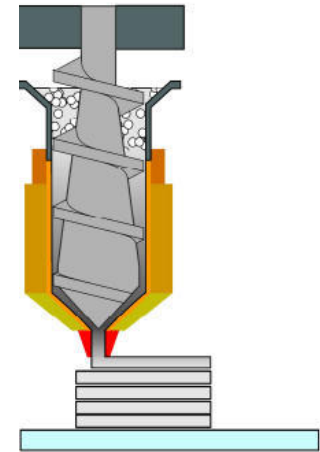


Abb. 2: Grundprinzip der Granulatextrusion
[Gonzalez-Gutierrez et al.]

Faserverstärkung von Thermoplasten

Ziele:

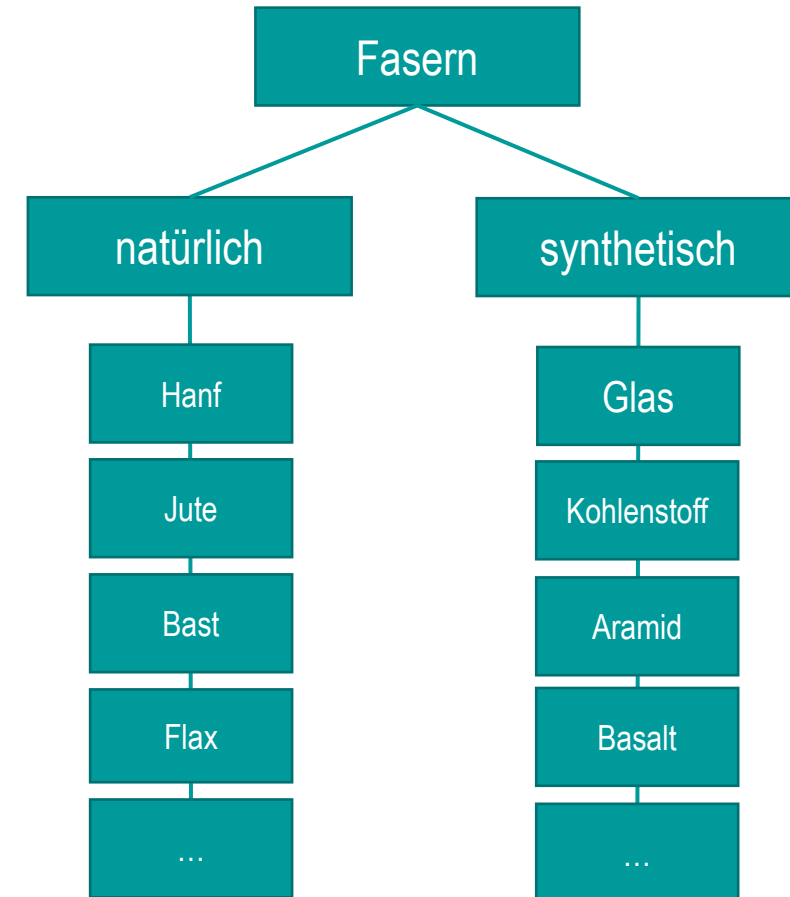
Erhöhung der Bauteilsteifigkeit, Biege- und Zugfestigkeit; abhängig von der Faserorientierung und Lage

Materialien:

- natürliche:
 - Hanf, Flax, ...
- synthetische:
 - Glas, Kohlefaser, ...

Klassifizierung nach Form und Länge:

- kontinuierliche Faserverstärkung
 - Endlosfasern
- diskontinuierliche Faserverstärkung
 - Nanofasern / Partikel
 - Kurzfasern (0,05 mm – 1 mm) [Domm]
 - Langfasern (> 1 mm) [Domm]



Faserverstärkung von Thermoplasten

Anwendungsfelder:

- primär Strukturleichtbau durch Optimierung der Materialeigenschaften
- Spritzguss
 - teilweise randomisierte Anordnung der Fasern -> isotrope mechanische Eigenschaften
- Additive Fertigung
 - Überlagerung mit mechanischer Anisotropie durch schichtweisen Aufbau + häufig Orientierung der Fasern in Strangablagerichtung
 - Anisotropie der mechanischen Eigenschaften
 - Einfluss auf CTE und somit Einfluss auf Bauteilverzug/Warping möglich
 - Filament-MEX in Kombination mit Kurzfasern oder Endlosfasern bereits kommerziell erhältlich und etabliert -> Fa. *Markforged*

Robotersystem

- inverse Kinematik
- 6-Achs-Knickarm Roboter
- 1: 500 x 500 mm² beheizte Bauplattform
- 2: Granulatextruder

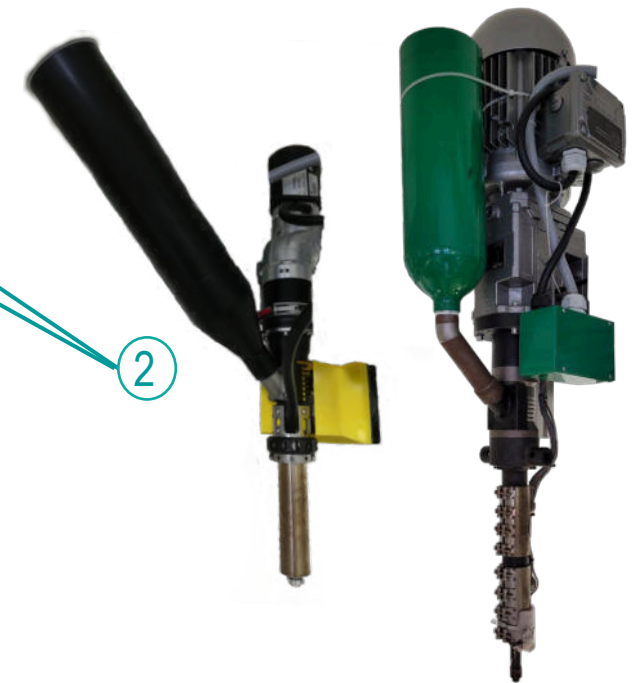
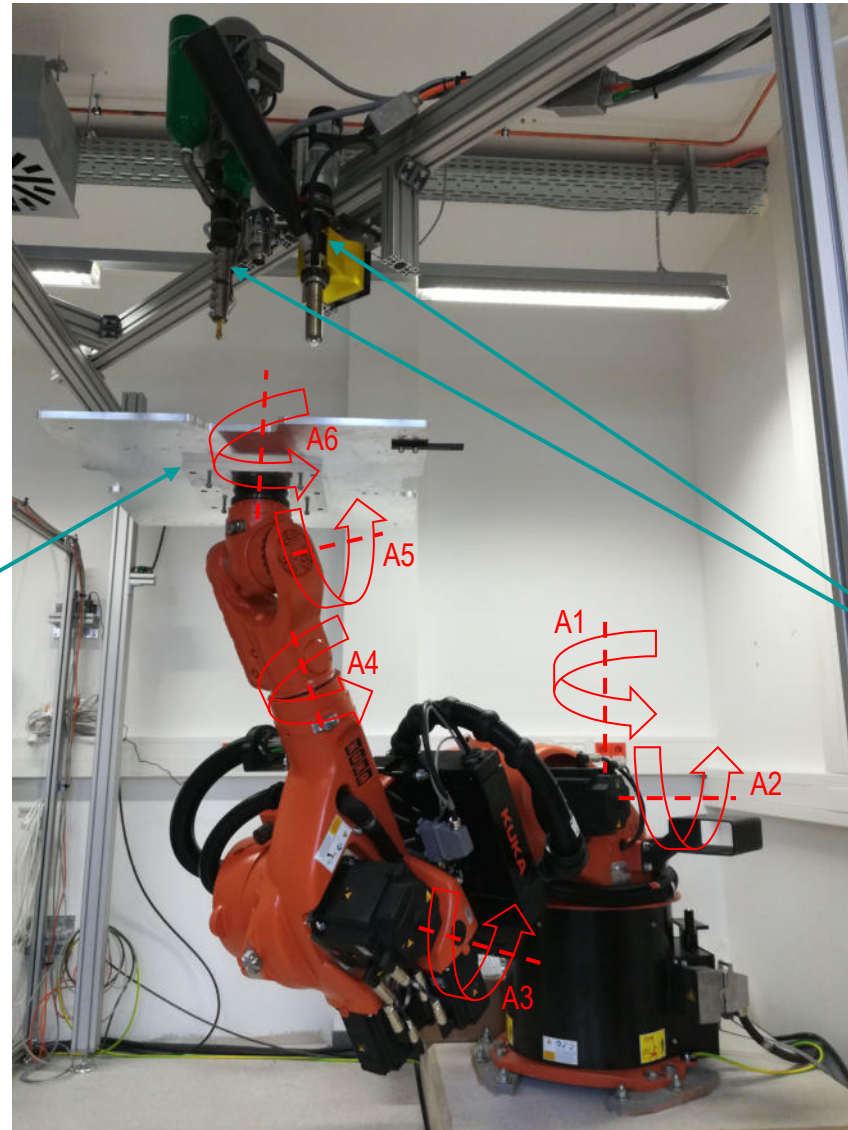
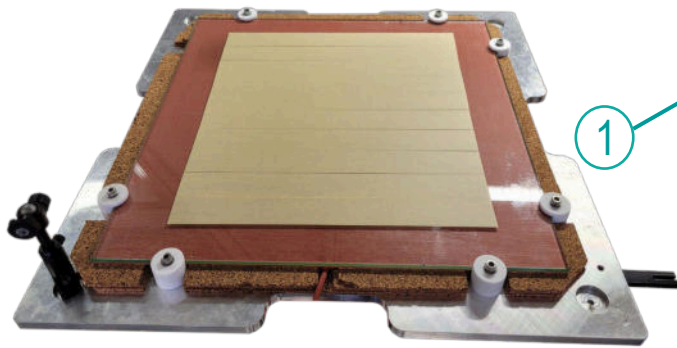


Abb. 3: Anlagenaufbau mit Roboter und Extrudern

<i>Hoffmann & Voss "Dyblend® R"</i>	<i>Sabic "Cycloy™ RESIN C4220"</i>
Zusammensetzung	
Blend aus Polycarbonat und Acrylnitril Butadienstyrol PC-ABS	Blend aus Polycarbonat und Acrylnitril Butadienstyrol PC-ABS-GF mit 20 wt.% Glas-Kurzfasern
Dichte	
1,15 g · cm ⁻³	1,3 · cm ⁻³
MVR (260 °C / 5 kg)	
22,5 cm ³ · 10 min ⁻¹	12 cm ³ · 10 min ⁻¹



Abb. 4: PC-ABS Feedstock



Abb. 5: PC-ABS-GF Feedstock

Strangmodell

- Beschreibung der Stranggeometrie in Abhängigkeit der Prozessparameter
- Anpassung der Parameter Austragsrate, Vorschubgeschwindigkeit und Düsenabstand für gewünschten Strangquerschnitt
- theoretisches Modell nach Schmidt et al.:
- es gilt jedoch nicht immer $z = h$

$$v_f = \frac{M}{\frac{\pi}{4} \cdot h^2 + h \cdot (w - h)}$$

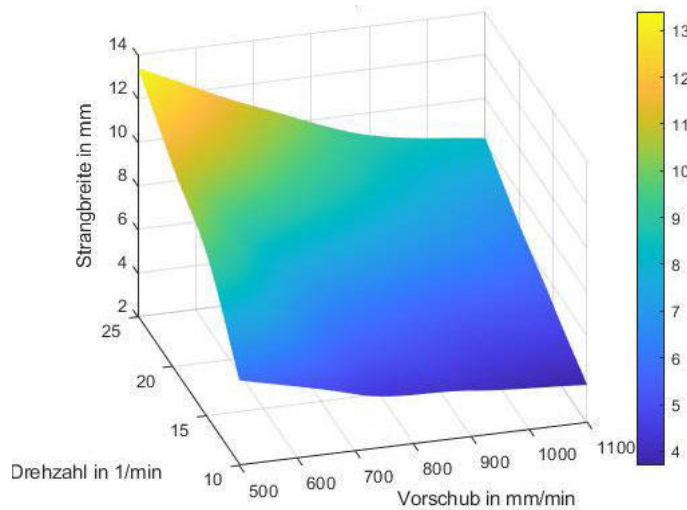


Abb. 6: exemplarisches Strangmodell für PC-ABS, $z = 2,0$ mm

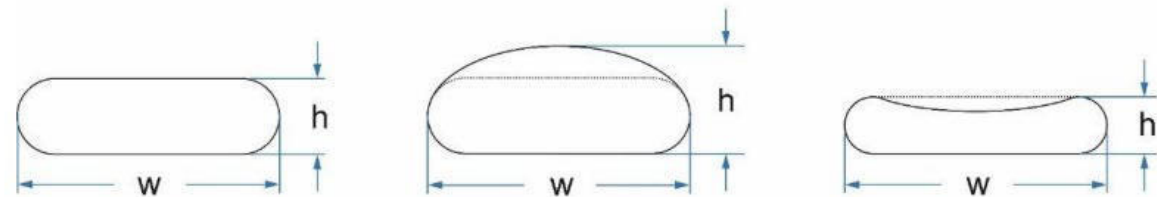


Abb. 7: Einfluss des Düsenabstandes auf den Strangquerschnitt [Layher et al.]

Strangmodell

- Beschreibung der Stranggeometrie in Abhängigkeit der Prozessparameter
- Anpassung der Parameter Extrusionsrate, Vorschubgeschwindigkeit und Düsenabstand für gewünschten Strangquerschnitt
- Korrektur der auftretenden Abweichungen in der Stranghöhe nach Layher et al.:

$$z = a + \frac{b}{v_f} + c \cdot \ln h + \frac{d}{v_f^2} + f \cdot \ln h^2 + g \cdot \frac{\ln h}{v_f}, M = \text{const.}$$

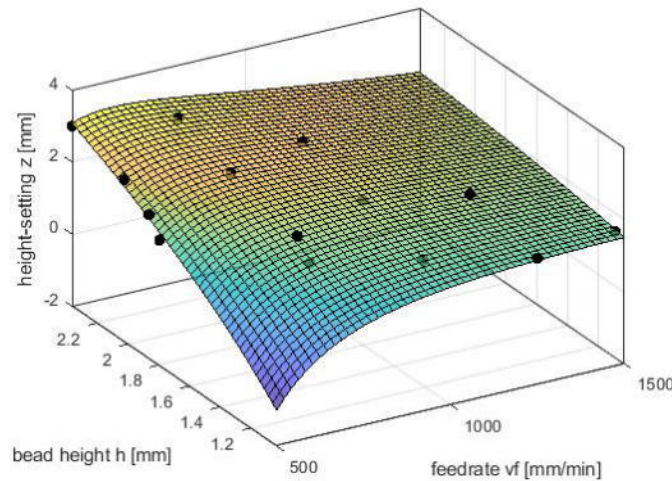


Abb. 8: Modell nach Layher et al. für PC-ABS

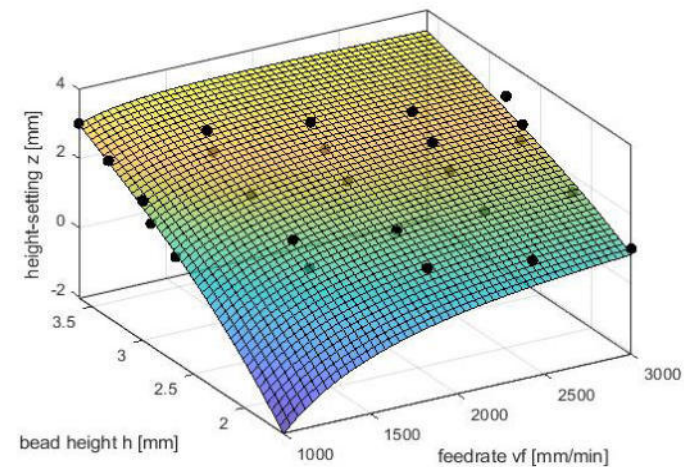


Abb. 9: Modell nach Layher et al. für PC-ABS-GF

Faserorientierung

- Kurzfasern sind überwiegend entlang der Vorschubrichtung orientiert

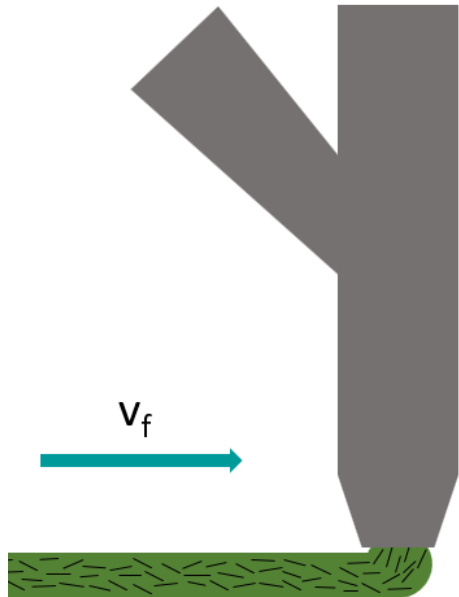


Abb. 10: schematische Strangablage

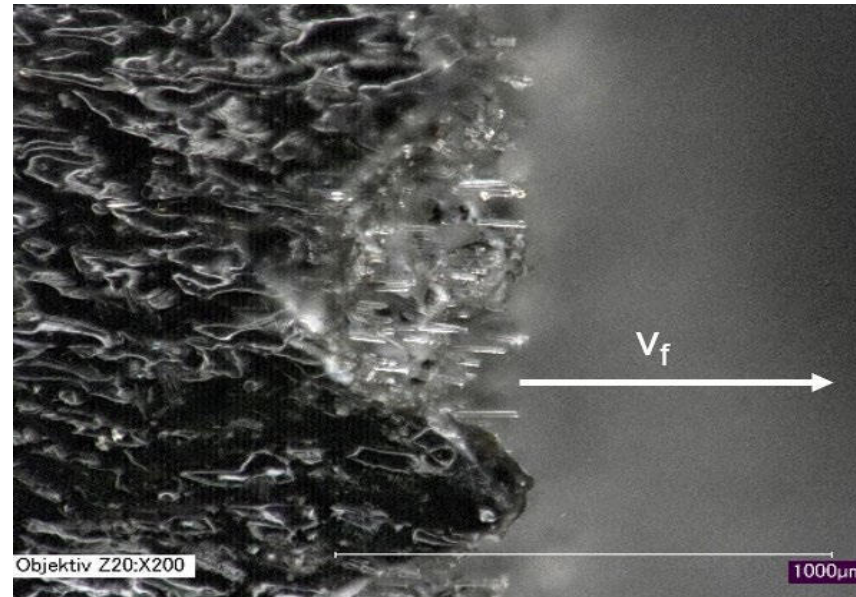


Abb. 11: Aufnahme der Faserorientierung; Digitalmikroskop

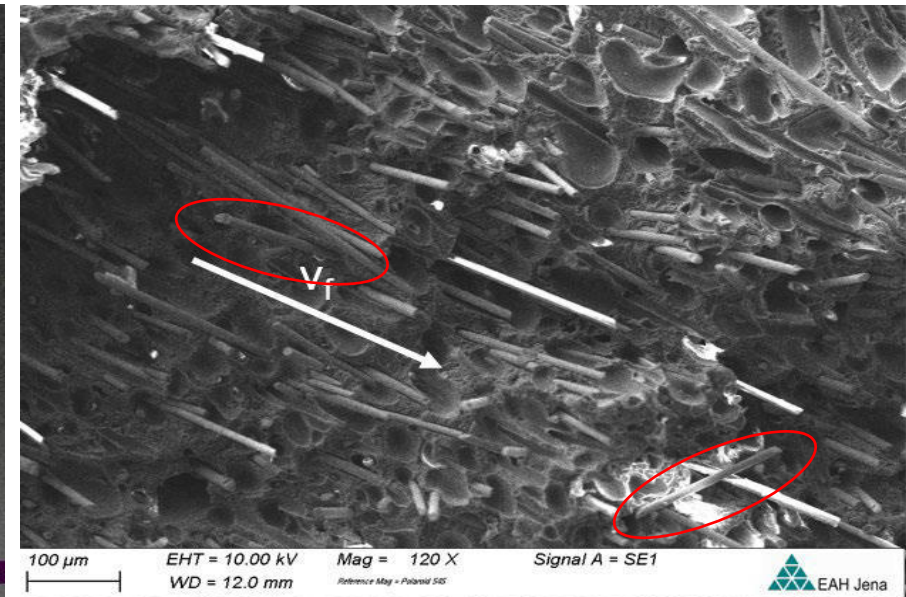


Abb. 12: Aufnahme der Faserorientierung; REM

Einfluss auf den Bauteilverzug / Warping

- Untersuchungen an 300 mm langen Bauteilen mit mäanderförmiger Füllstruktur in Längsrichtung
- Bauplattformtemperatur 90 °C
- *Magigoo*-Kleber
- deutlicher Einfluss der Kurzfasern auf das Warpingverhalten in Vorschub-/Faserorientierungsrichtung



Abb. 13: Probekörper; oben: PC-ABS; unten: PC-ABS-GF

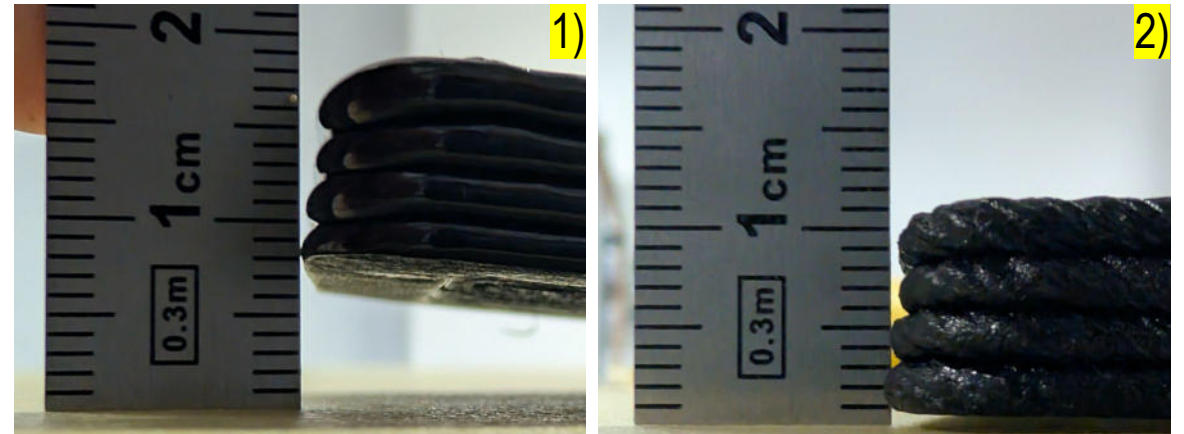


Abb. 14: Bauteilverzug nach vollständiger Abkühlung; 1): PC-ABS; 2): PC-ABS-GF

mechanische Untersuchungen: Spritzguss

- Zugversuche (nach DIN EN ISO 527-2, Fall 1A) und 4-Punkt-Biegeversuche (nach DIN EN ISO 178)



Abb. 15: spritzgegossene Zugprobe aus PC-ABS-GF

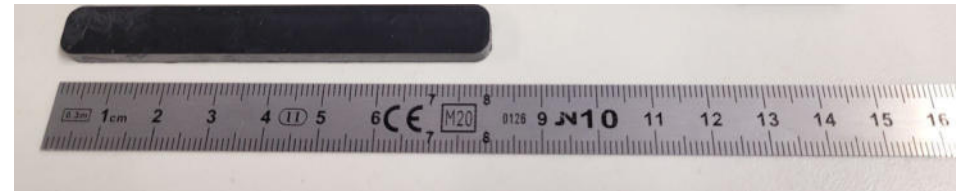


Abb. 16: spritzgegossene Biegeprobe aus PC-ABS-GF

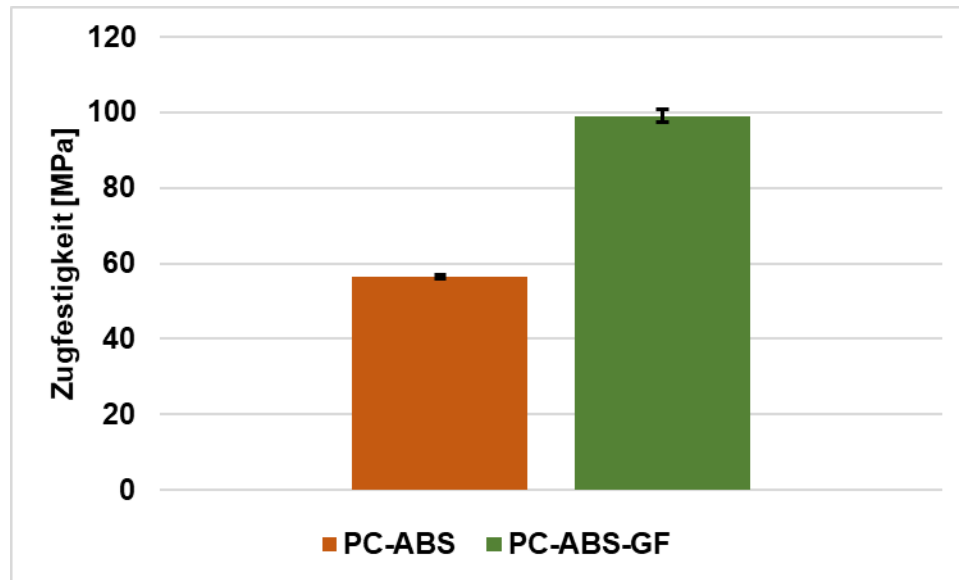


Abb. 17: Zugfestigkeit spritzgegener Proben

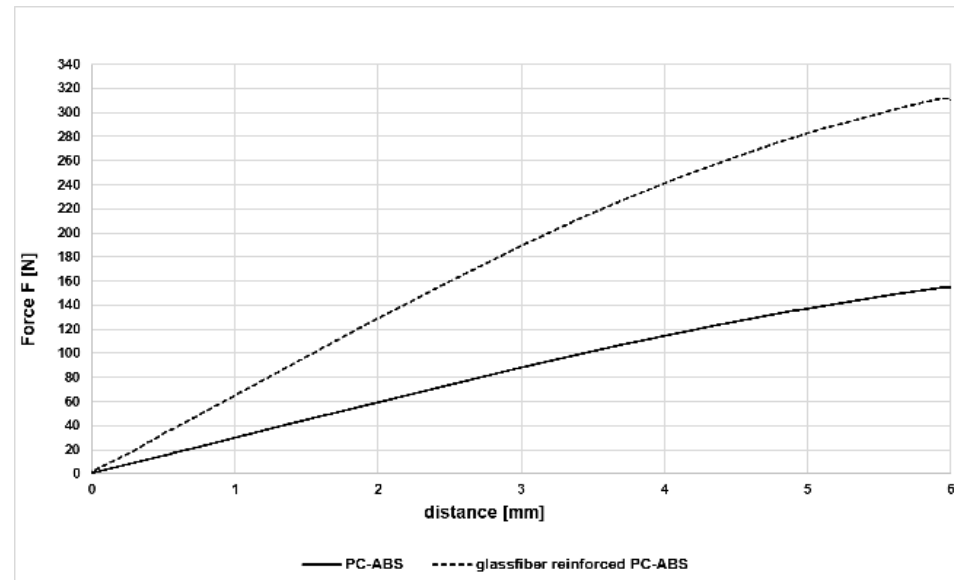


Abb. 18: exemplarischer Kraft-/Dehnungsverlauf für spritzgeossene Biegeproben

mechanische Untersuchungen: additive Fertigung

- 4-Punkt-Biegeversuche in verschiedenen Orientierungen
- nach DIN EN ISO 178; Probengröße 80 x 10 x 4 mm³
- Bestimmung der Bruchfläche für jede einzelne Probe (Graustufenanalyse)
- $\sigma = \frac{F \cdot L}{b \cdot a^2}$

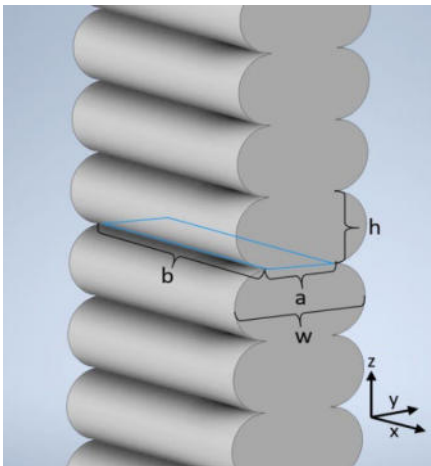


Abb. 19: Bindungsfläche, schematisch

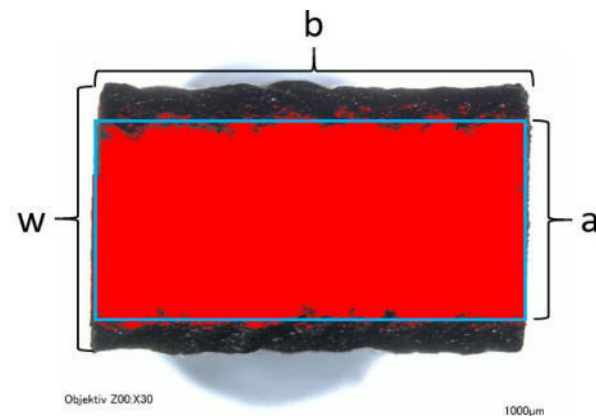


Abb. 20: Bruchfläche

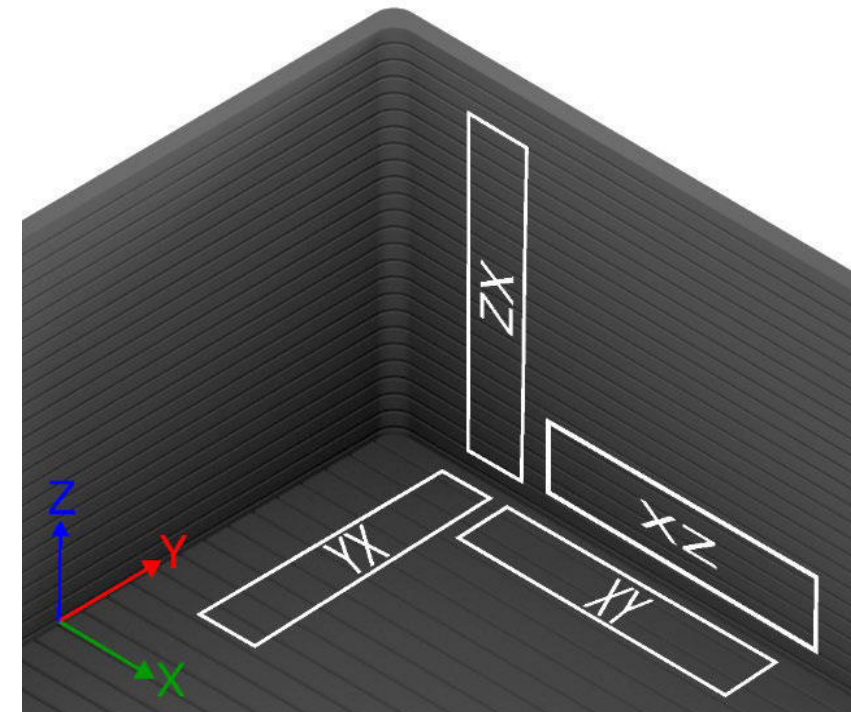


Abb. 21: Probenorientierungen

mechanische Untersuchungen: additive Fertigung

- 4-Punkt-Biegeversuche in verschiedenen Orientierungen
- Überlagerung der anisotropen mechanischen Eigenschaften aus dem Schmelzsichten und aus der Faserorientierung
- innerhalb eines Stranges Stoffschluss, zwischen den Strängen Bindungsflächen

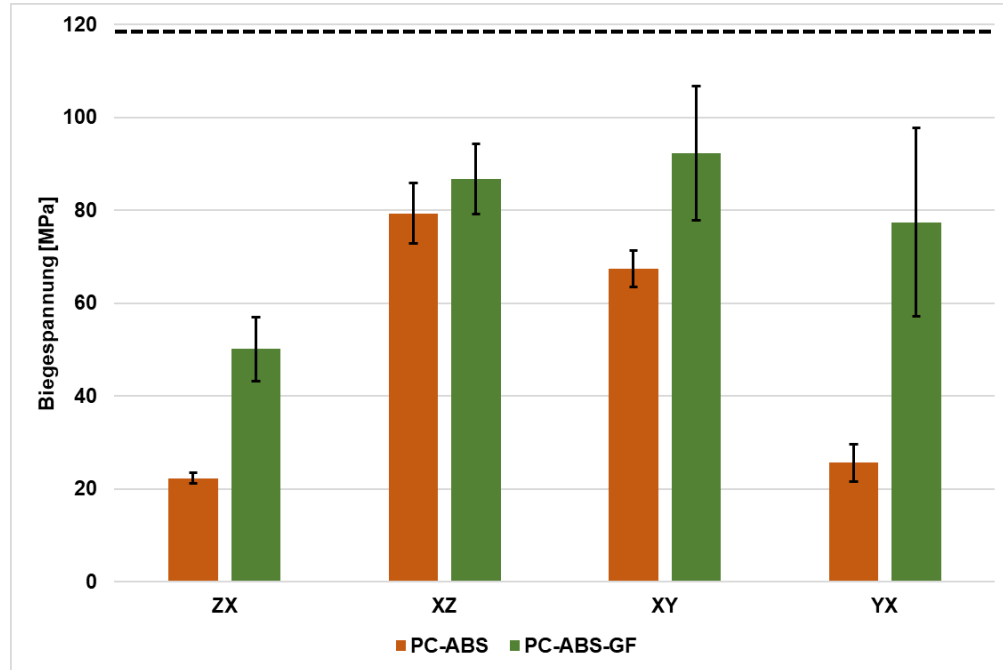


Abb. 22: Biegefestigkeiten für additiv gefertigte Strukturen in verschiedenen Orientierungen

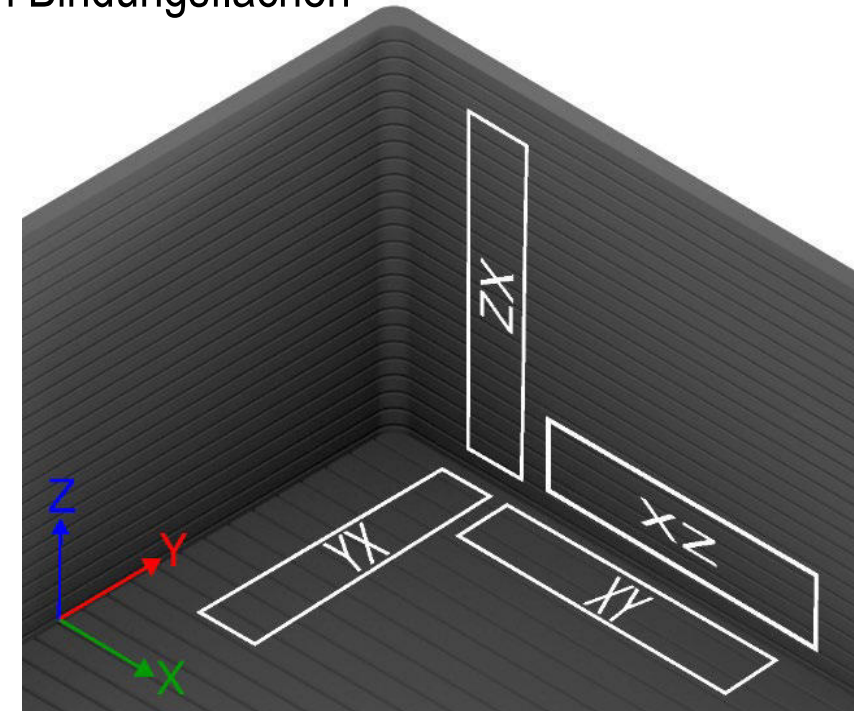


Abb. 21: Probenorientierungen

subtraktive Bearbeitung

Ausgangszustand PC-ABS-GF ($h_s = 3 \text{ mm}$)

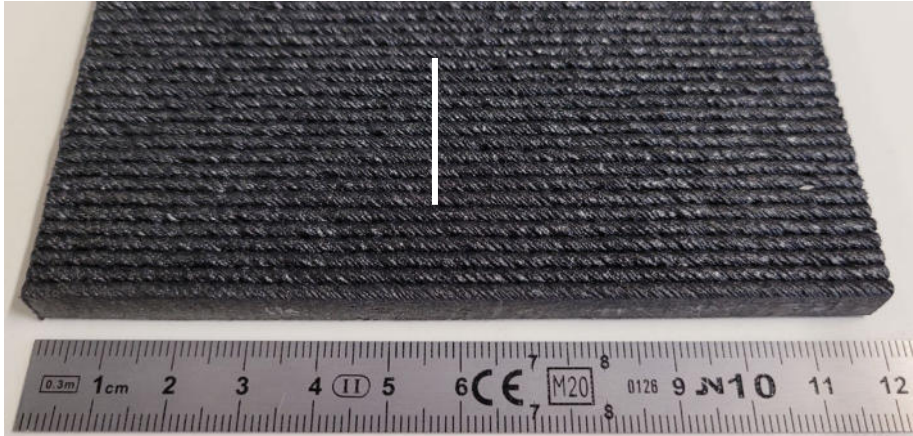


Abb. 23: PC-ABS-GF Probe für WLI-Aufnahme

x	
1:	2.96 mm
2:	4.60 mm
Δ :	1.64 mm
z	
1:	0.3597 mm
2:	-0.6578 mm
Δ :	-1.0175 mm

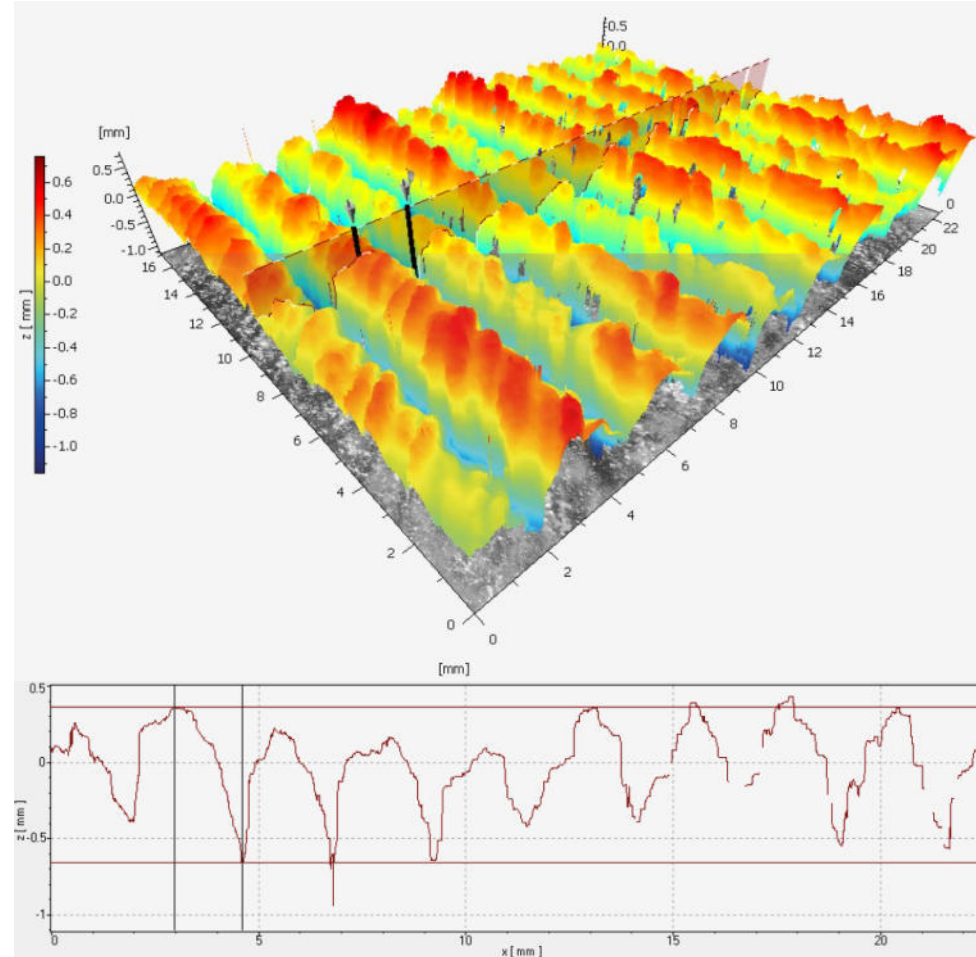


Abb. 24: WLI-Aufnahme; Schichtstruktur nach additivem Formgebungsprozess

subtraktive Bearbeitung

- Werkzeug: Schafffräser HSS Ø10

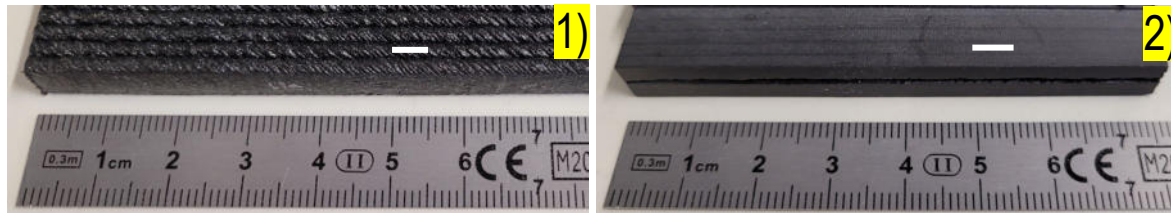


Abb. 25: PC-ABS-GF Proben für die WLI-Aufnahmen; 1): unbearbeitet; 2): gefräst

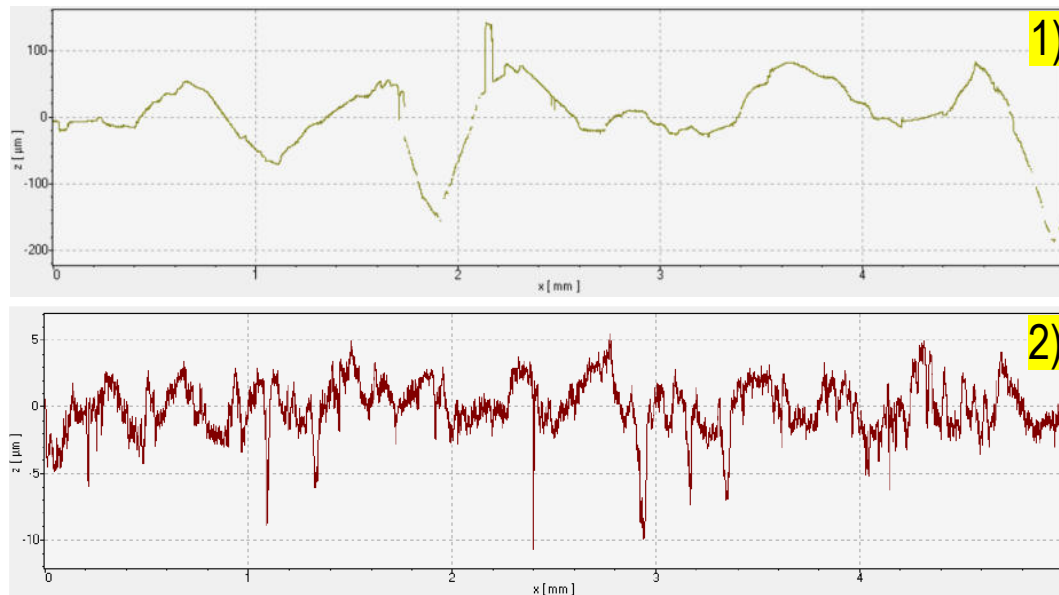


Abb. 26: WLI-Aufnahmen; 1): Rohprofil entlang eines Stranges aus PC-ABS-GF; 2): Rohprofil einer gefrästen Probe

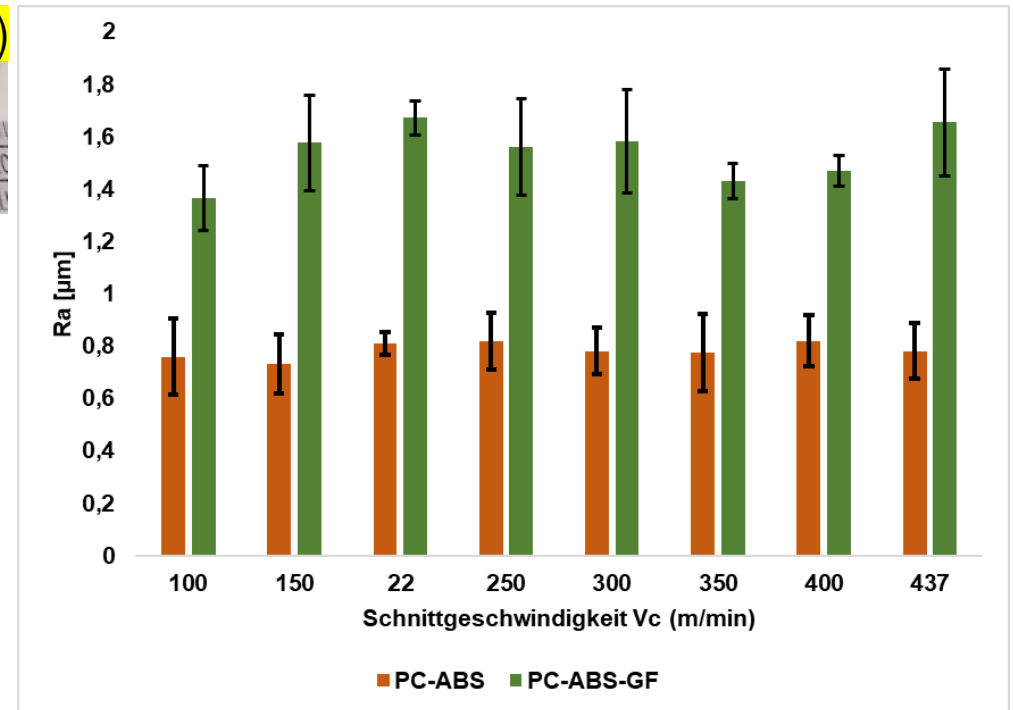


Abb. 27: taktile Rauheitsmessung; erreichbare Ra-Werte in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit v_c

Anwendungsbeispiel Formenbau

- für Umformwerkzeuge oder für das Laminieren von Fasermatten -> endkonturnahe Fertigung mit Fräsprozess

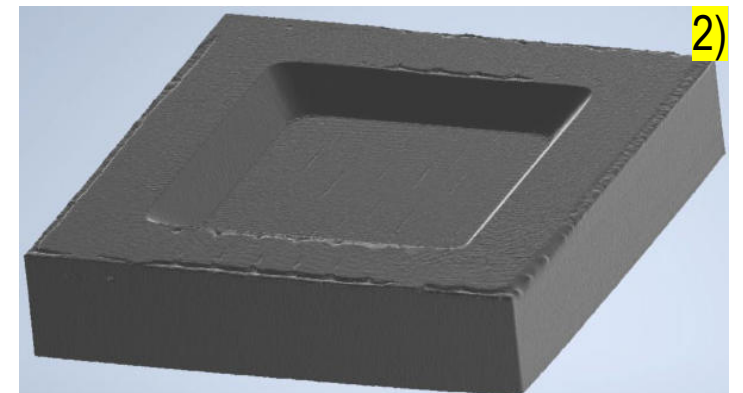
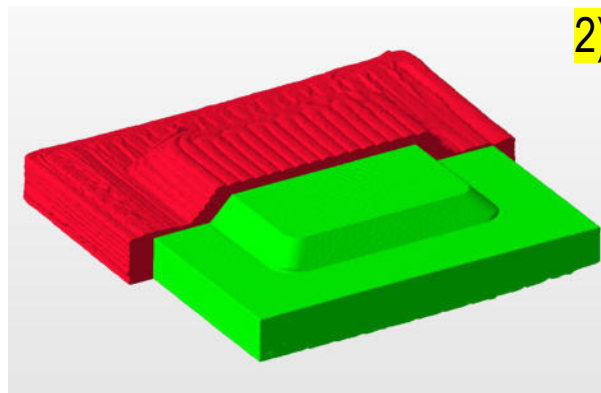
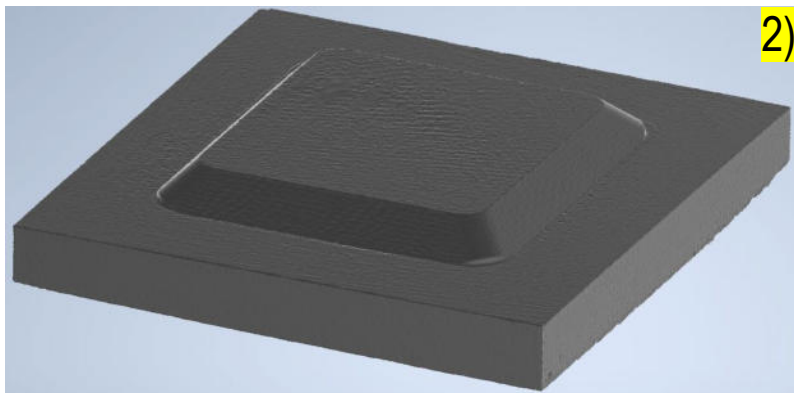
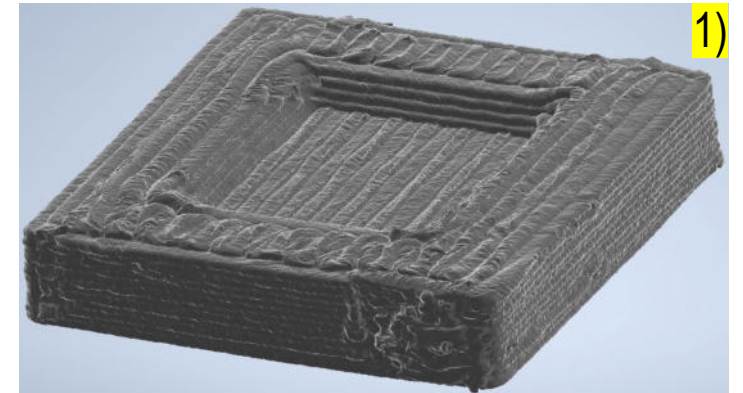
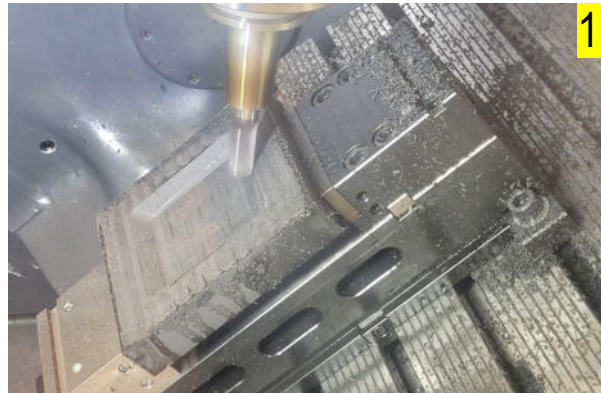
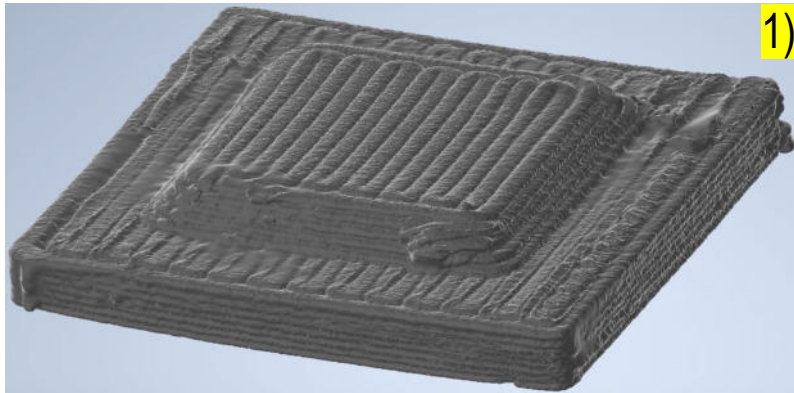


Abb. 28: 3D-Scans; 1): unbearbeiteter Stempel;
2): subtraktiv nachbearbeiteter Stempel

Abb. 29: 1): 5-Achs-Fräsprozess mit
Umfangfräser; 2): Vergleich der 3D-Scans von
Rohteil und bearbeitetem Stempel

Abb. 30: 3D-Scans; 1): unbearbeitete Matrize;
2): subtraktiv nachbearbeitete Matrize

- Funktionsnachweis mit 0,5 mm PET-Folie sowie 0,5 mm Kupfer-Blech
- Prozessmodell auf größere Anlagentechnik skalierbar

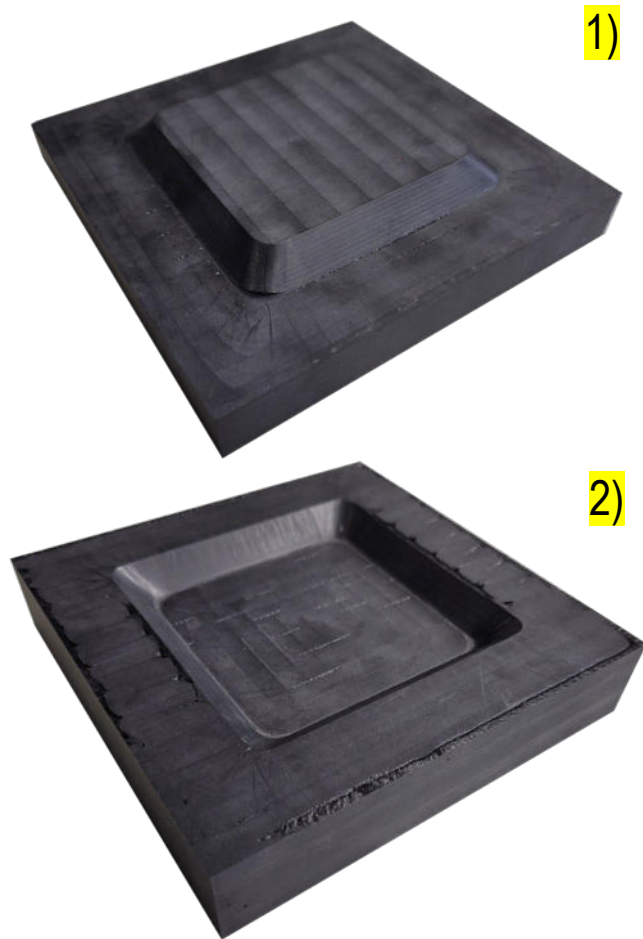


Abb. 31: subtraktiv bearbeitete Bauteile; 1): Stempel; 2): Matrize

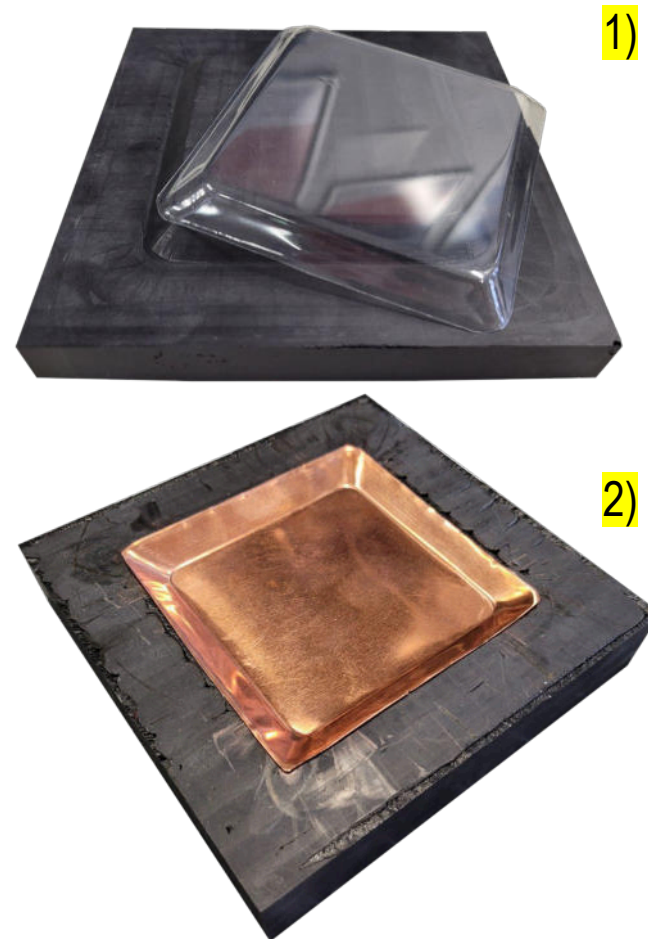


Abb. 32: Demonstratoren; 1): Kunststoff-Formteil;
2): Kupfer-Formteil

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

M.Eng. Toni Wille
toni.wille@eah-jena.de
www.ag-bliedtner.de

Ein herzlicher Dank ergeht weiterhin auch an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Forschungsvorhabens „Hybrid3D“ (Förderkennzeichen KK5091612KT1).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



- **Balla, Vamsi Krishna;** Kate, Kunal H.; Satyavolu, Jagannadh; Singh, Paramjot; Tadimetri, Jogi Ganesh Dattatreya (2019): Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. In: *Composites Part B: Engineering* 174, S. 106956. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106956.
- **Beckman, Ivan Philip;** Lozano, Christine; Freeman, Elton; Riveros, Guillermo (2021): Fiber Selection for Reinforced Additive Manufacturing. In: *Polymers* 13 (14). DOI: 10.3390/polym13142231.
- **Billah, Kazi Md Masum;** Lorenzana, Fernando A.R.; Martinez, Nikki L.; Wicker, Ryan B.; Espalin, David (2020): Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 35, S. 101299. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101299.
- **Depuydt, Delphine;** Balthazar, Michiel; Hendrickx, Kevin; Six, Wim; Ferraris, Eleonora; Desplentere, Frederik et al. (2019): Production and characterization of bamboo and flax fiber reinforced polylactic acid filaments for fused deposition modeling (FDM). In: *Polymer Composites* 40 (5), S. 1951–1963. DOI: 10.1002/pc.24971.
- **DIN EN ISO 178:2017**
- **DIN EN ISO 527-2:2012**
- **DIN EN ISO 52900:2022**
- **Domm, Matthias** (2020): Additive Fertigung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste mittels 3D-Extrusion. Als Manuskript gedruckt. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW-Schriftenreihe, Band 138).
- **Duty, Chad E.;** Kunc, Vlastimil; Compton, Brett; Post, Brian; Erdman, Donald; Smith, Rachel et al. (2017): Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. In: *RPJ* 23 (1), S. 181–189. DOI: 10.1108/RPJ-12-2015-0183.
- **Eyercioglu, Omer;** Tek, Engin; Aladag, Mehmet (2022): Single bead property of short fiber carbon reinforced ABS composites produced with large scale additive manufacturing (LSAM). In: *The International Journal of Materials and Engineering Technology* 5 (2), S. 61–64. Online verfügbar unter <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1567228>.
- **Gonzalez-Gutierrez,** Joamin; Cano, Santiago; Schuschnigg, Stephan; Kukla, Christian; Sapkota, Janak; Holzer, Clemens (2018): Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 11 (5). DOI: 10.3390/ma11050840.
- **Hill, Charles;** Bedsole, Robert; Rowe, Kyle; Duty, Chad; Ajinjeru, Christine; Kunc, Vlastimil; Riha, David (2018): Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials Development and Reinforcement with Advanced Composites.
- **Hu, Chao;** Qin, Qing-Hua (2020): Advances in fused deposition modeling of discontinuous fiber/polymer composites. In: *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 24 (5), S. 100867. DOI: 10.1016/j.cossms.2020.100867.
- **Layher, Michel;** Eckhardt, Lukas; Hopf, Andreas; Bliedtner, Jens (2021b): Development of a Process Model for Bead Deposition Rates and Cooling Behavior of Large Scale Additive Manufacturing Parts. In: Mirko Meboldt und Christoph Klahn (Hg.): *Industrializing Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, S. 223–240.
- **Love, Lonnie J.;** Kunc, Vlastimil; Rios, Orlando; Duty, Chad E.; Elliott, Amelia M.; Post, Brian K. et al. (2014): The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. In: *J. Mater. Res.* 29 (17), S. 1893–1898. DOI: 10.1557/jmr.2014.212.
- **Rajak, Dipen Kumar;** Pagar, Durgesh D.; Menezes, Pradeep L.; Linul, Emanoil (2019): Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. In: *Polymers* 11 (10). DOI: 10.3390/polym11101667.
- **Schmidt, Leander;** Schricker, Klaus; Bergmann, Jean Pierre; Hussenöder, Felix; Eiber, Mathias (2019): Characterization of a granulate-based strand deposition process in the FLM-method for definition of material-dependent process strategies. In: *RPJ* 25 (1), S. 104–116. DOI: 10.1108/RPJ-09-2017-0186.
- **Zindani, Divya;** Kumar, Kaushik (2019): An insight into additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. In: *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 2 (4), S. 267–278. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2019.08.004.

Session 4: Qualitätssicherung im 3D-Druck 1

**Rekonstruktion von Geometrie-Modellen aus
Prozessdaten der Additiven Fertigung**

Thomas Wagner,
Fraunhofer IMWS Halle (Saale)

Rekonstruktion von Geometrie-Modellen aus Prozessdaten der Additiven Fertigung

Thomas Wagner

11. Mitteldeutsches Forum | 3D Druck in der Anwendung

16.10.2024

Merseburg

Gliederung

1. Motivation
2. Untersuchung der Prozessparameter
3. Software GCode2STL
4. Auswertung
5. Fazit

Motivation

STL-Datei

- aus Konstruktion entstanden
- zeigt die Hülle des Körpers

GCode

- aus STL-Datei erzeugt (slicen)
- lesbar für 3D-Drucker
- beinhaltet Stützstruktur und Infill des Körpers

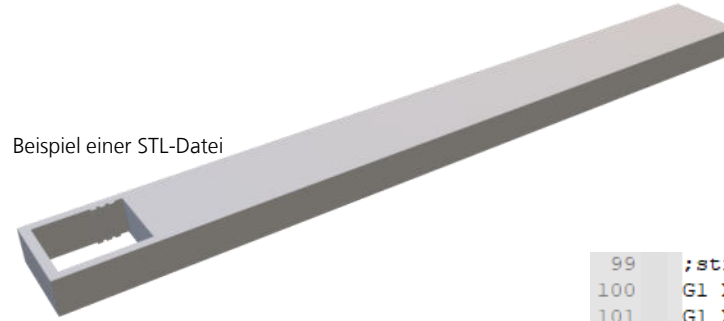
STL-Datei

- zeigt den Körper mit Stützstrukturen und Infill
- verwendbar als Vorschau und zu Simulationszwecken

STL-Datei

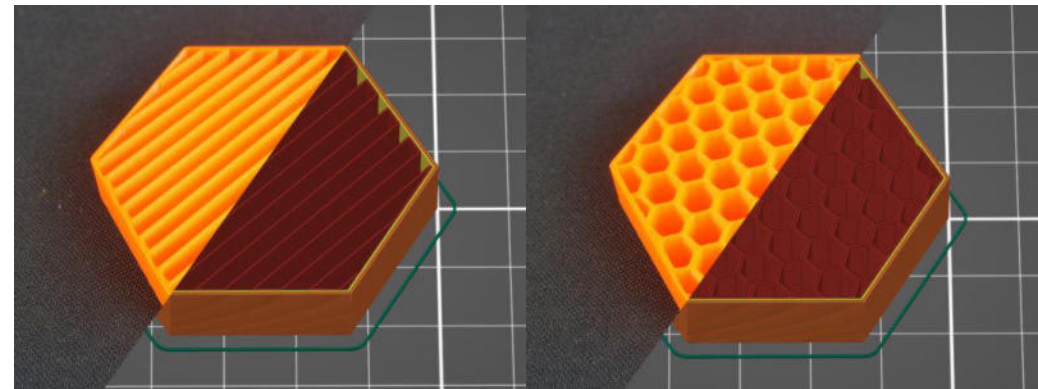
- zeigt den Körper mit Stützstrukturen und Infill
- verwendbar als Vorschau und zu Simulationszwecken

Beispiel einer STL-Datei



```
99 ;structure:infill-solid
100 G1 X39.64 Y-4.50 F4200
101 G1 X49.33 Y-4.50 E37.9644 F1200
102 G1 X49.47 Y-4.47 E37.9714
103 G1 X49.50 Y-4.33 E37.9784
104 G1 X49.50 Y4.33 E38.4023
105 G1 X49.47 Y4.47 E38.4093
106 G1 X49.33 Y4.50 E38.4163
107 G1 X39.64 Y4.50 E38.8906
108 G1 E37.5906 F1800
109 G1 X38.68 Y-4.06 F4200
110 G1 E38.8906 F1800
111 G1 X38.68 Y-4.06 F4200
112 G1 X39.06 Y-3.68 E38.9169 F1200
113 G1 X39.06 Y-3.11 E38.9448
114 G1 X38.11 Y-4.06 E39.0105
115 G1 X37.54 Y-4.06 E39.0384
```

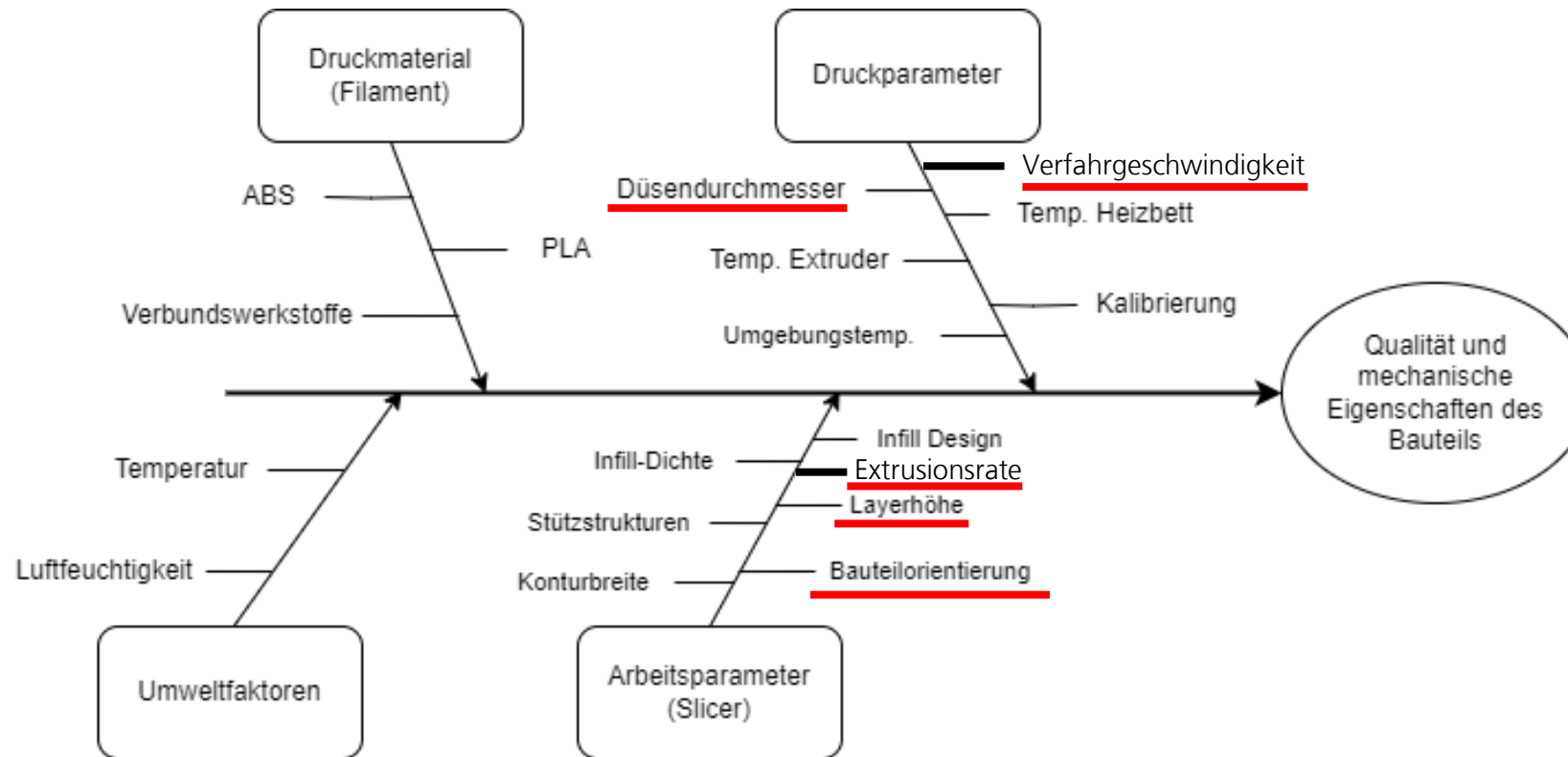
Auszug eines GCodes



Beispiele für Infills (https://blog.prusa3d.com/de/alles-was-sie-ueber-infills-wissen-muessen_43579/)

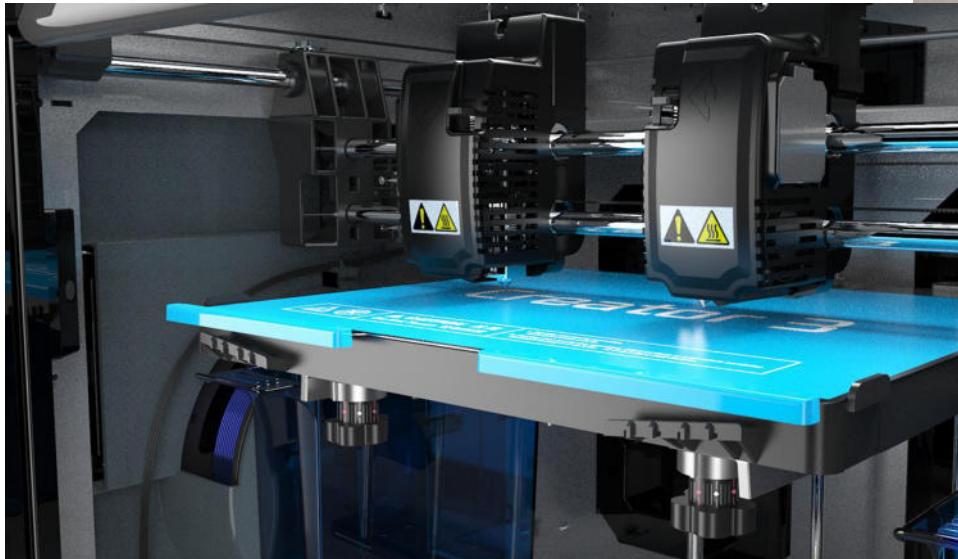
Untersuchung der Prozessparameter

Auswahl der Parameter

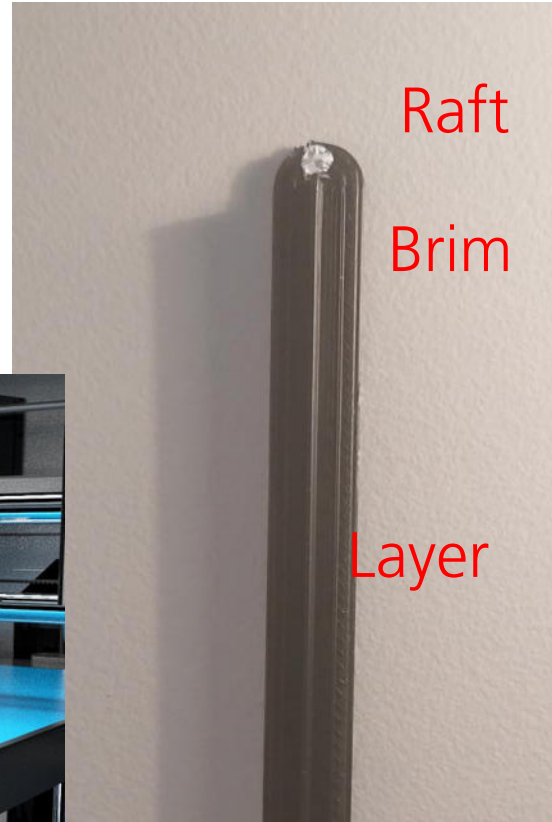


<https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-014-0097-7>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517303143>

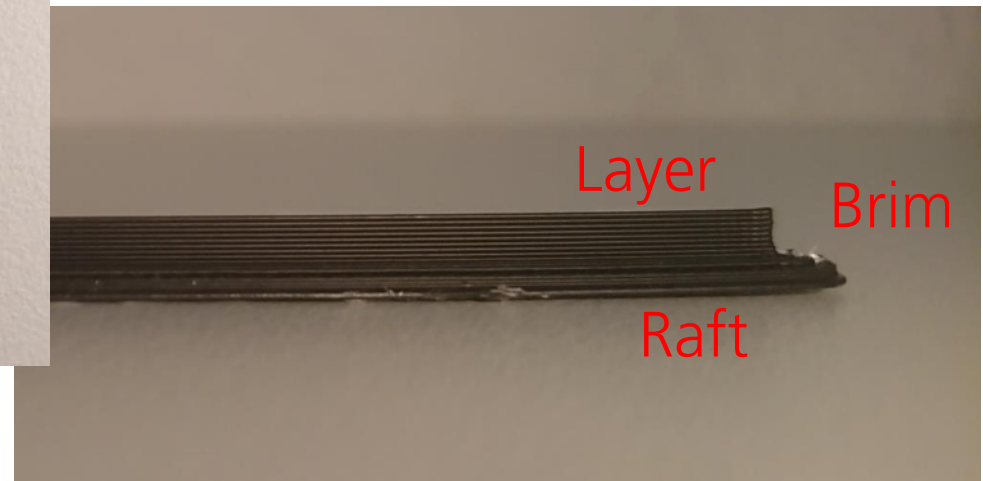
Referenzmodelle



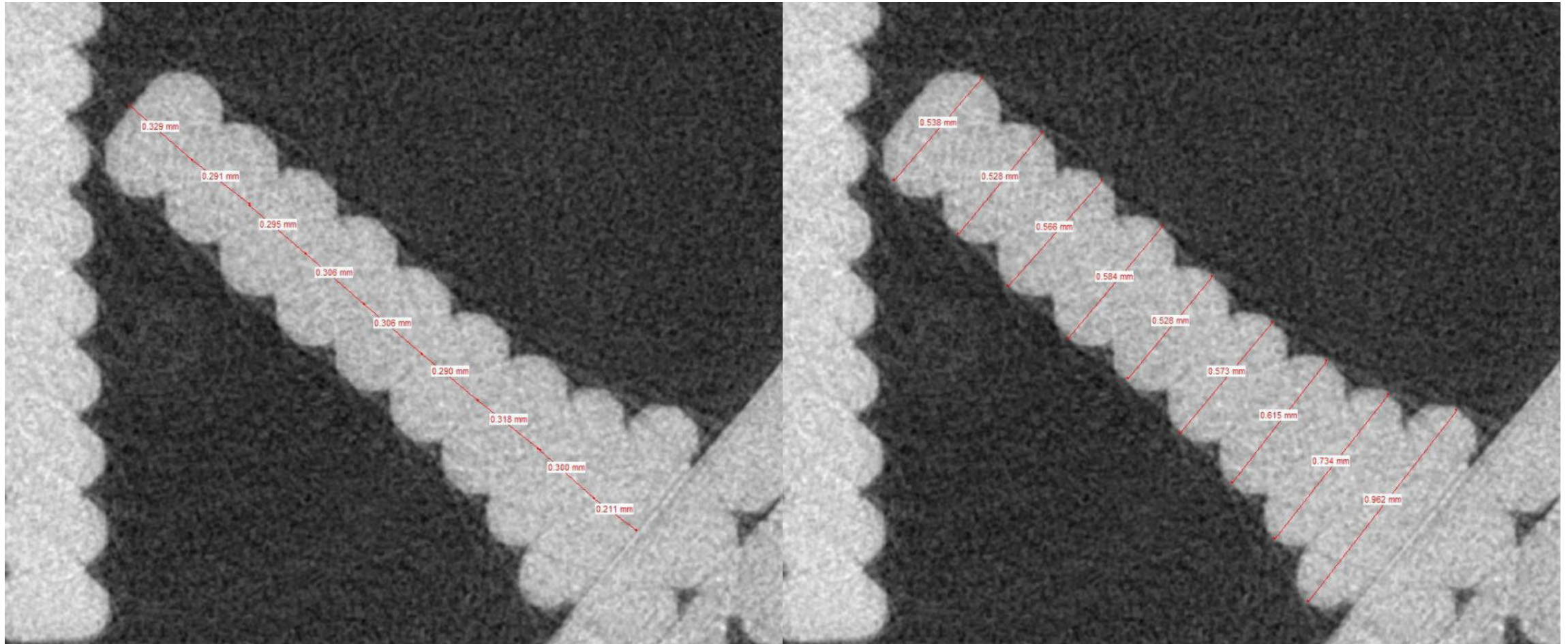
https://flashforge-germany.de/de/product_info.php?info=p446_flashforge-creator-3.html



schwarzes PLA (von Protopasta)

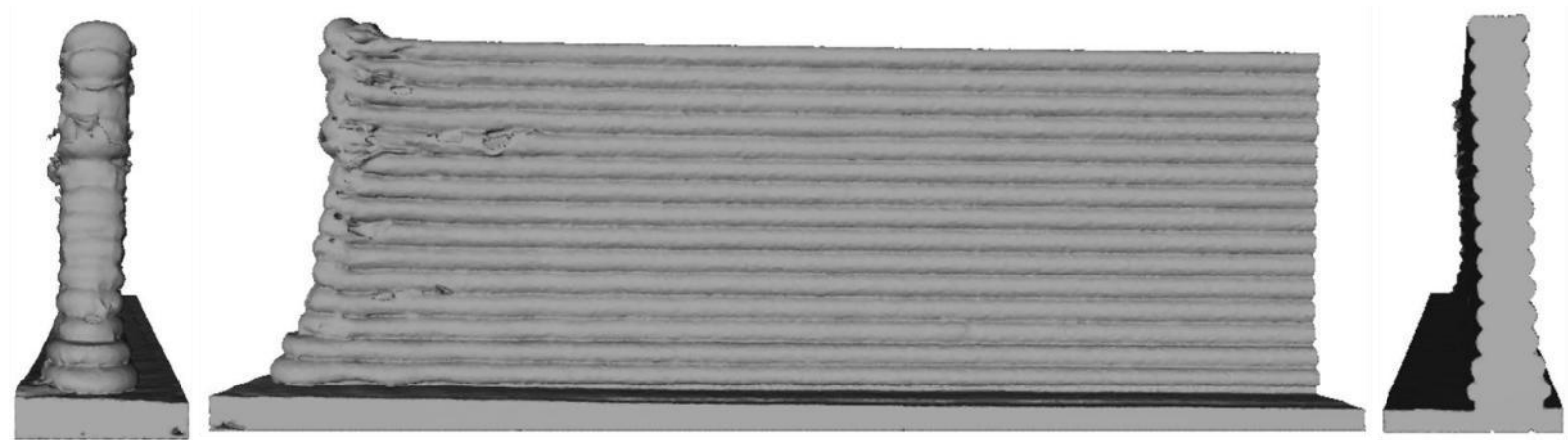


Messmethodik

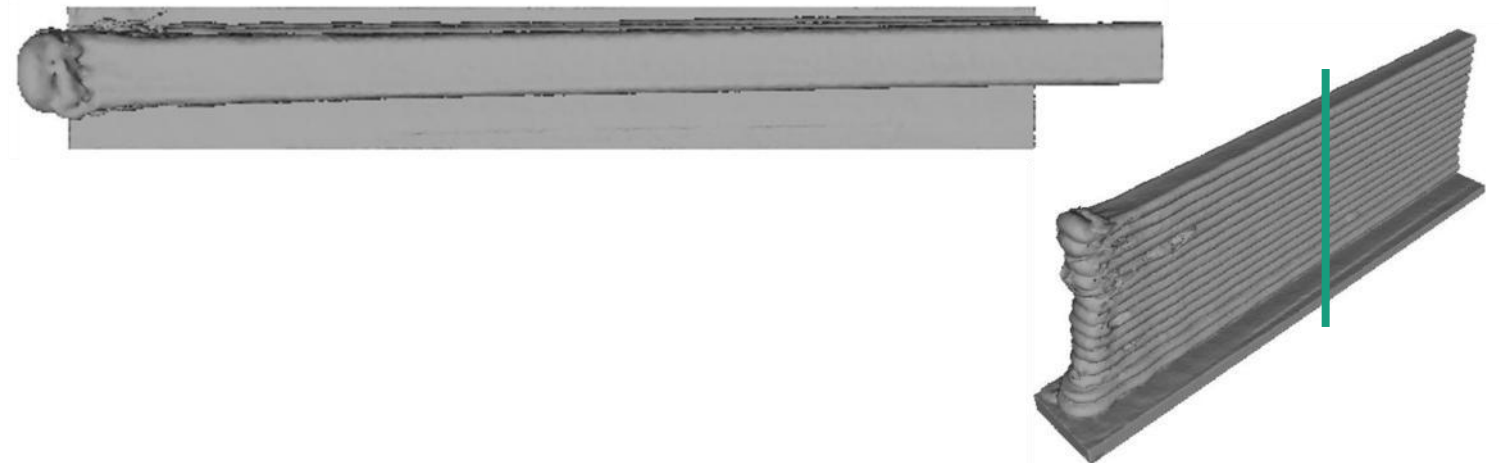


Ergebnisse

Proben I, II, III - Referenz

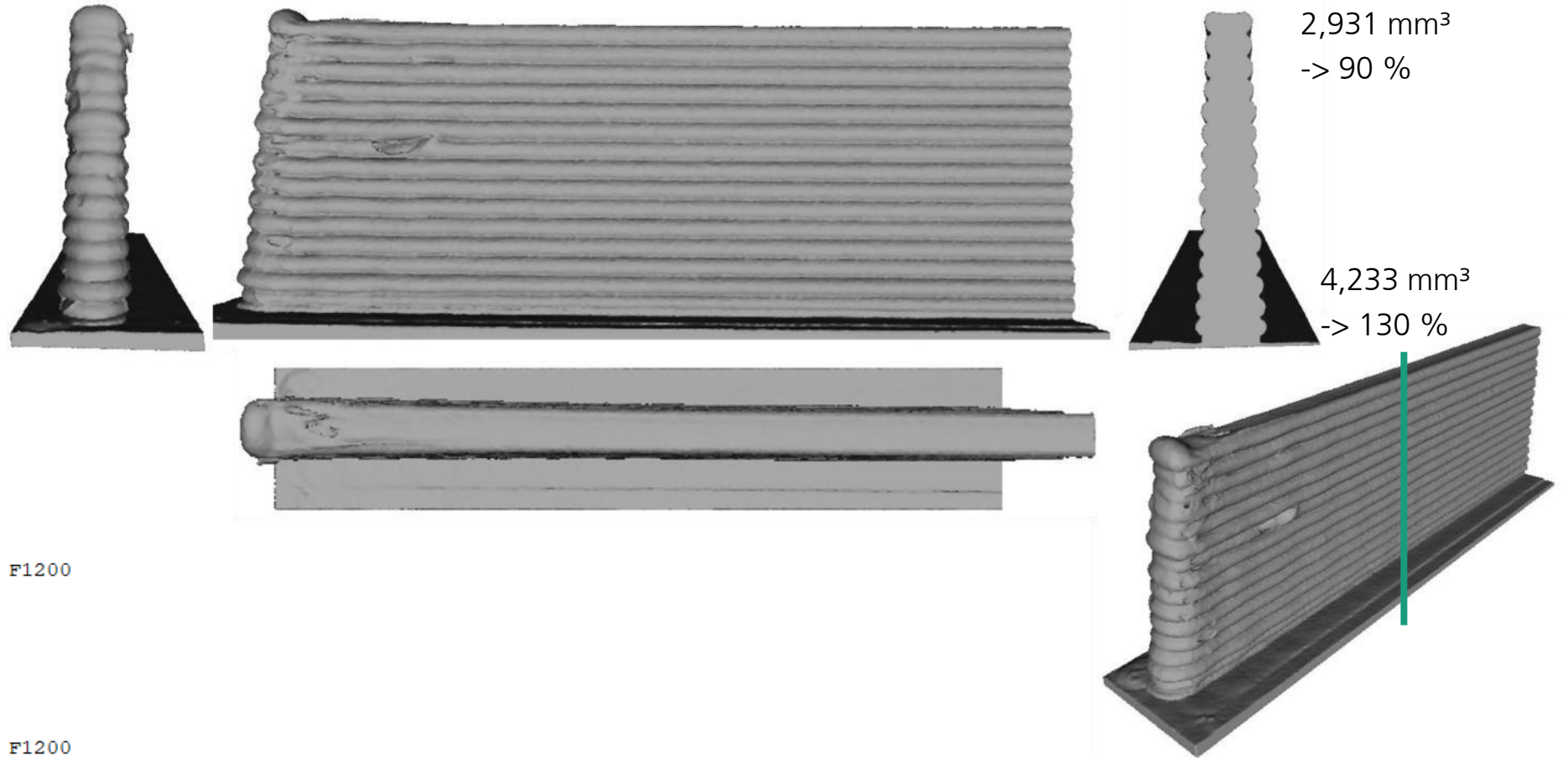


```
1297 ;layer:0.18
1298 G1 E396.0234 F1800
1299 G1 X.20 Y.10 F4200
1300 G1 Z2.440 F420
1301 G1 E398.0234 F1800
1302 G1 X.20 Y.10 F4200
1303 G1 X.20 Y99.90 E401.2797 F1200
1304 ;layer:0.18
1305 G1 E399.2797 F1800
1306 G1 X.20 Y.10 F4200
1307 G1 Z2.620 F420
1308 G1 E401.2797 F1800
1309 G1 X.20 Y.10 F4200
1310 G1 X.20 Y99.90 E404.5360 F1200
```



Ergebnisse

Probe V - Extrusionsrate

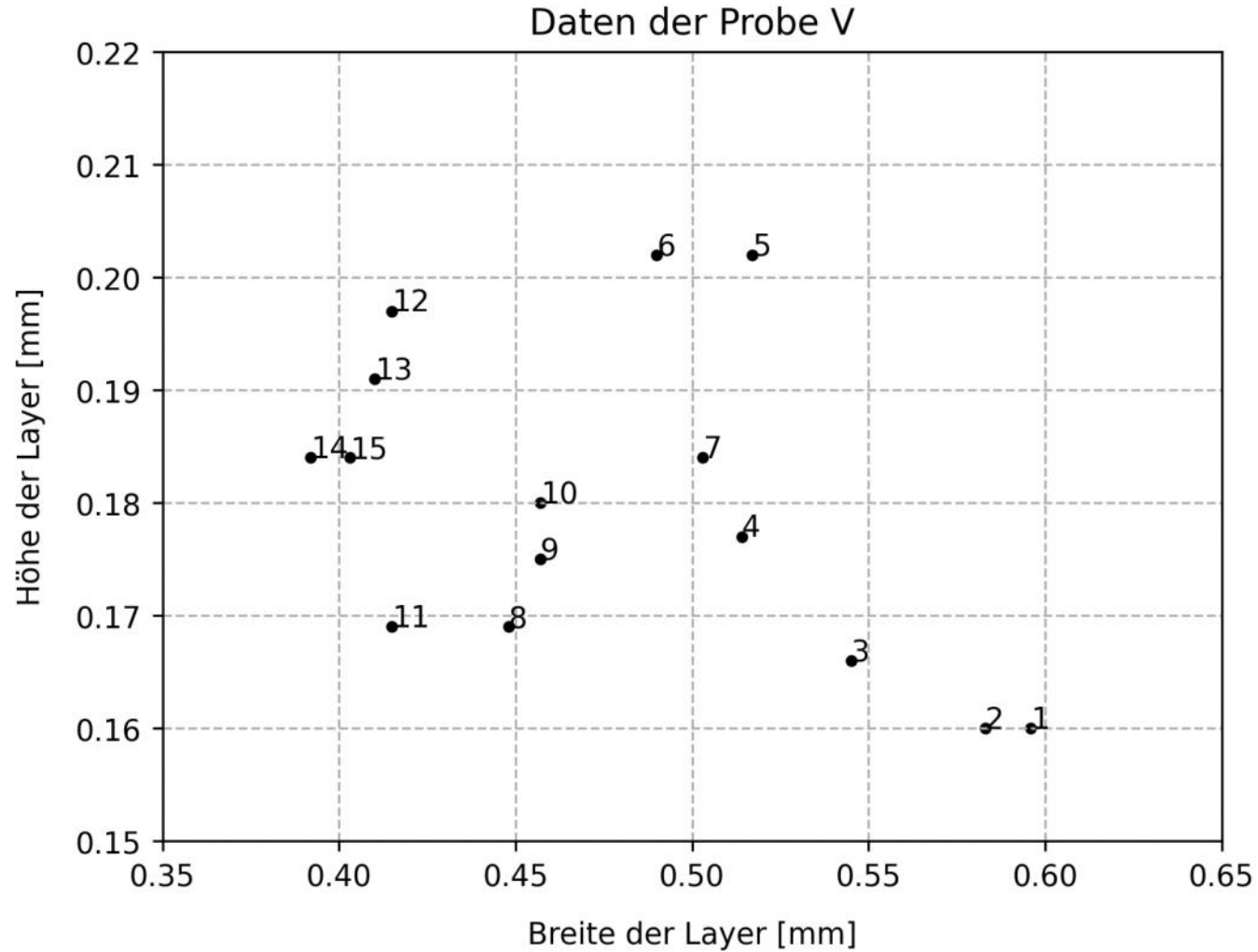


```
1297 ;layer:0.18
1298 G1 E396.0234 F1800
1299 G1 X.20 Y.10 F4200
1300 G1 Z2.440 F420
1301 G1 E398.0234 F1800
1302 G1 X.20 Y.10 F4200
1303 G1 X.20 Y99.90 E401.2797 F1200
1304 ;layer:0.18
1305 G1 E399.2797 F1800
1306 G1 X.20 Y.10 F4200
1307 G1 Z2.620 F420
1308 G1 E401.2797 F1800
1309 G1 X.20 Y.10 F4200
1310 G1 X.20 Y99.90 E404.5360 F1200
```

Ergebnisse

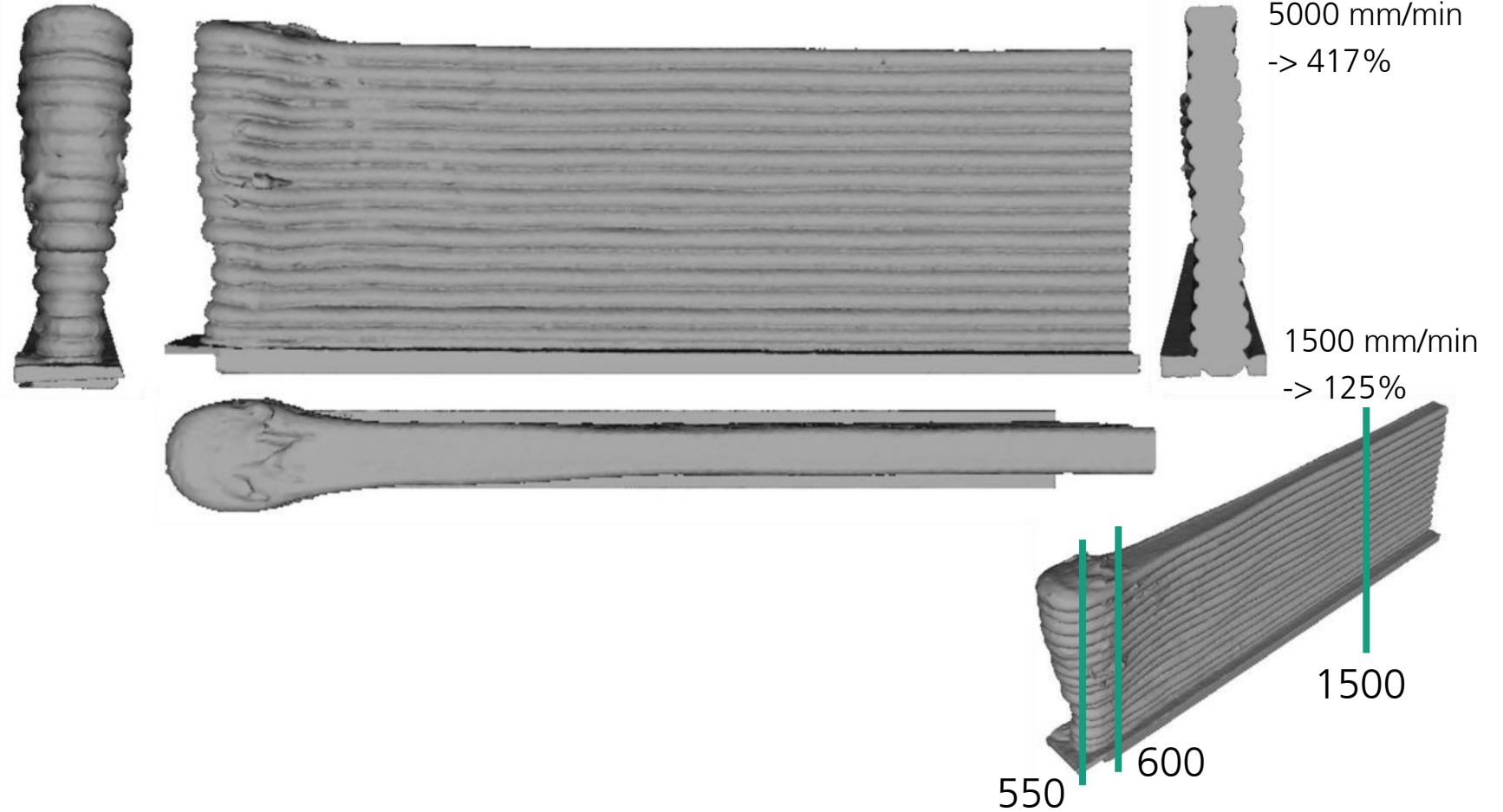
Probe V - Extrusionsrate

```
1297 ;layer:0.18
1298 G1 E396.0234 F1800
1299 G1 X.20 Y.10 F4200
1300 G1 Z2.440 F420
1301 G1 E398.0234 F1800
1302 G1 X.20 Y.10 F4200
1303 G1 X.20 Y99.90 E401.2797
1304 ;layer:0.18
1305 G1 E399.2797 F1800
1306 G1 X.20 Y.10 F4200
1307 G1 Z2.620 F420
1308 G1 E401.2797 F1800
1309 G1 X.20 Y.10 F4200
1310 G1 X.20 Y99.90 E404.5360
```



Ergebnisse

Probe IX - Verfahrensgeschwindigkeit

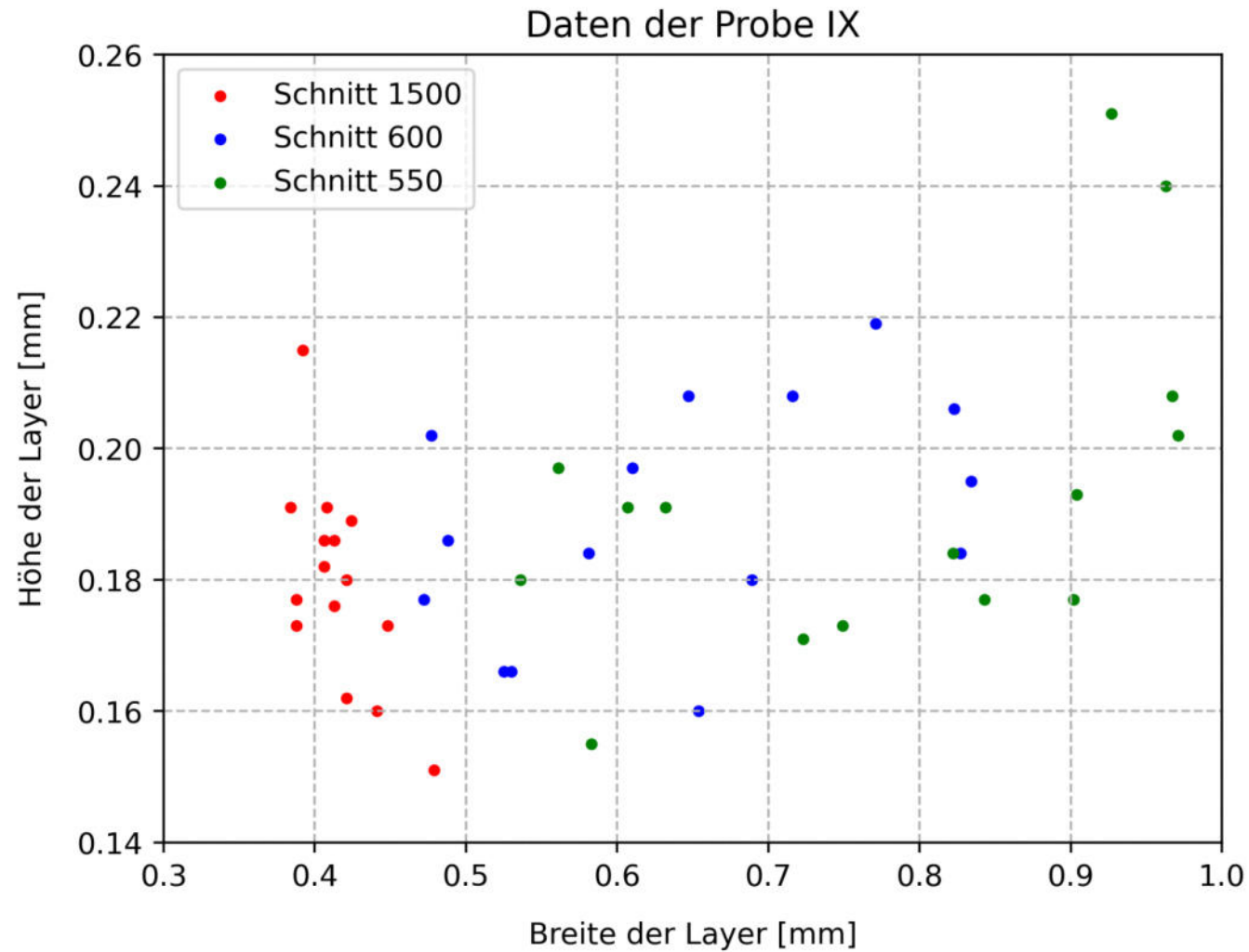


```
1297 ;layer:0.18
1298 G1 E396.0234 F1800
1299 G1 X.20 Y.10 F4200
1300 G1 Z2.440 F420
1301 G1 E398.0234 F1800
1302 G1 X.20 Y.10 F4200
1303 G1 X.20 Y99.90 E401.2797 F1200
1304 ;layer:0.18
1305 G1 E399.2797 F1800
1306 G1 X.20 Y.10 F4200
1307 G1 Z2.620 F420
1308 G1 E401.2797 F1800
1309 G1 X.20 Y.10 F4200
1310 G1 X.20 Y99.90 E404.5360 F1200
```


Ergebnisse

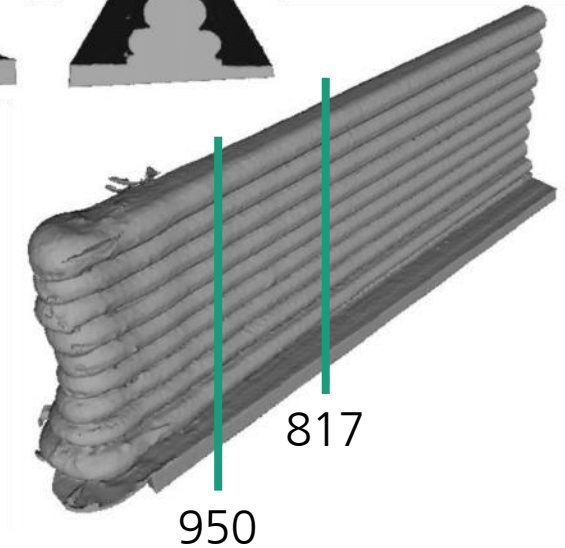
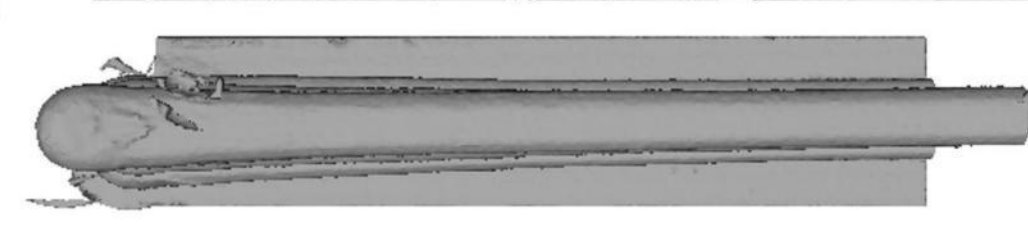
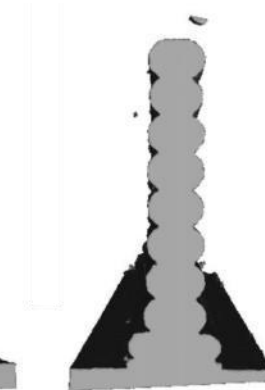
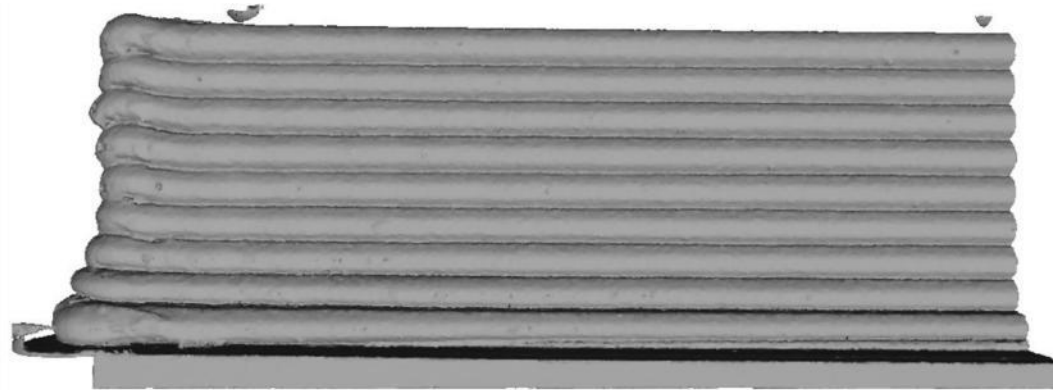
Probe IX - Verfahrensgeschwindigkeit

```
1297 ;layer:0.18
1298 G1 E396.0234 F1800
1299 G1 X.20 Y.10 F4200
1300 G1 Z2.440 F420
1301 G1 E398.0234 F1800
1302 G1 X.20 Y.10 F4200
1303 G1 X.20 Y99.90 E401.2797 |
1304 ;layer:0.18
1305 G1 E399.2797 F1800
1306 G1 X.20 Y.10 F4200
1307 G1 Z2.620 F420
1308 G1 E401.2797 F1800
1309 G1 X.20 Y.10 F4200
1310 G1 X.20 Y99.90 E404.5360 |
```



Ergebnisse

Probe XIV, XV - Layerhöhe

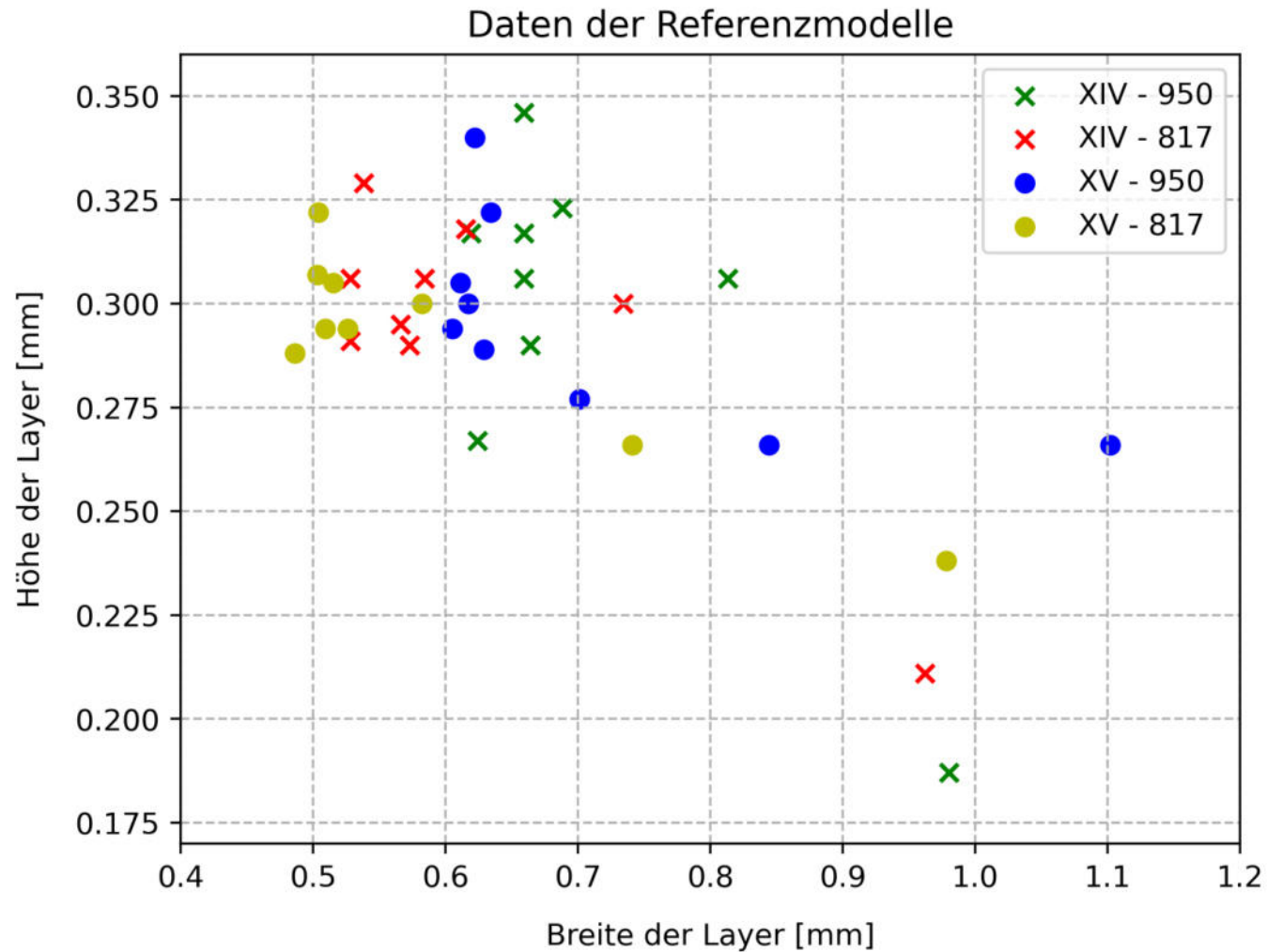


```
1297 ;layer:0.30
1298 G1 E438.3271 F1800
1299 G1 X.20 Y.10 F4200
1300 G1 Z3.400 F420
1301 G1 E440.3271 F1800
1302 G1 X.20 Y.10 F4200
1303 G1 X.20 Y99.90 E445.7542 F1200
1304 ;layer:0.30
1305 G1 E443.7542 F1800
1306 G1 X.20 Y.10 F4200
1307 G1 Z3.700 F420
1308 G1 E445.7542 F1800
1309 G1 X.20 Y.10 F4200
1310 G1 X.20 Y99.90 E451.1814 F1200
```

Ergebnisse

Probe XIV, XV - Layerhöhe

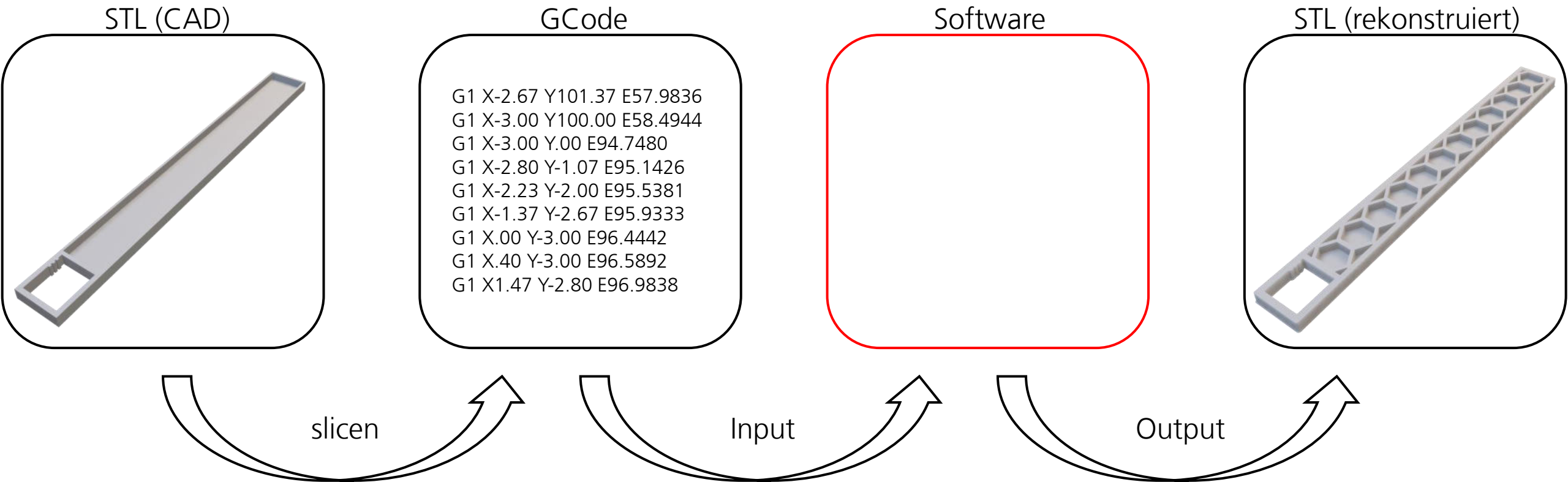
```
1297 ;layer:0.30
1298 G1 E438.3271 F1800
1299 G1 X.20 Y.10 F4200
1300 G1 Z3.400 F420
1301 G1 E440.3271 F1800
1302 G1 X.20 Y.10 F4200
1303 G1 X.20 Y99.90 E445.7
1304 ;layer:0.30
1305 G1 E443.7542 F1800
1306 G1 X.20 Y.10 F4200
1307 G1 Z3.700 F420
1308 G1 E445.7542 F1800
1309 G1 X.20 Y.10 F4200
1310 G1 X.20 Y99.90 E451.1
```



Software GCode2STL

Implementierung

Übersicht der Gesamtlösung



Implementierung

Line - Klasse

Zeile wird eingelesen



G1 X10 Y20 E20.25 → G1 X-10 Y20 E21.55 F1200

Startkoordinaten

Zielkoordinaten

Vektor = Ziel - Start

Masse (ediff) = $E_{\text{Ziel}} - E_{\text{Start}}$

Verfahrgeschwindigkeit

ID

Länge

Typ

(10, 20, 2.07)

(-10, 20, 2.07)

(-20, 0, 0)

1.30 mm

1200 mm/min

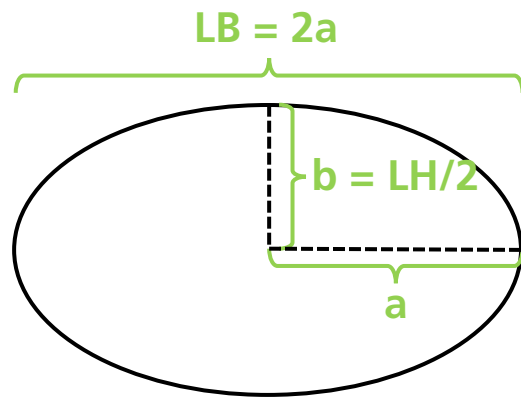
42

$$\sqrt{(-20)^2 + 0^2 + 0^2} = 20 \text{ mm}$$

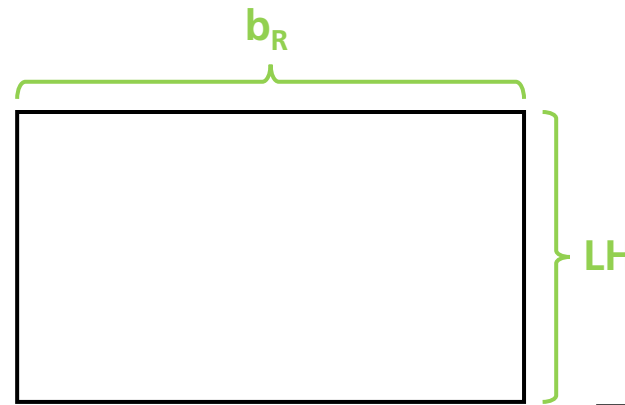
extract

Implementierung

Querschnitte

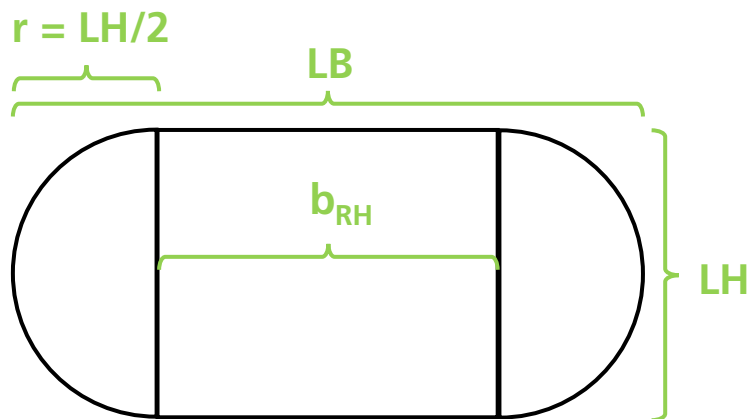


a) Ellipse

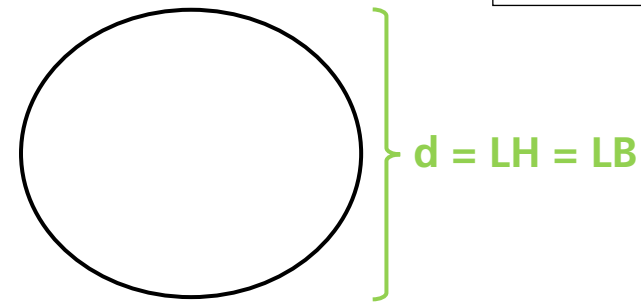


b) Rechteck

Legende:
LH = Layerhöhe
LB = Layerbreite



c) Rechteck-Halbkreise



d) Kreis

Implementierung

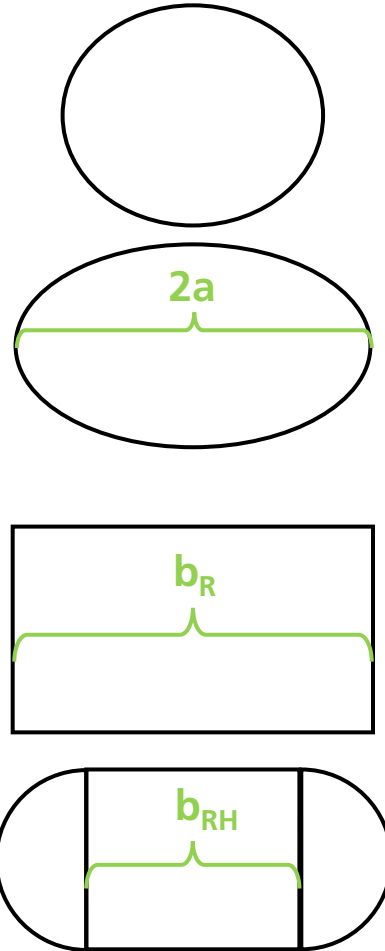
Volumenvergleich

$$V_F = r_F^2 \cdot \pi \cdot ediff$$

$$V_E = a \cdot b \cdot \pi \cdot l = a \cdot \frac{LH}{2} \cdot \pi \cdot l$$

$$V_R = LH \cdot b_R \cdot l$$

$$V_{RH} = (b \cdot LH + r_D^2 \cdot \pi) \cdot l$$



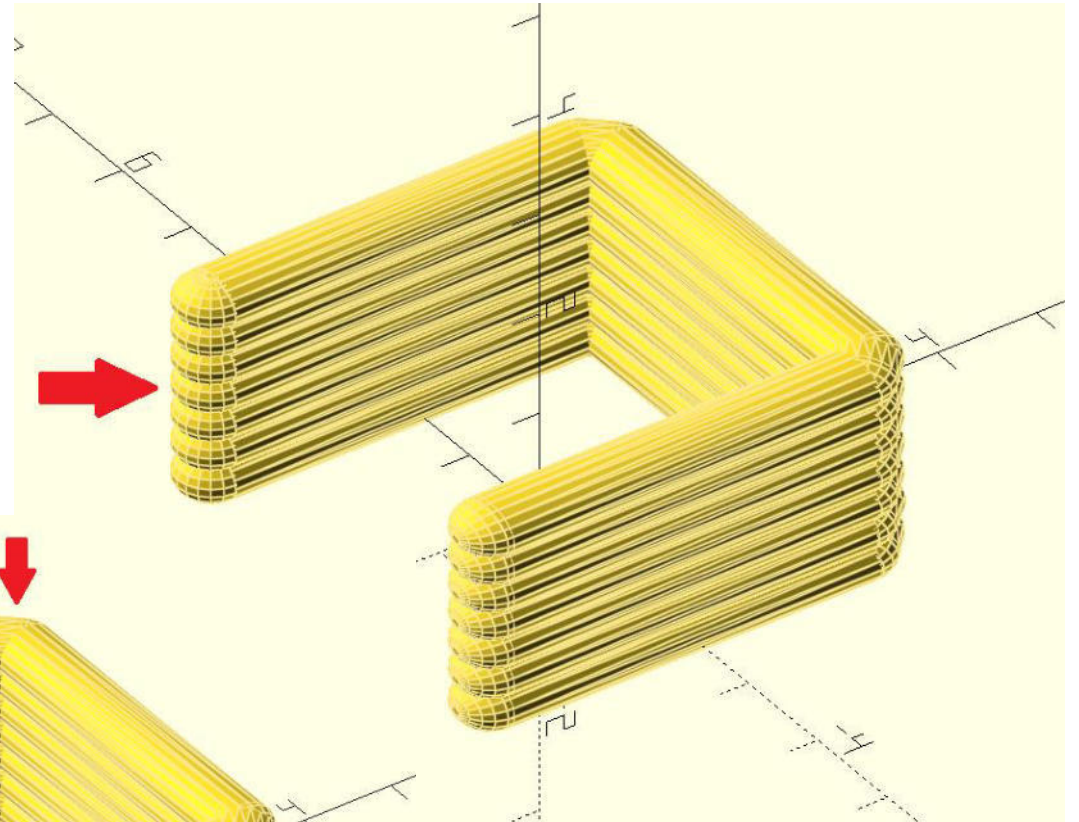
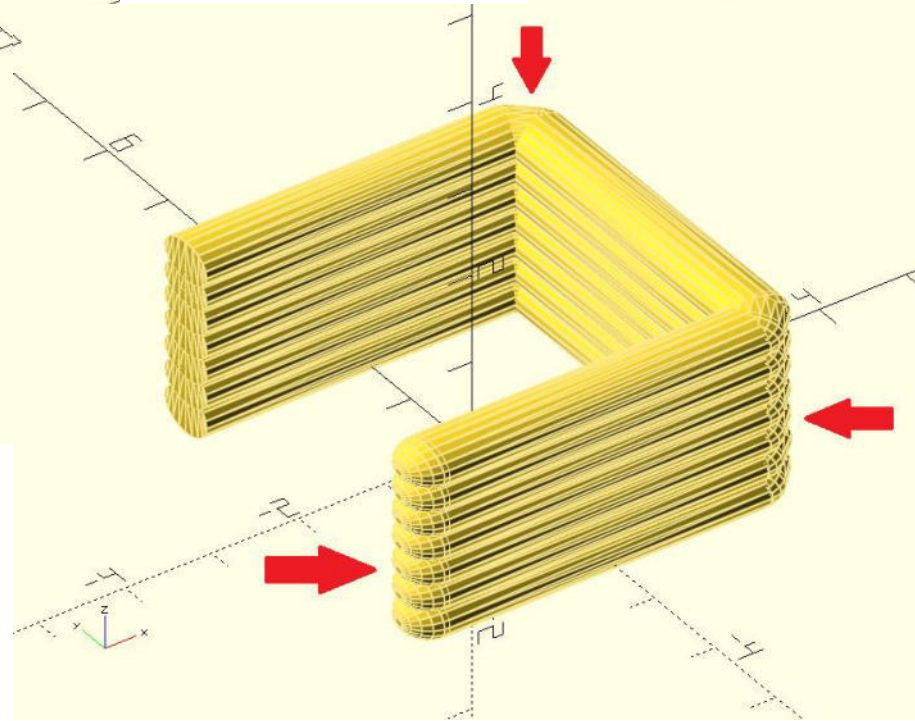
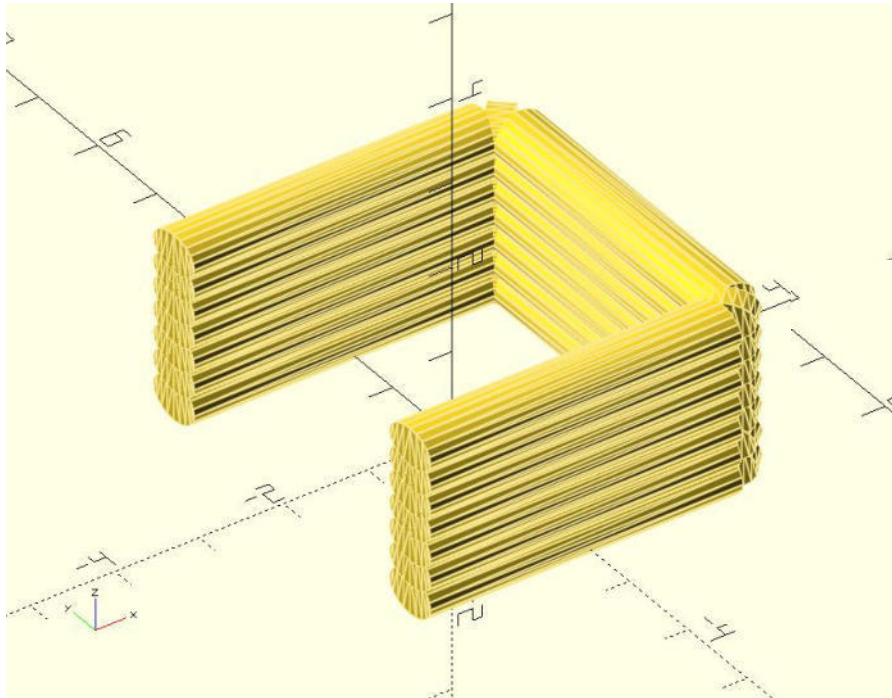
$$a = \frac{2 \cdot r_F^2}{LH} \cdot \frac{ediff}{l}$$

$$b_R = \frac{r_F^2 \cdot \pi}{LH} \cdot \frac{ediff}{l}$$

$$b_{RH} = \frac{r_F^2 \cdot \pi}{LH} \cdot \frac{ediff}{l} - \frac{LH \cdot \pi}{4}$$

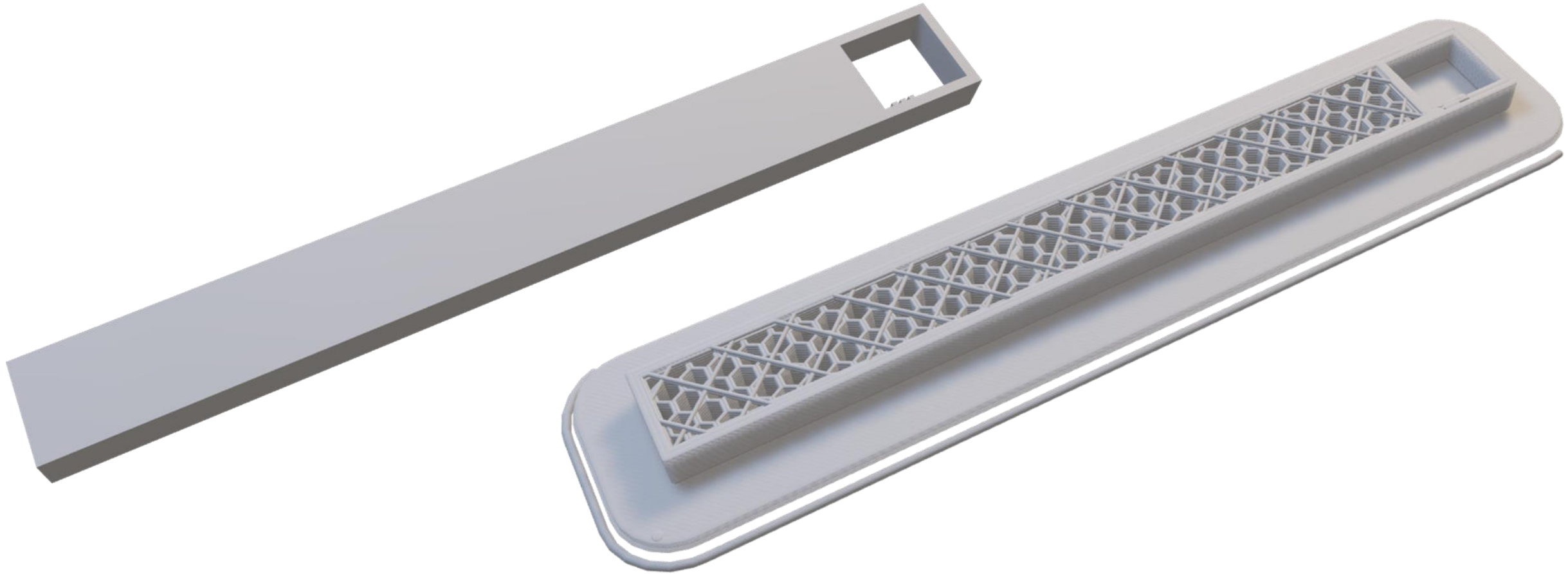
Implementierung

OpenSCAD - Klasse



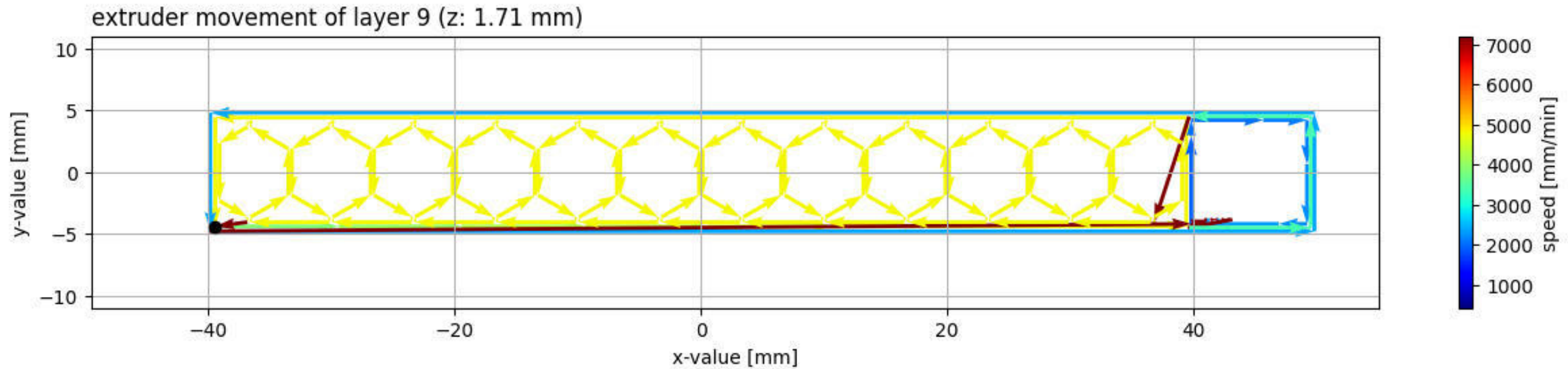
Ergebnisse

OpenSCAD - Klasse



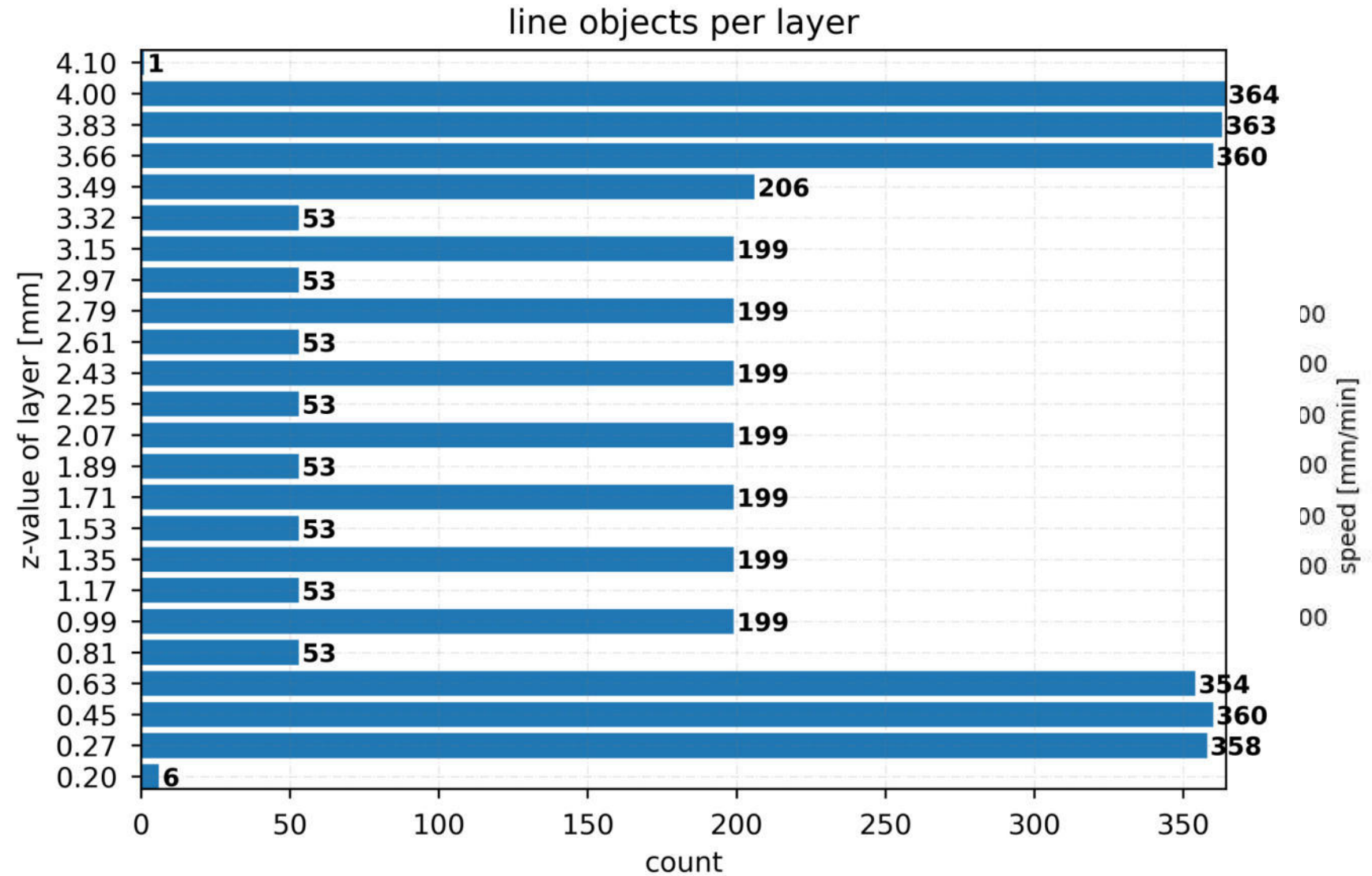
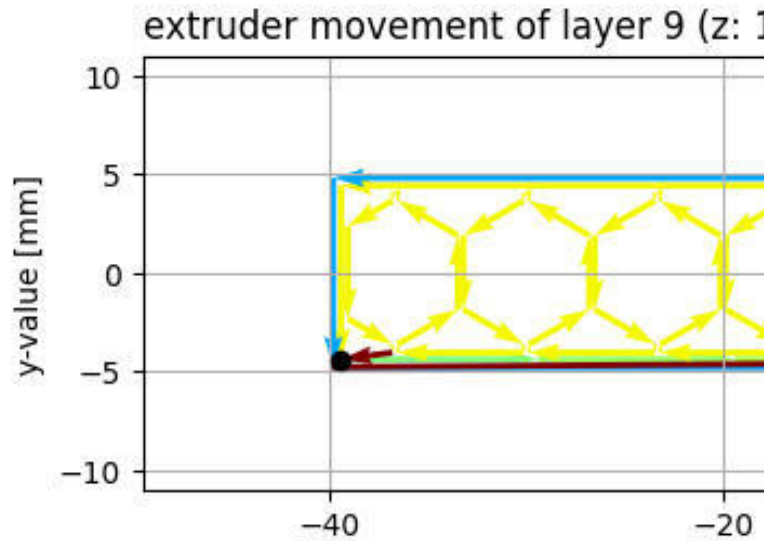
Ergebnisse

Graphs - Klasse



Ergebnisse

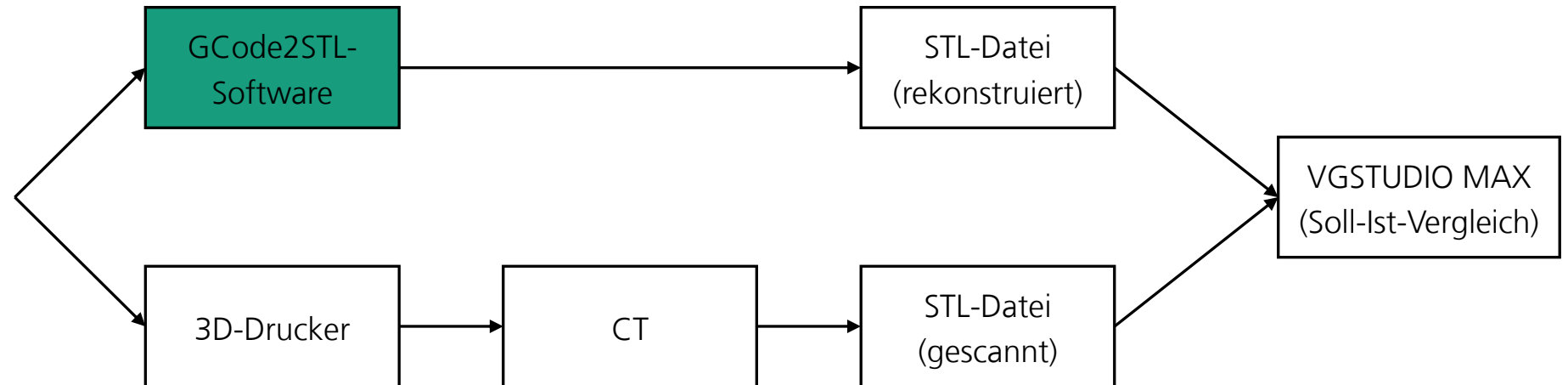
Graphs - Klasse



Auswertung

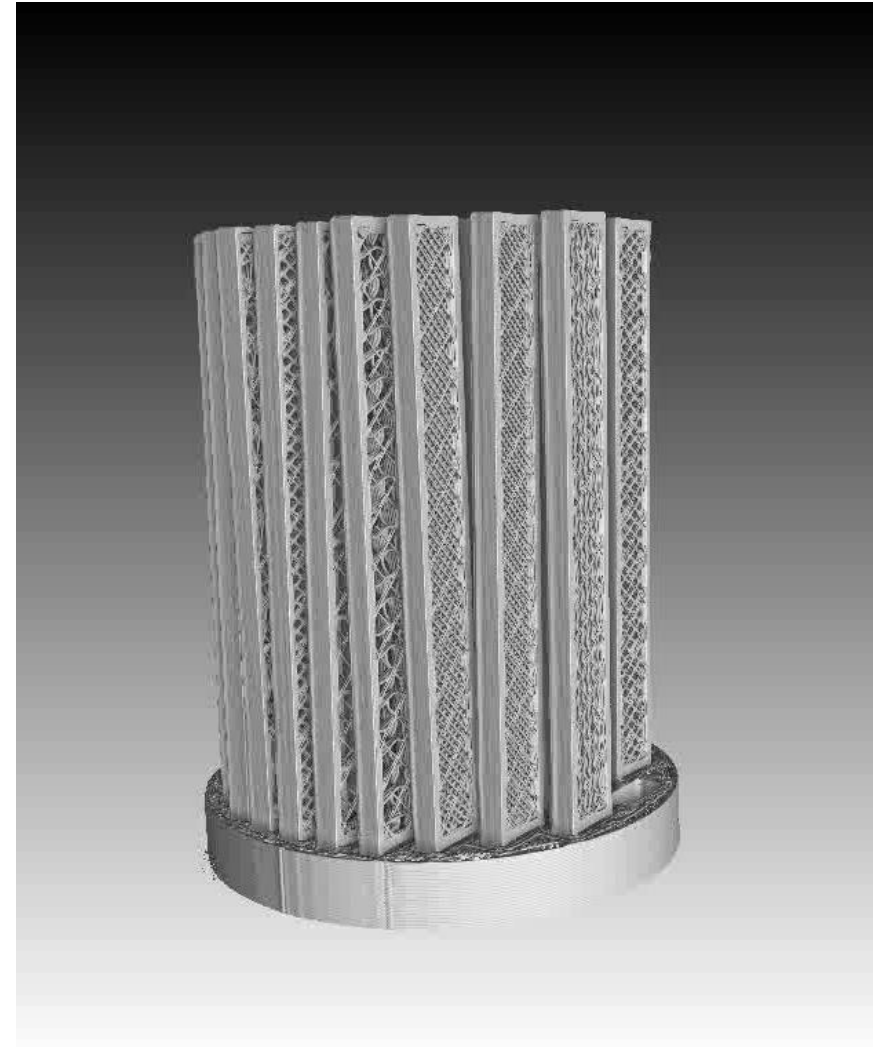
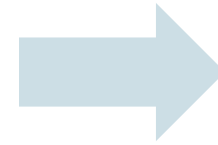
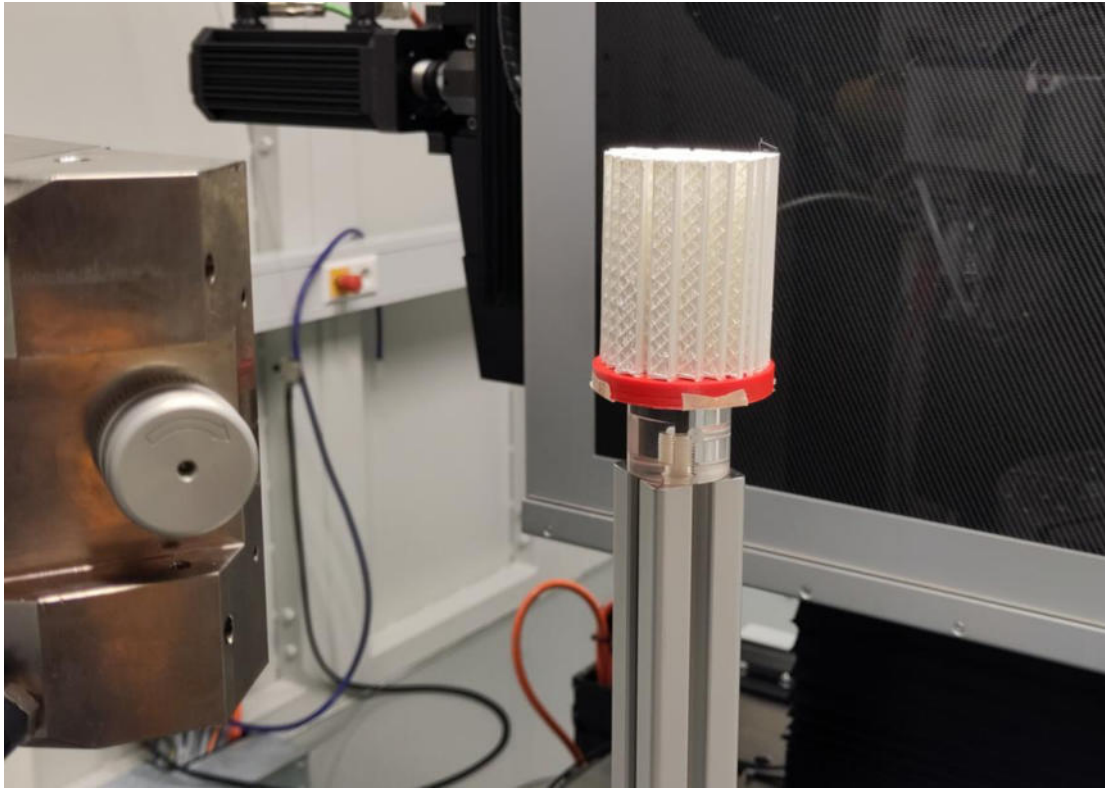
Vorgehensweise

```
99 ;structure:infill-solid
100 G1 X39.64 Y-4.50 F4200
101 G1 X49.33 Y-4.50 E37.9644 F1200
102 G1 X49.47 Y-4.47 E37.9714
103 G1 X49.50 Y-4.33 E37.9784
104 G1 X49.50 Y4.33 E38.4023
105 G1 X49.47 Y4.47 E38.4093
106 G1 X49.33 Y4.50 E38.4163
107 G1 X39.64 Y4.50 E38.8906
108 G1 E37.5906 F1800
109 G1 X38.68 Y-4.06 F4200
110 G1 E38.8906 F1800
111 G1 X38.68 Y-4.06 F4200
112 G1 X39.06 Y-3.68 E38.9169 F1200
113 G1 X39.06 Y-3.11 E38.9448
114 G1 X38.11 Y-4.06 E39.0105
115 G1 X37.54 Y-4.06 E39.0384
```



CT-Analyse

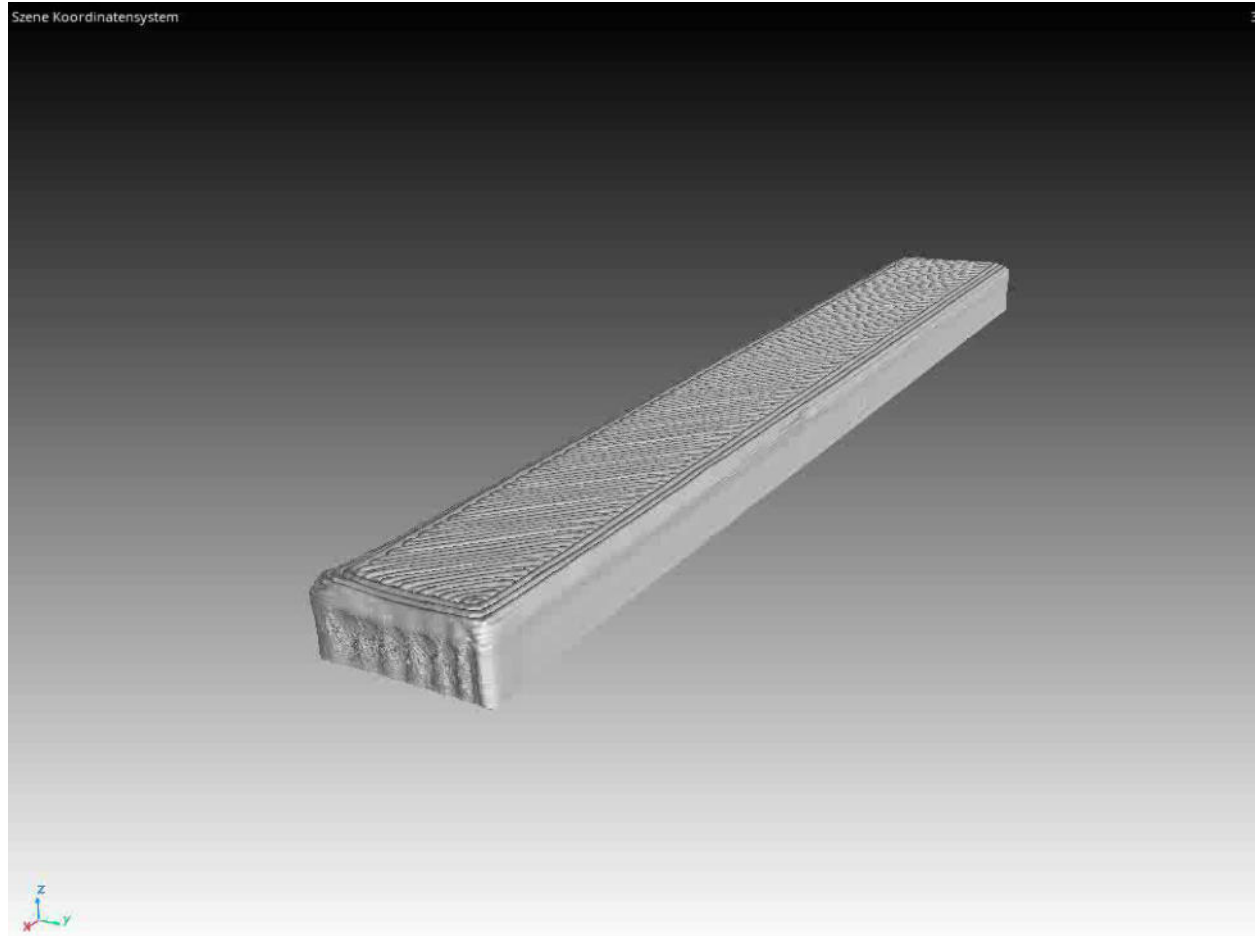
Datenaufnahme



- 42 Proben pro Scan

CT-Analyse

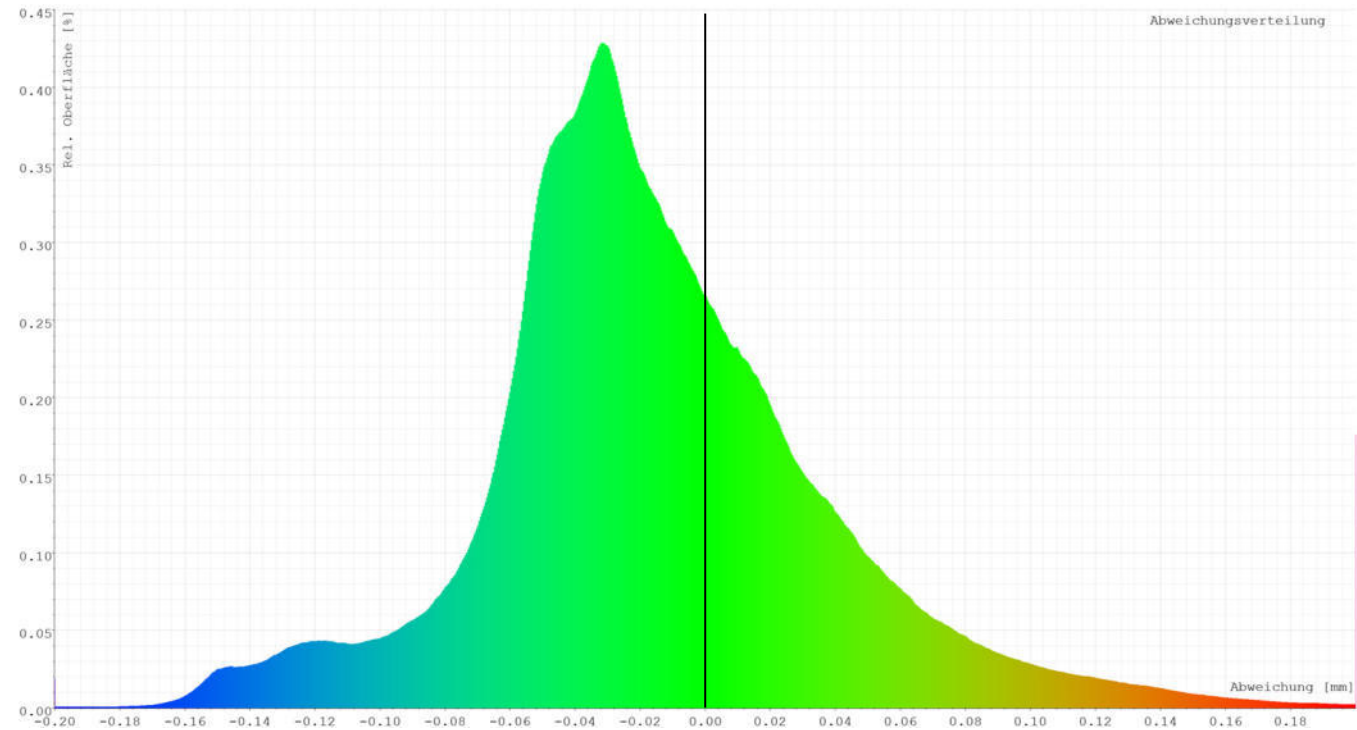
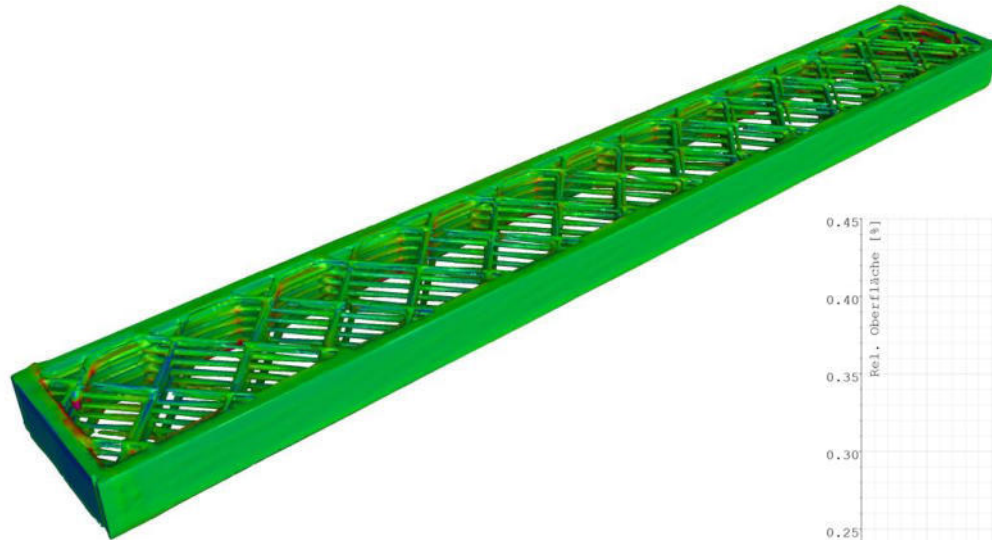
Soll/Ist-Vergleich



Ergebnisse

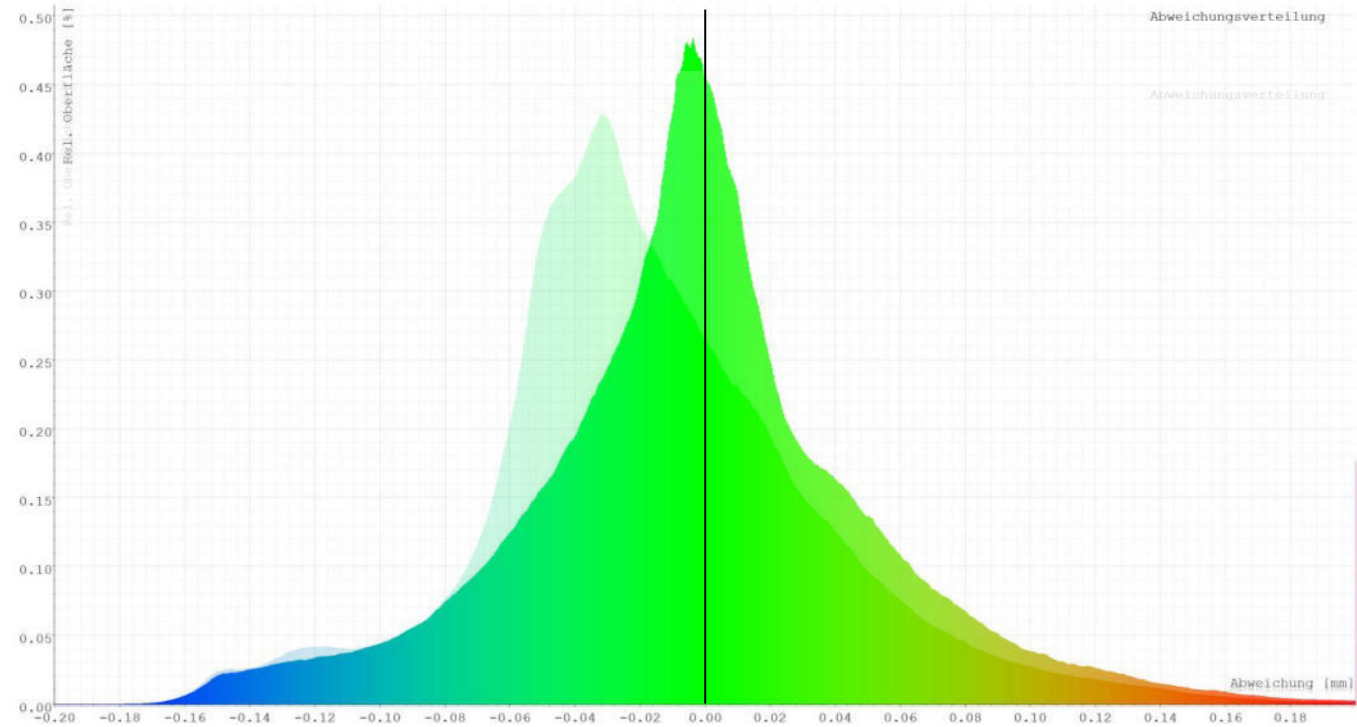
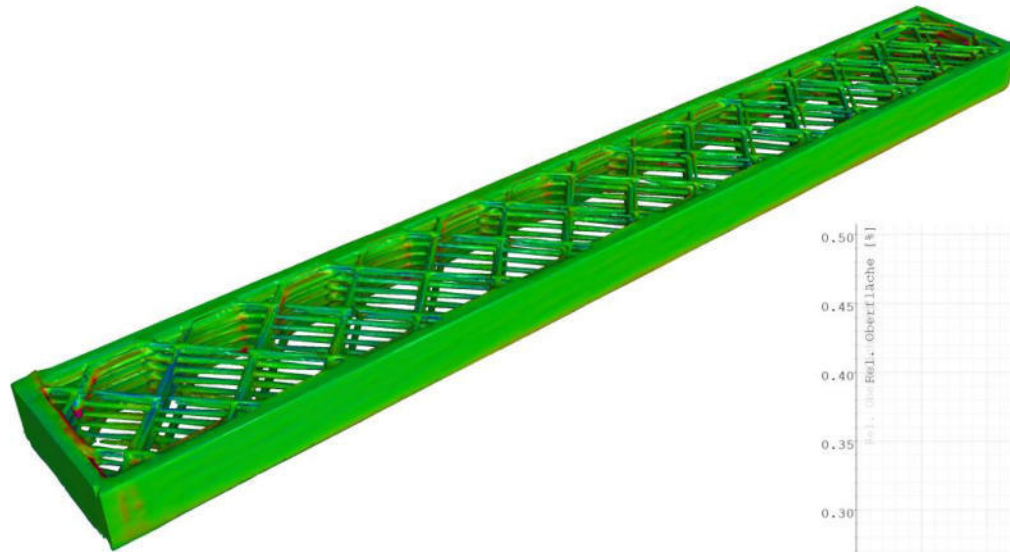
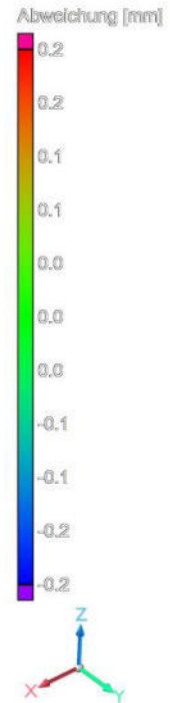
Line-Infillmuster, 10% Infilldichte, Ellipse

Abweichung [mm]



Ergebnisse

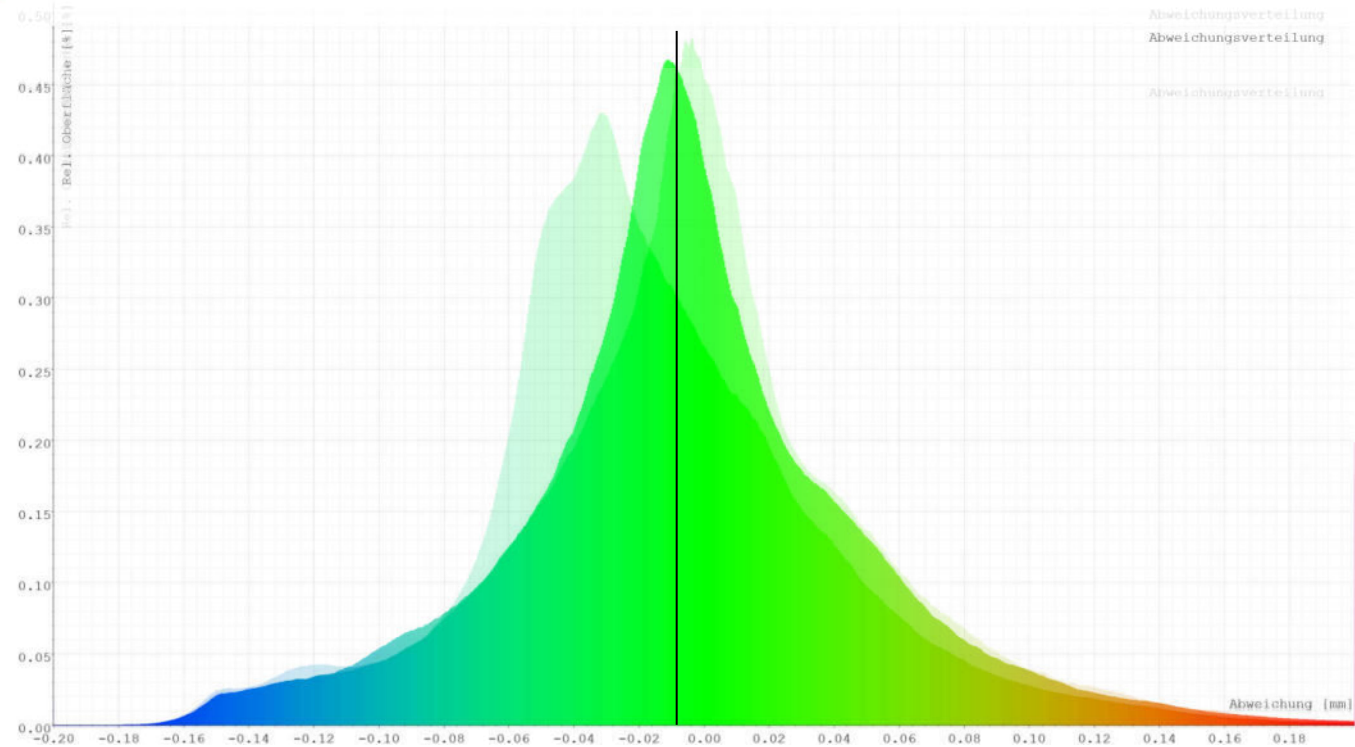
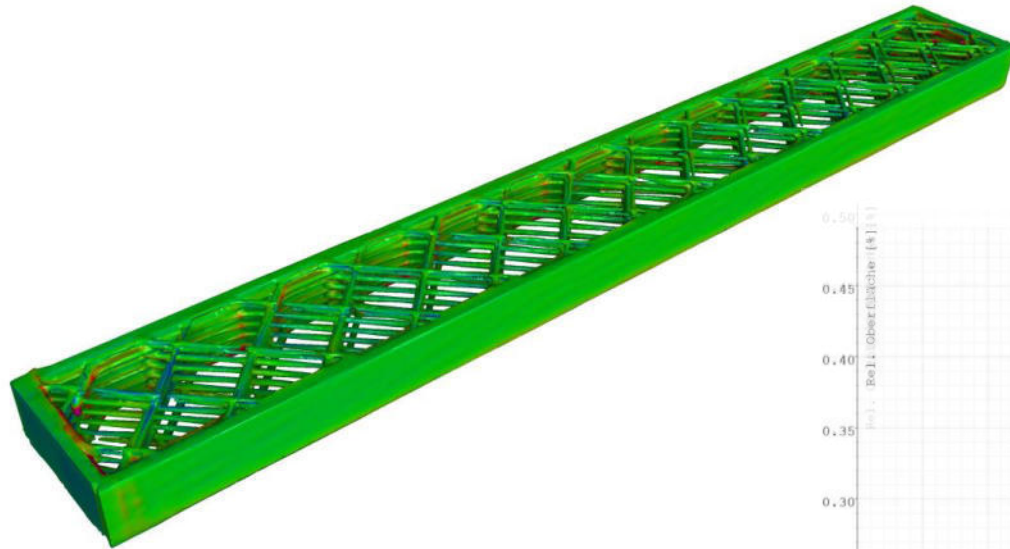
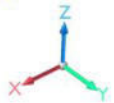
Line-Infillmuster, 10% Infilldichte, Rechteck



Ergebnisse

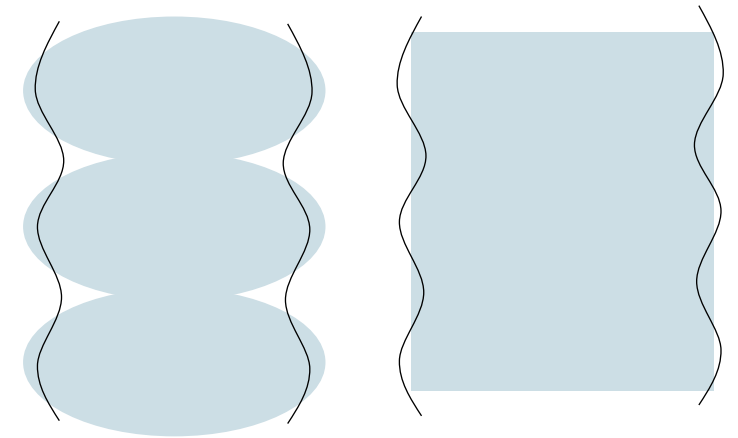
Line-Infillmuster, 10% Infilldichte, Rechteck-Halbkreise

Abweichung [mm]



Erkenntnisse

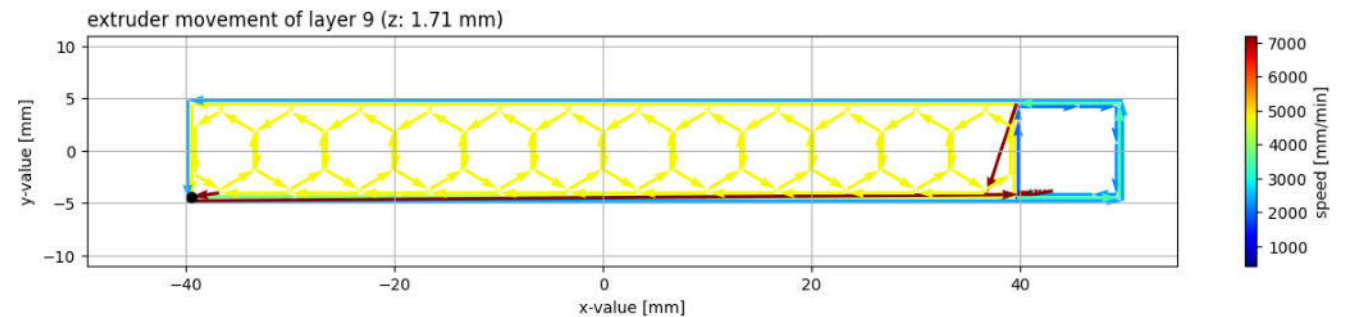
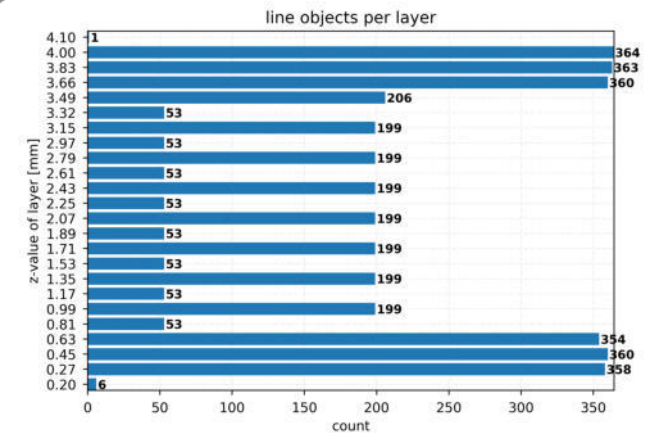
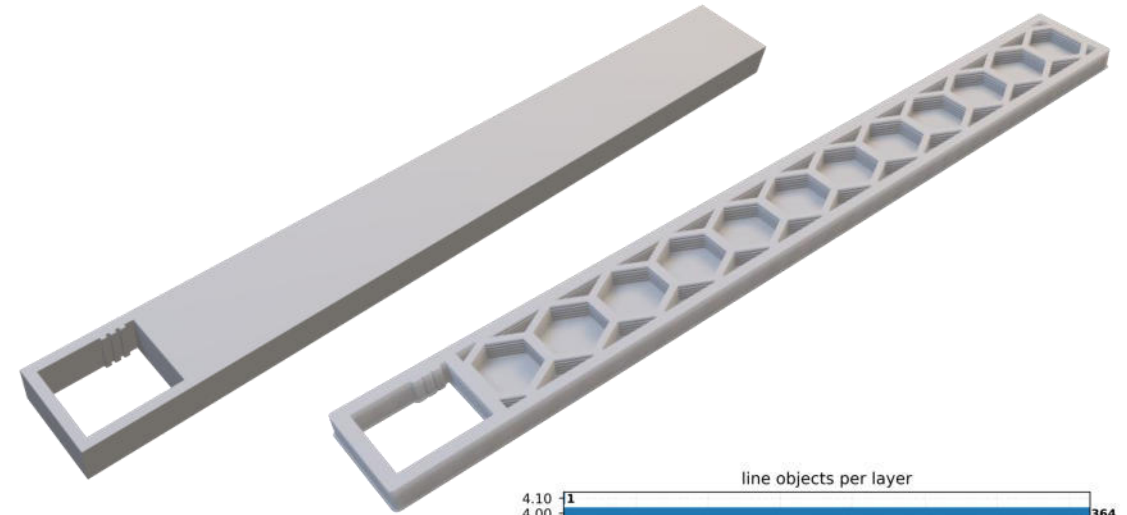
- Insgesamt sehr gute Qualität der Rekonstruktion
- Rechteck/Rechteck-Halbkreise > Ellipse
- Abweichungen nehmen mit größerer Infilldichte zu → hohe Geschwindigkeit beim Drucken des Infills
- Geradlinige Infillmuster besser geeignet



Fazit

Zusammenfassung

- Rekonstruktion der STL-Datei aus dem G-Code mit Infill ist möglich
- Analyse beliebiger G-Codes
- Reine Softwarelösung zum Finden optimaler Slicer-Parameter für spezifischen Anwendungsfall (in Kombination mit FE-Analyse)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Session 4: Qualitätssicherung im 3D-Druck 1

**Additiv gefertigte EMV-Bauteile für den
Messgerätebau**

Dr. Oliver Neudert, GMBU e.V.

Der Vortrag "Additiv gefertigte EMV-Bauteile für den Messgerätebau" stellt Zwischenergebnisse eines Verbundforschungsprojekts im Rahmen des regionalen Netzwerks "Qualitätssicherung in der Additiven Fertigung" vor. Basis des Forschungsprojekts ist die Entwicklung von elektrisch leitfähigem Filamentmaterial mit hoher mechanischer Beständigkeit und guter additiver Verarbeitbarkeit (GMBU e.V.). Darauf basierend sollen elektromagnetisch abschirmende Sensorkomponenten und -gehäuse für die Ultraschall-Sensorik (SONOTEC GmbH) und Analysenmesstechnik (ECH Elektrochemie Halle GmbH) entwickelt und additiv gefertigt werden. Gegenstand des Projektes ist außerdem die Entwicklung von Prüfverfahren zur Materialkontrolle und Qualitätssicherung der Bauteile. Am Ende des Verbundprojekts sollen additiv verarbeitbare Materialien sowie Fertigungs- und Prüfverfahren zur störungsfreien und reproduzierbaren additiven Fertigung von EMV-Endanwenderbauteilen entstehen.

Session 4: Qualitätssicherung im 3D-Druck 1

Einsatz von Endlosfasern im 3D-Druck

Thomas Veit,
Automation, Sonder- und Werkzeugmaschinen ASW GmbH
Naumburg



Lastpfadgerechte Verstärkung mit Endlosfasern in der additiven Fertigung

11. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck



Agenda

- Forschungsprojekt Projektgeber und Partner
- Vorstellung ASW
- Projektziel
- Unterschiede FDM/FFF vs. Hydra4
- Fügen mit Laserunterstützung
- Ablauf zur Faserbelegung
- Was ist die Hydra4?
- Konzipierung der mechanischen Grundkonstruktion
- Zusammenfassung



Forschungsverbundprojektprojekt:

„Qualitätssicherung in der Additiven Fertigung“



Projekt VP5:

Erforschung einer Technologie zur 3D-Trajektorien basierten generativen Fertigung von Bauteilen aus faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen



Projektgeber: PTJ, Jülich



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projektpartner:

ASW, Naumburg,
IMWS, Halle

Thomas Veit, Thomas Seelig, Paul Werner
Matthias Zscheyge, Patrick Hirsch,
Ralf Schlimper, Marco Rühl,
Benjamin Borowitzka

SLV, Halle
FBZ An-Institut

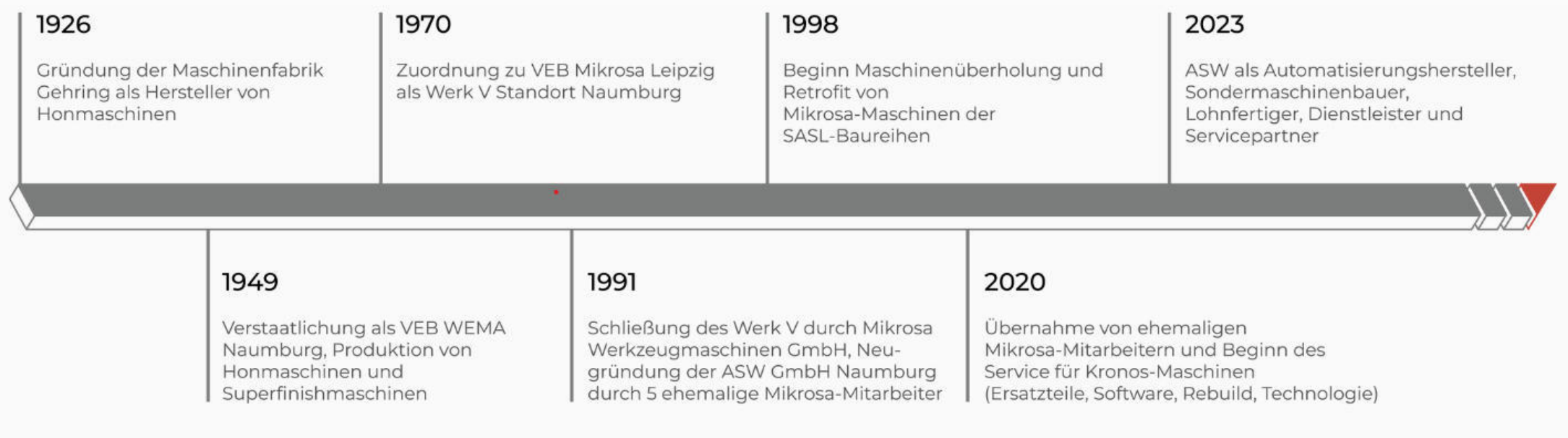
Georg Trenschr,
Dietmar Glatz





Vorstellung ASW

Standort: Naumburg/ Saale
Mitarbeiter: ca. 70



➤ Schwerpunkt im Maschinenbau

- Werkzeugmaschinen
- Schleifversuche/ Lohnschleifen
- Gebrauchtmaschinen
- Automatisierungseinrichtungen
- Generalreparaturen/ Maschinenservice
- Lohnfertigung



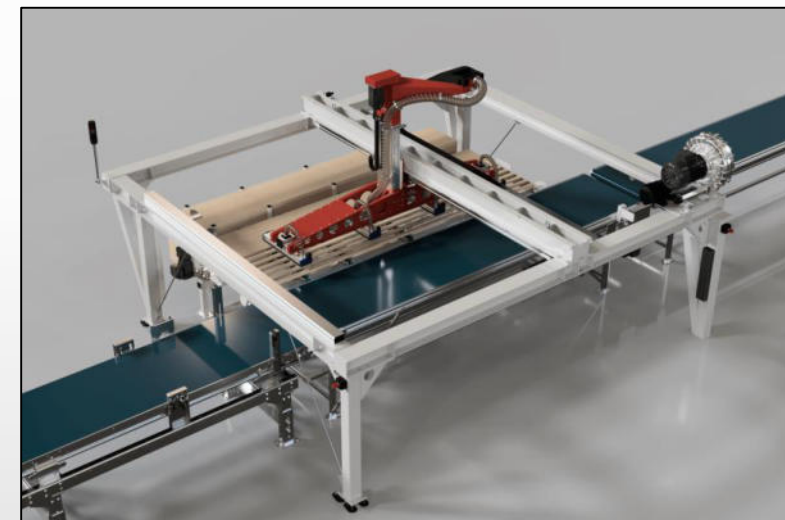


- Herstellung von spitzenlosen Rundschleifmaschinen



- kundenspezifische Lösungen in den Bereichen Industrieautomation und des Sondermaschinenbaus

Zuführtechnik



Handlingsysteme



Projektziel

- Additiv gefertigte Bauteile mit lastpfadgerechter Verstärkung mit Endlosfasern, z.B. orthopädische Prothesenschäfte
- durch Hydra-Hybridverfahren können individuelle und komplexe Produkte im Leichtbau in einem digitalen Workflow hergestellt werden
- Vereinfachung des Workflows durch digitale und individuelle Datenzuführung (CAD-CAM)
 - kein Formenbau mehr notwendig

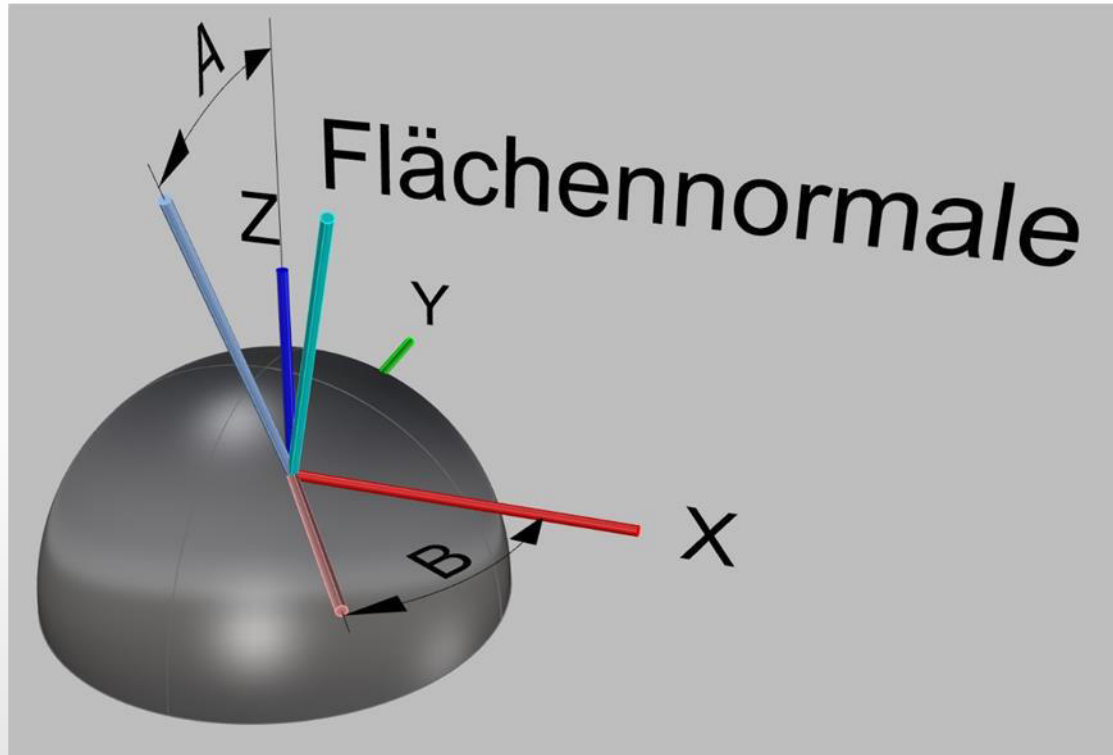


Unterschiede FDM/FFF vs. Hydra4

- 2¹/₂-D
- Z-Konstant
- Schicht für Schicht
- Verbund der Schichten/Lagen durch Energieeintrag aus der Düse von oben
- 3-Achsen+ 1 Extruder
- Auftragen der Schichten frei im 3D-Raum
- Schichtweise
- Verbund der Endlosfasern durch Energieeintrag aus dem Laser
- Beheizung des Zwickels
- 6-Achsen + 1 Extruder

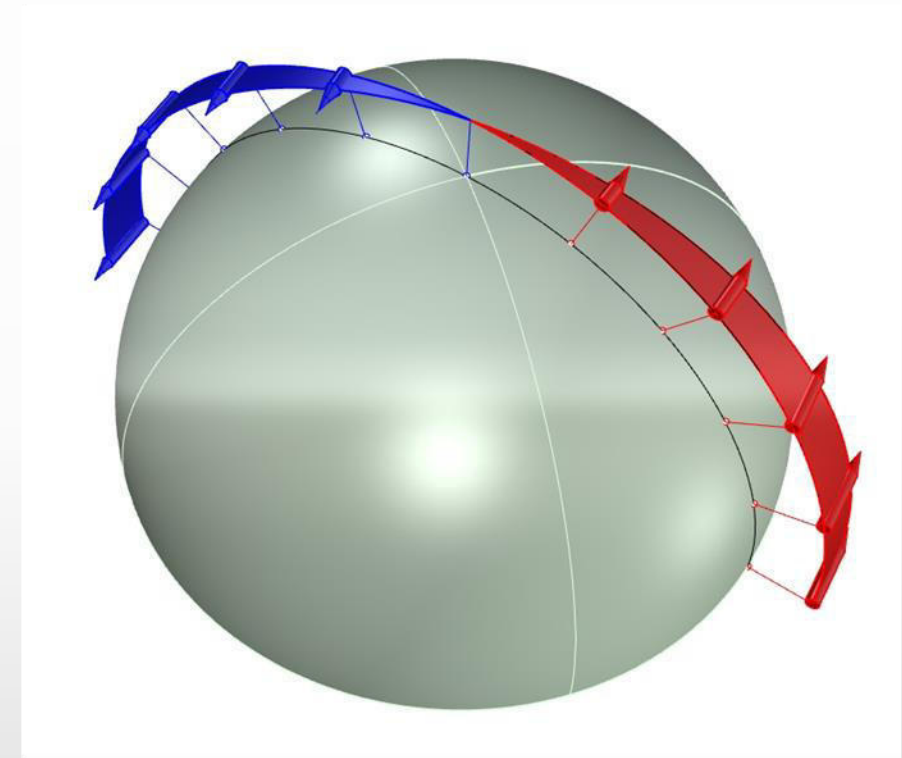


Warum 6-Achsen?



Flächennormale auf Halbkugel
drei translatorische Achsen XYZ und zwei rotatorische Achsen AB

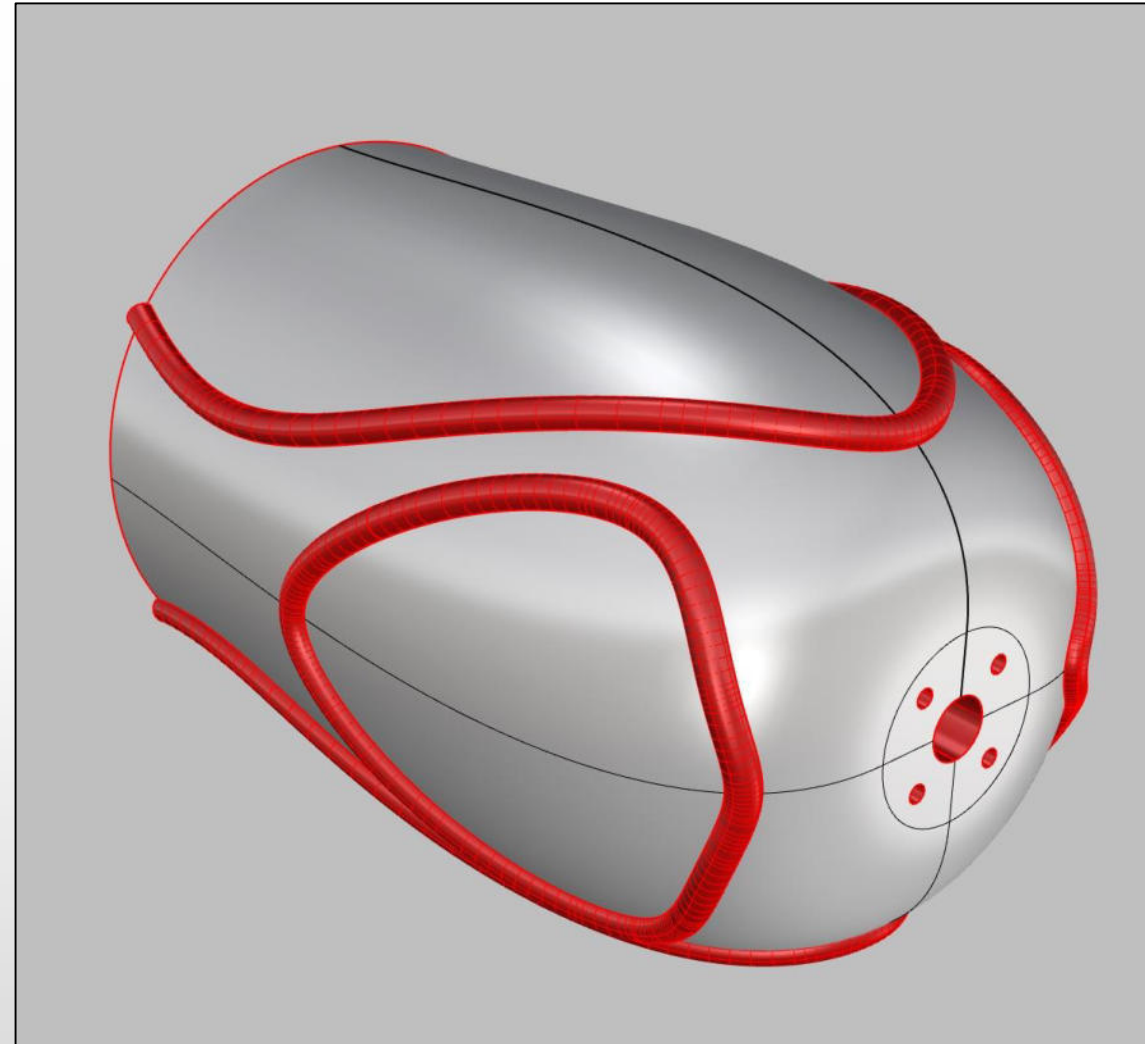
Quelle: FBZ



Flächennormale dreht um 180°

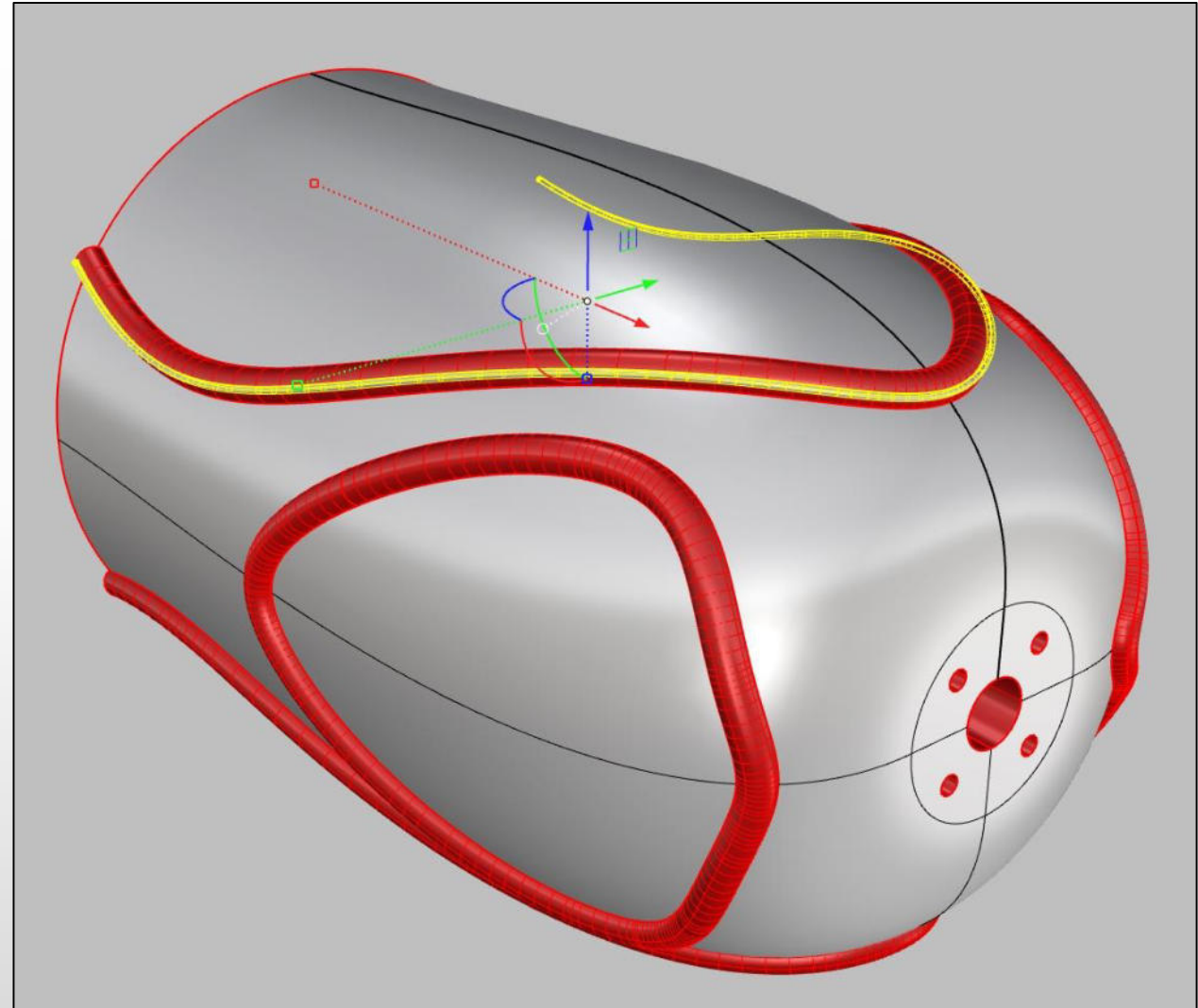
Belastungen festlegen

- Die Belastungen werden von Kunden bzw. Auftraggeber anhand seiner Kenntnisse festgelegt



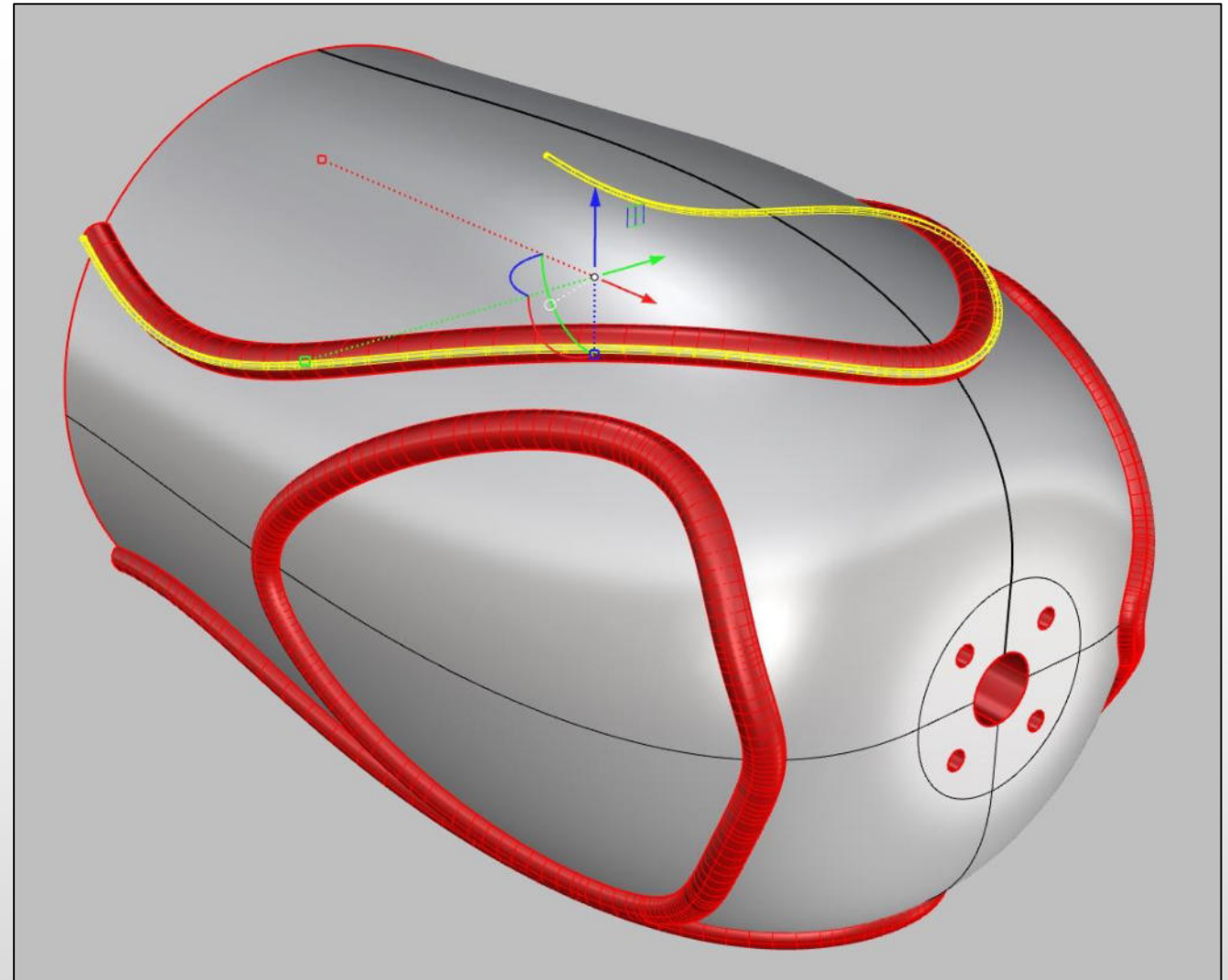
Lastpfade bestimmen

- aus den Belastungen ergeben sich die Lastpfade



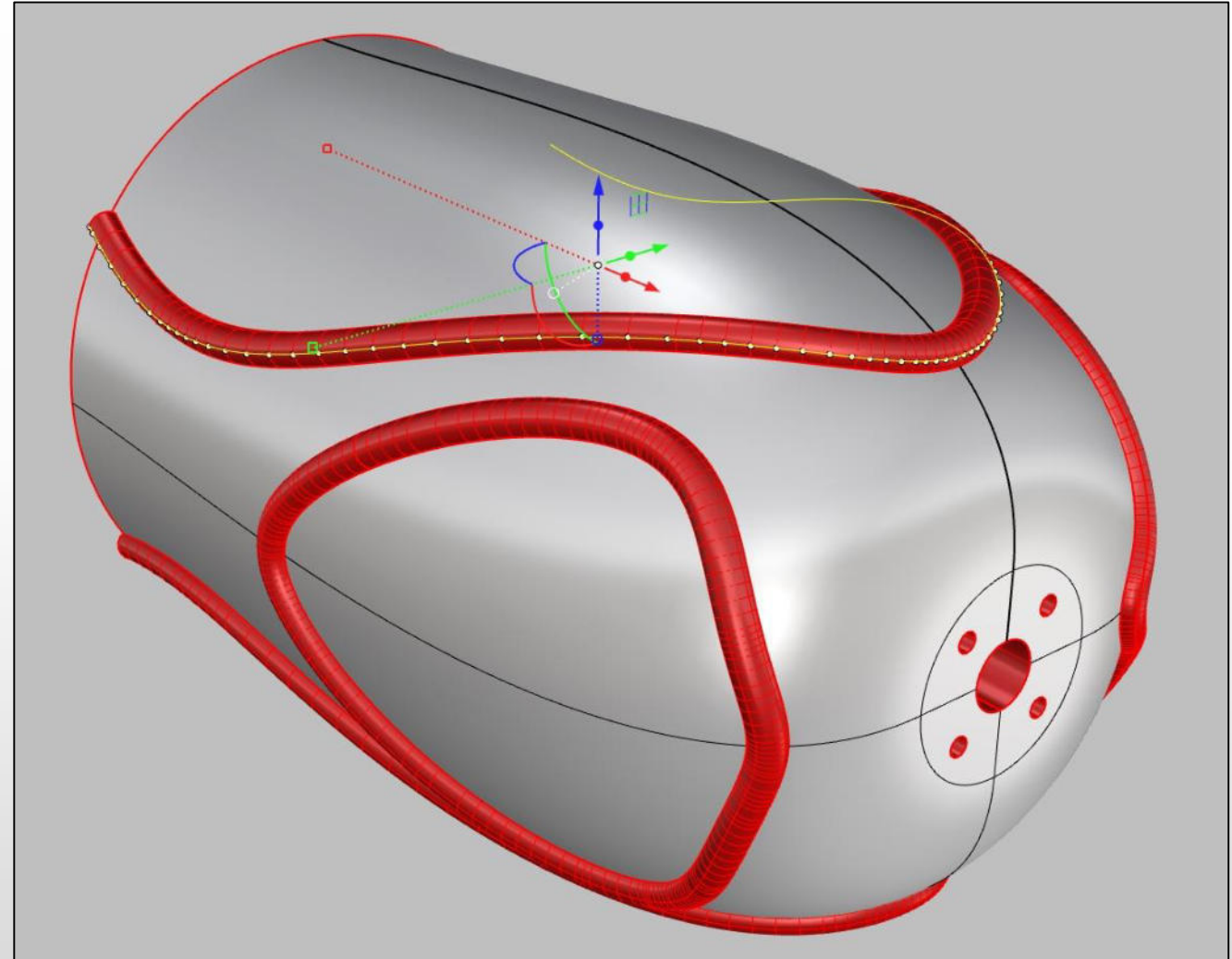
ISO-Kurve extrahieren

- Aus den flächigen Lastpfaden lassen sich die ISO-Kurven extrahieren



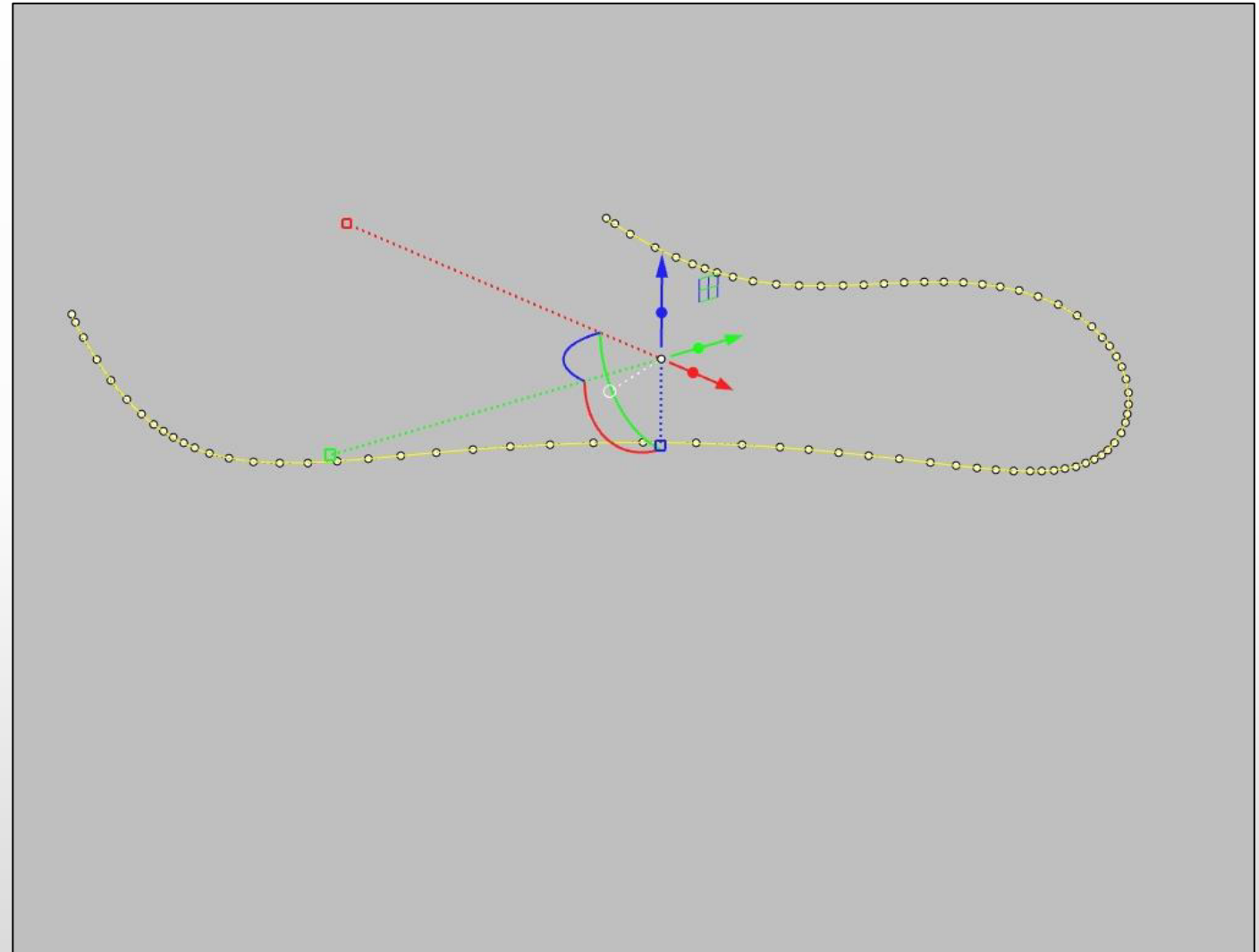
Punkte extrahieren

- Die Punkte liefern die XYZ-Koordinaten
- Sowie die Flächennormale

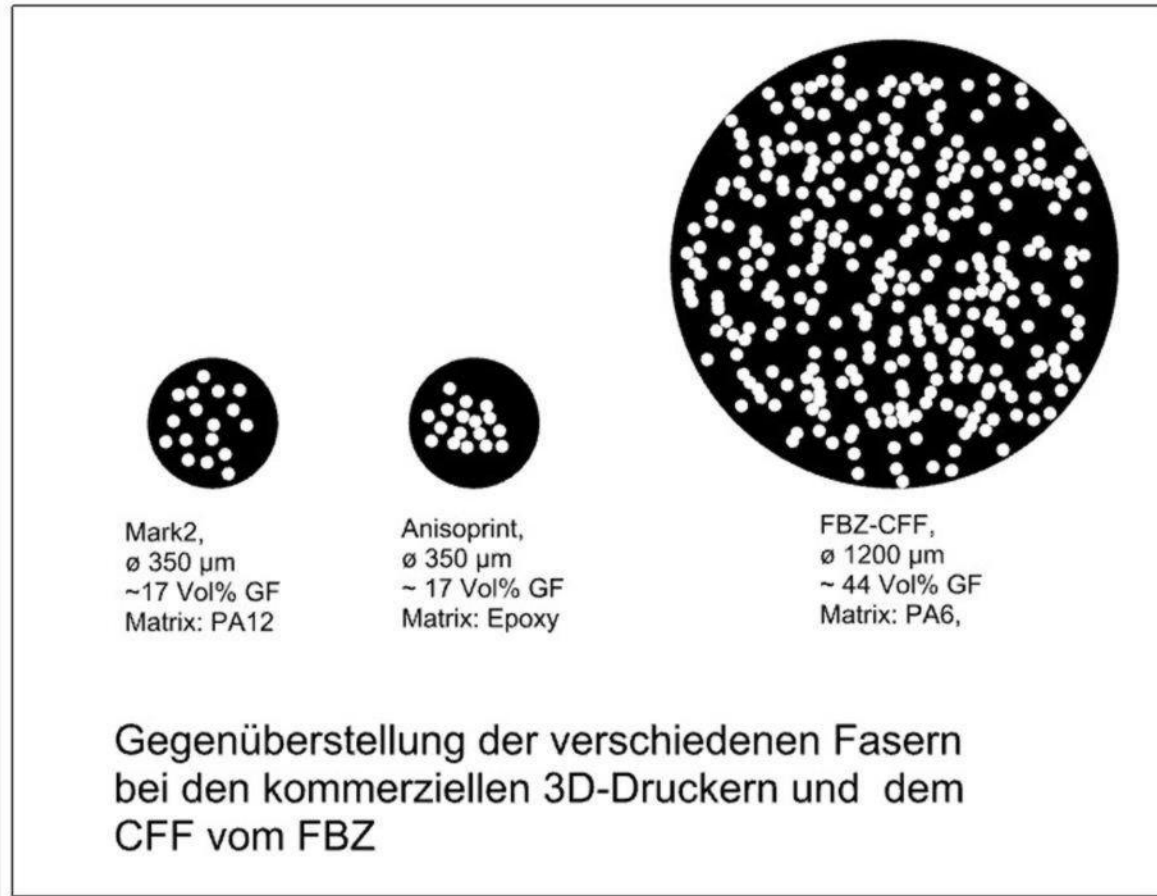


G-Code berechnen

- Aus den XYZ-Koordinaten sowie der Flächennormale in diesem Punkt, können die translatorischen Bewegungen um XYZ sowie die rotatorischen Drehungen um ABC berechnet werden.
- Die Distanz zwischen zwei Punkten ergibt die Länge des Extrudats



Endlosfaserfilament CFP (Continuous Fibre Polymer)

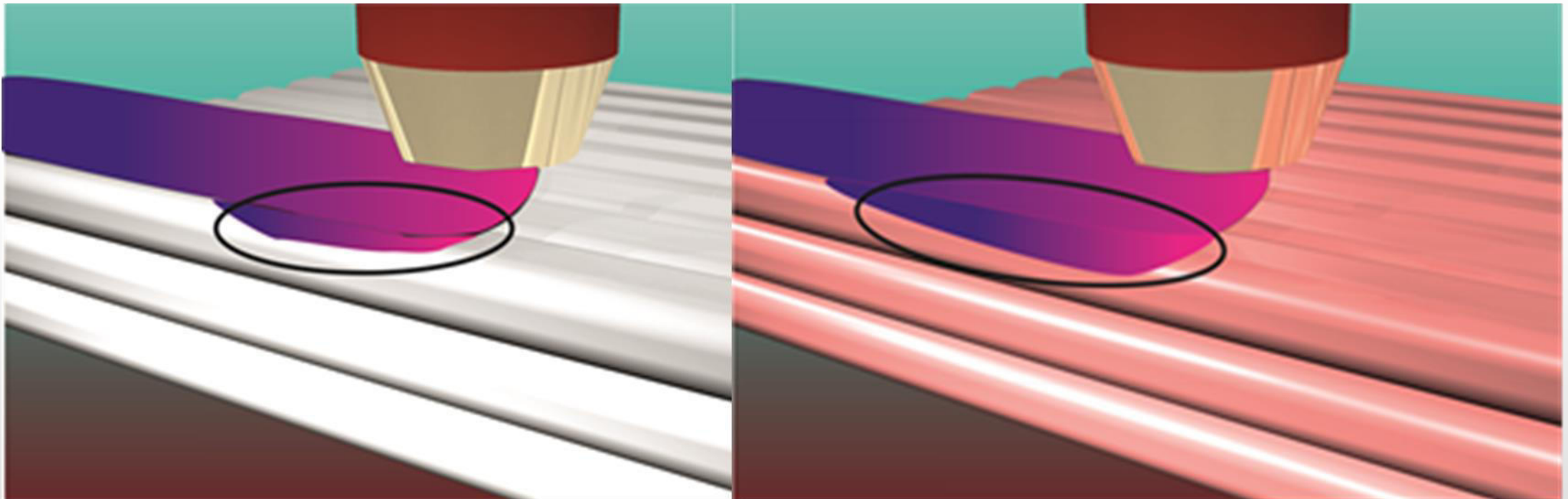


Quelle: FBZ

- Das vom FBZ entwickelte CFP-Verfahren erstellt ein Rundstrangfilament
- Hiermit ist es möglich, schärfere Kurven zu belegen und einen höheren Materialauftrag zu erzielen
- Das CFP-Filament hat eine Dicke von 1300µm und eine Matrix aus PA6 mit einem Faservolumenanteil von nahezu 50%
- Wettbewerber haben nur eine Dicke von 350µm bei einem Faservolumengehalt von ca. 17%

Bedingungen für eine optimale Haftung

- Der Untergrund bzw. die untere Lage müssen extern erwärmt werden
- Das Tape muss angedrückt werden
- Die Verbindungsenergie muss von oben mitgebracht werden



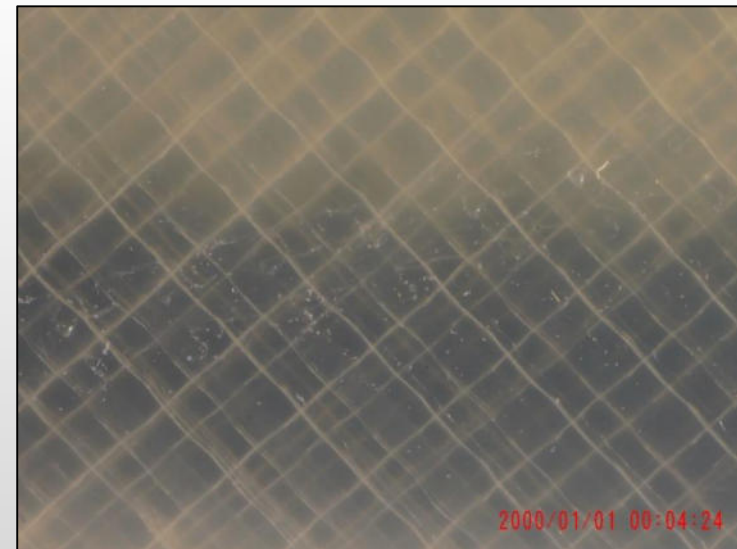
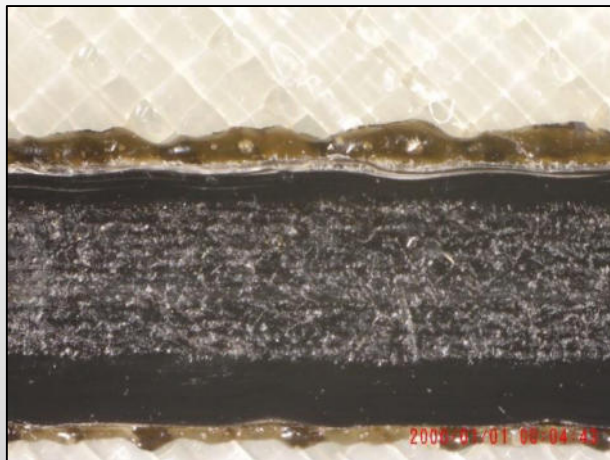
Quelle: FBZ



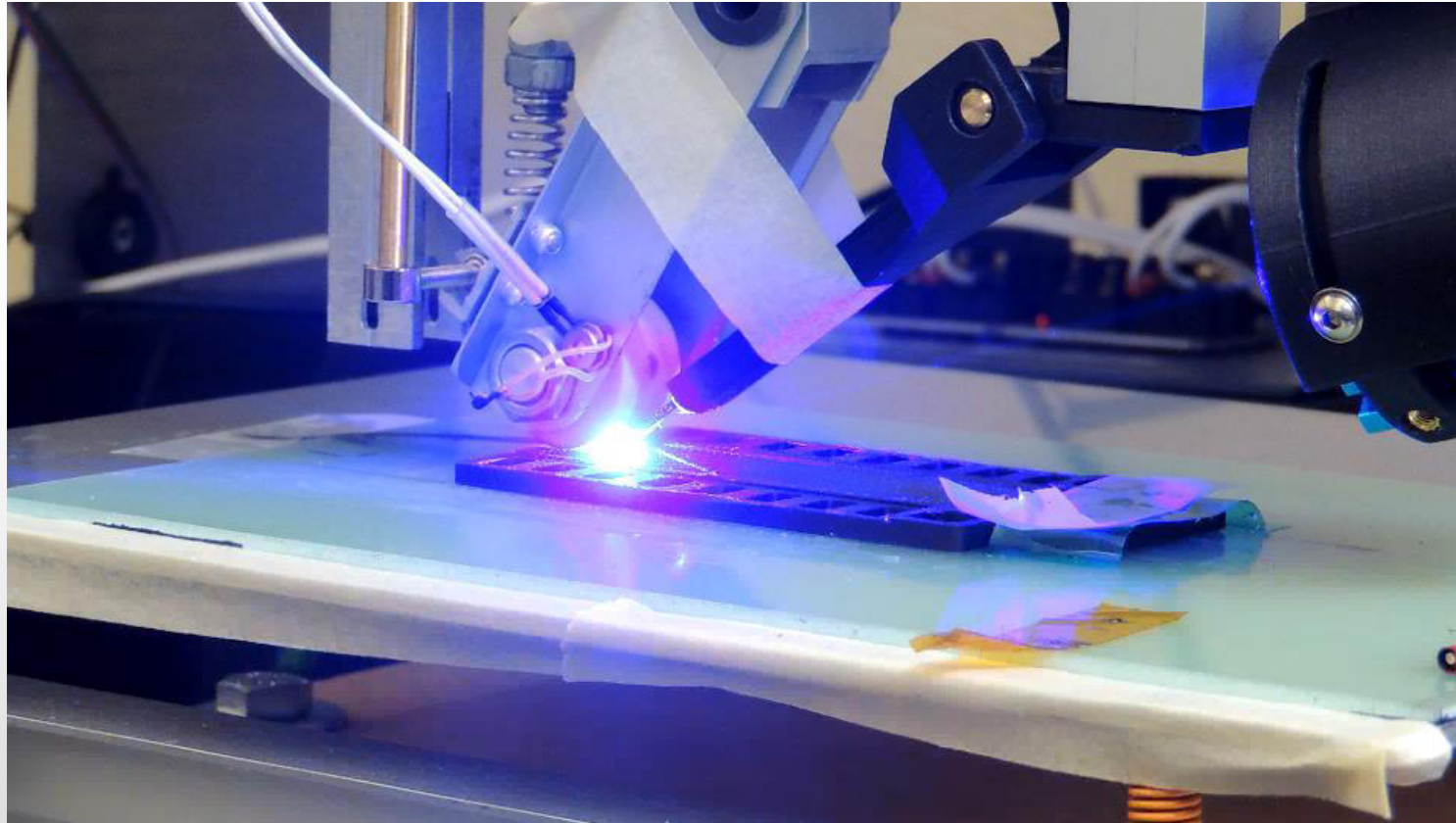
Fügen mit Laserunterstützung

- Das CFP-Filament zerfällt bei hohen Temperaturen, daher ist der Einsatz einer zusätzlichen Wärmequelle unerlässlich
- Bei der Hydra4 wird ein Laser mit 445nm und 2,5 W eingesetzt

- Vorder- und Rückseite einer Probe
- Die Basis ist ein 3D gedrucktes Substrat mit 1mm Dicke
Aufgeschweißt wurde ein Tape mit 3mm Breite und 300 µm Dicke
- die Schweißverbindung ist exzellent
- auf der Rückseite sind keine Spuren der Verweißung zu erkennen
- am Rand kann man deutlich ausgetretenes Schweißgut erkennen
- Matrixmaterial in beiden Fällen PA6



Verschweißen von PA6-Substrat mit Laser

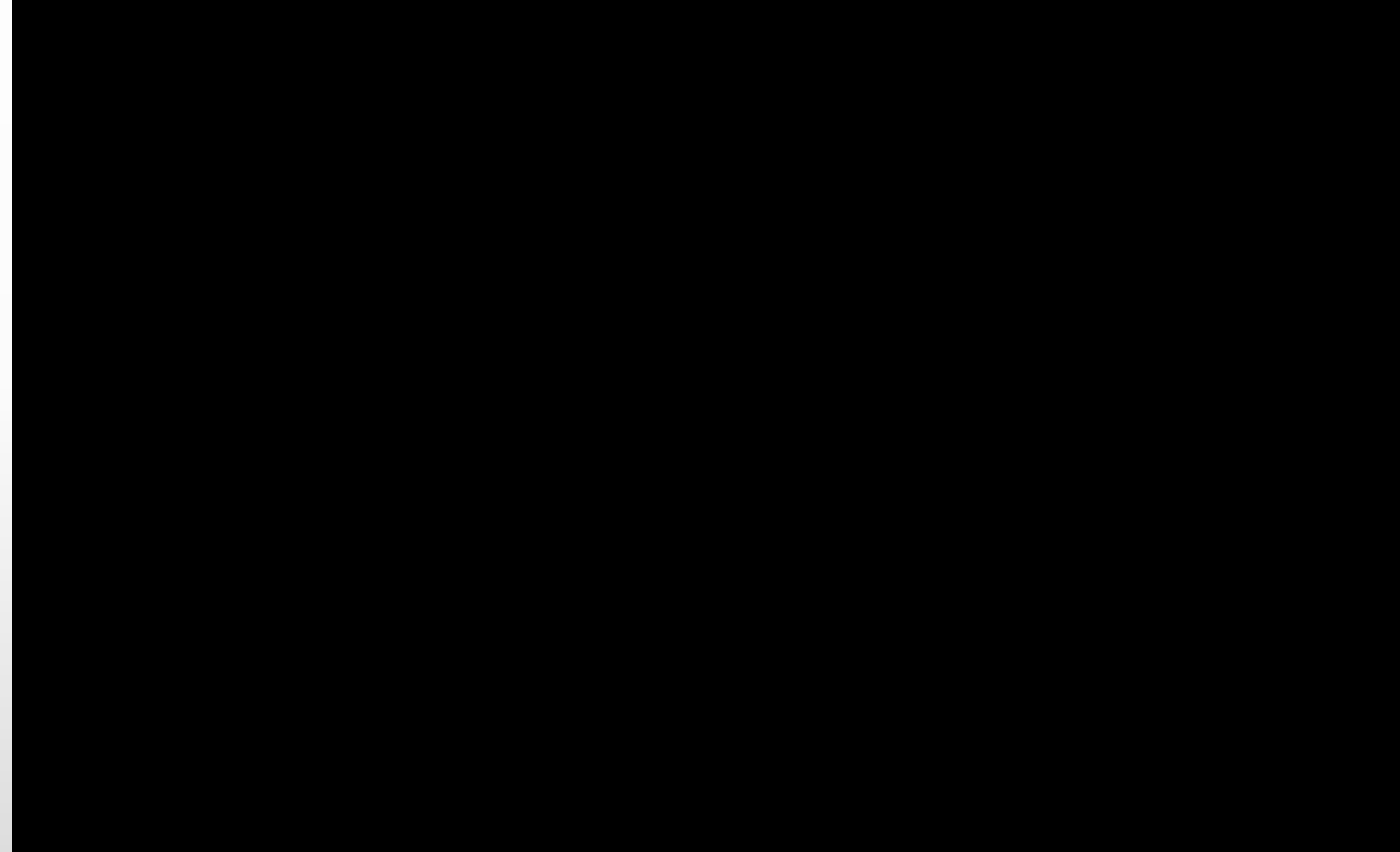




Ablauf zur Faserbelegung

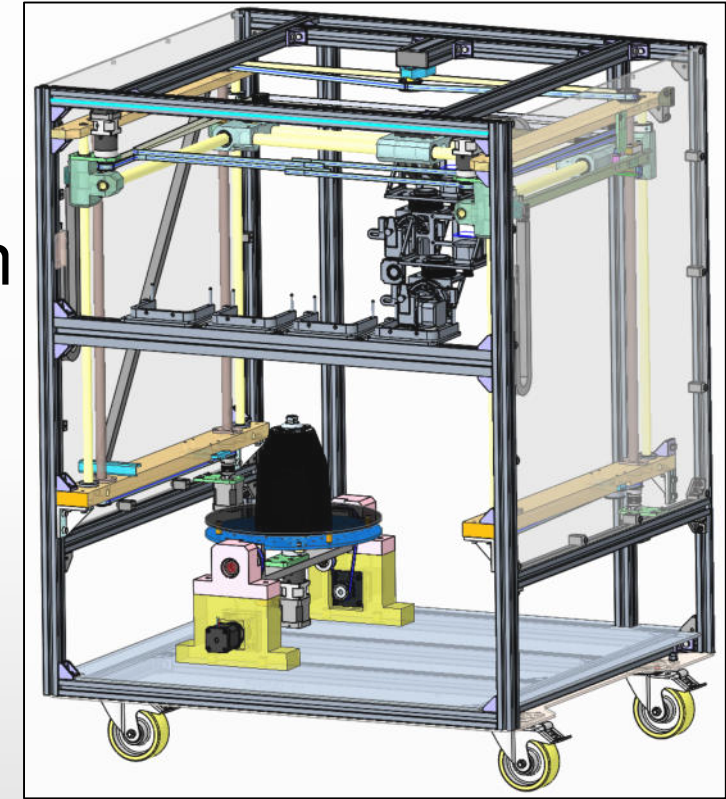
- Labormuster Hydra3D,
Belegung des
Greiferarms mit CFP

Quelle: FBZ



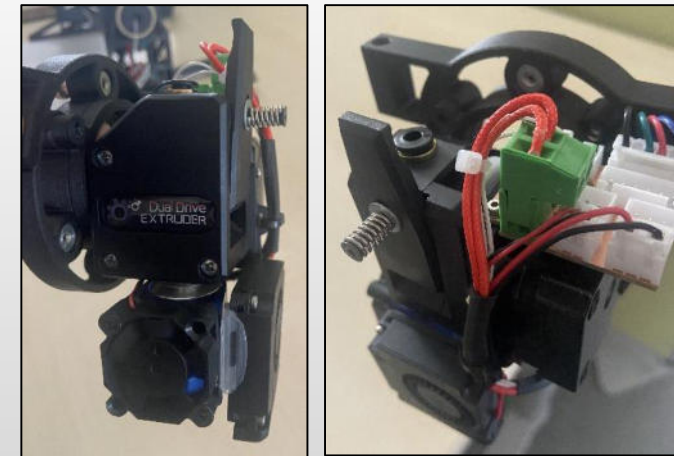
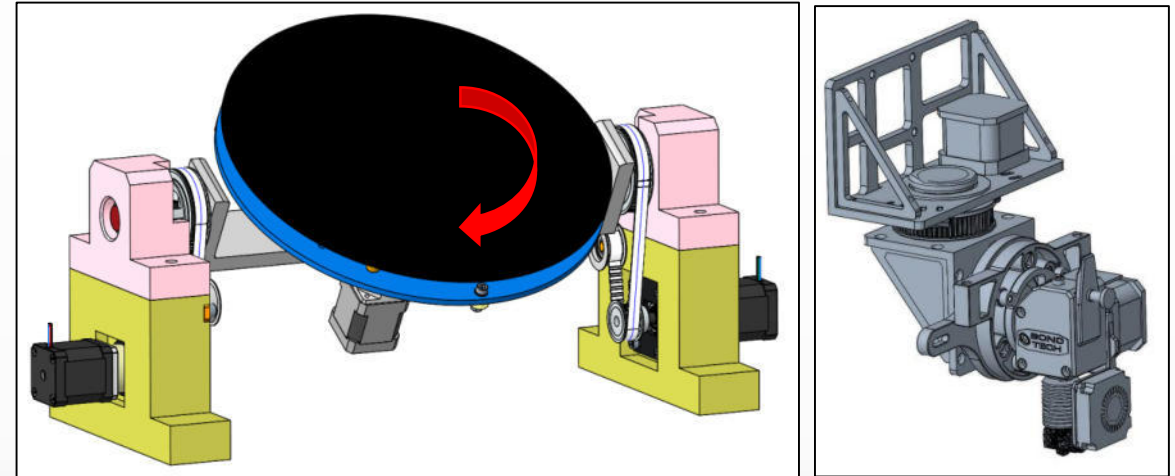
Was ist die Hydra4?

- Hybridmaschine für technische Bauteile
- mittels AM-Technologie soll es möglich sein, Leichtbauprodukte mit Endlosfasern herzustellen
- Mehr-Achs 3D-Drucker für faserverstärkte Bauteile
- Abmaße: 900x800x max.1900 mm (LxBxH)
- EMV sicher
- Integration von Scantechnik für Einmessungen und Baufortschrittskontrolle

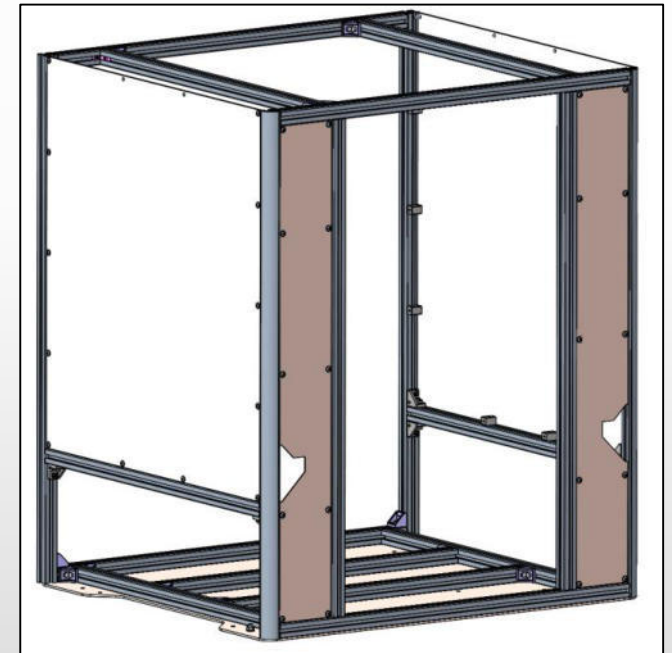


Konzipierung der mechanischen Grundkonstruktion

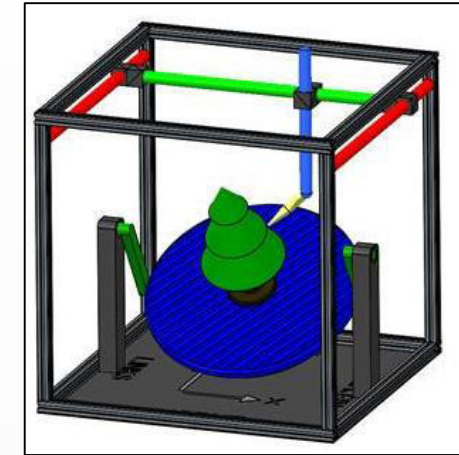
- Mehr-Achs 3D-Drucker
 - 3 translatorische Achsen (X, Y, Z)
 - 3 rotatorische Achsen (A,B,C)
- 4-fach WKZ-Wechselvorrichtung
- Extruder für verschiedene Materialien



- **Materialien:**
 - Supportfilament
 - Unverstärktes Filament
 - Faserverstärktes Filament
 - Weichkomponente
- **steifes Grundgestell**
- **Blickdichte Schutzumhausung**



- Einarbeitung eines Nullpunkt-Spannsystems
- thermische Glättung
- Integration der Soft- und Hardware Komponenten





Zusammenfassung

- Ziel ist die Herstellung hochfester, leichter Bauteile
- Verfahren soll vergleichbar oder besser als die bisher händisch angefertigte Carbonfertigung sein:
 - Maßhaltigkeit
 - Sicherheit
 - Kostenherstellung
 - Herstellungszeit
- Integration von Verbindungsbauteilen

Das Herstellungsverfahren sowie die daraus entstehenden Produkte müssen dem Produktmedizingesetz entsprechen!



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Forschungs- und Beratungszentrum
für Maschinen- und Energiesysteme e.V. (FBZ)
An- Institut an der Hochschule Merseburg



Session 5: Post- Processing und Folgeverfahren

**UV-Schutz additiv gefertigter Bauteile durch
Versiegelung**

Daniel Flachsenberg,
Diamant Polymer GmbH

**UV Schutz additiv
gefertigter Bauteile
durch Versiegelung**

Daniel Flachsenberg
DIAMANT Polymer GmbH



- 1** Über DIAMANT
- 2** Warum versiegeln?
- 3** Wie wird versiegelt?
- 4** Wie wirkt die Versiegelung?
- 5** Welche Eigenschaften können mit Versiegelung realisiert werden?

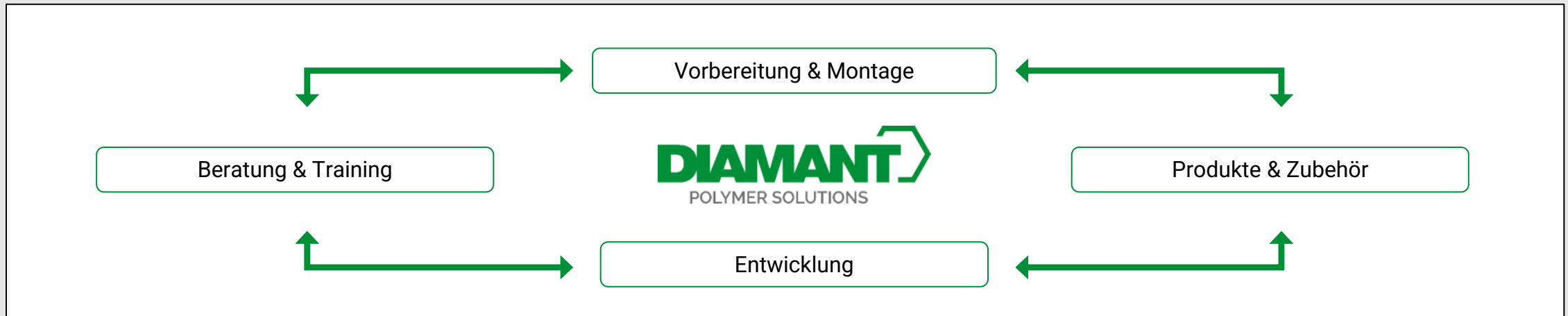
Tradition, Begeisterung, Innovation



Das ist DIAMANT



Über uns



Gießerei & Automobilindustrie

Lunkerreparatur
Imprägnierung

Maschinenbau

Gleitbeläge
Justiermaterialien
Dichtungsmaterialien

Additive Fertigung

Infiltration/Imprägnierung
Funktionelle Vergussmasse

Stahl- und Brückenbau

Spaltausgleich
Form- und Kraftschlüssige Verbindungen
Das flüssige Futterblech®

Thermisches Spritzen

Korrosionsschutz
Antihaftung
Elektrische Isolierung

Warum versiegeln?



Material und Druckverfahren

Umgebungsbedingungen

Verwendung

Dichtigkeit

Ausbleichen

Vergilben

Verspröden

Warum versiegeln?

Wie funktioniert ein Versiegler?

Trockenfilmdicke:
4 – 50 µm



Einflussgrößen auf die Eindringtiefe:

- Zeit
- Porosität (Porengröße und –häufigkeit)
- Viskosität
- Temperatur



1

Anwendungsgebiete:

- Imprägnierung und Versiegelung von porösen additiv gefertigten Bauteilen
- Für Polymere, Metalle und Keramiken
- Für die meisten Druckverfahren wie SLS, FDM, MJF, SLA, LPBF geeignet

2

Auftragsmöglichkeiten:

- Tauchen
- Pinseln
- Sprühen
- Injizieren

3

Vorteile:

- Gebrauchsfertige 1-Komponenten Systeme
- Farblos nach dem Aushärten
- Verlängerung der Bauteillebensdauer
- Herstellung mediendichter Bauteile bei geringen Wandstärken

Sie haben kleine Poren (< 0,1mm)?
dichtol AM



Sie haben größere Poren (0,1 – 0,5mm)?
dichtol AM Makro



Sie benötigen zusätzlichen UV Schutz?
dichtol AM UV Protection

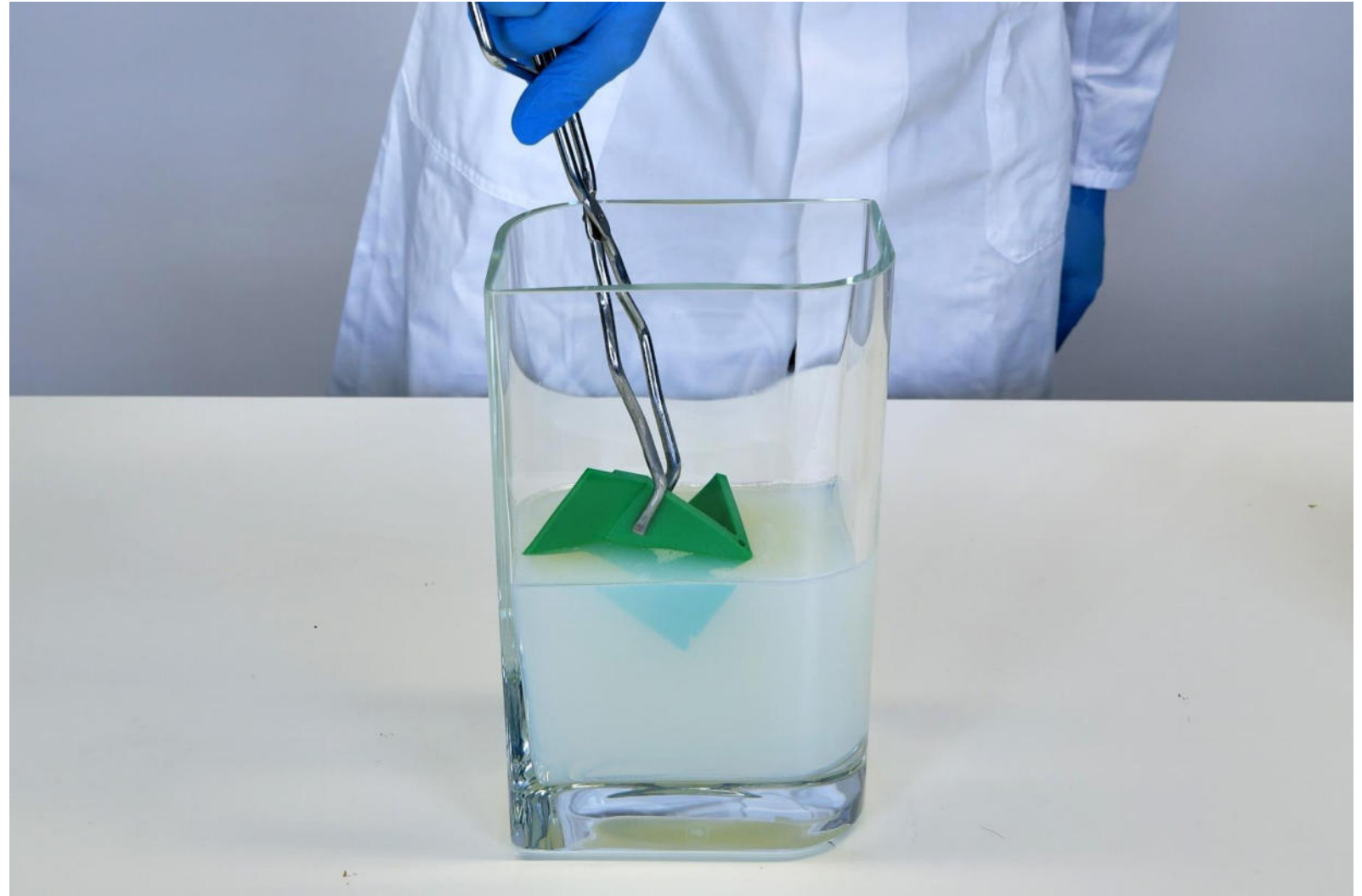


Sie wollen keine organischen Lösemittel?
dichtol AM Hydro



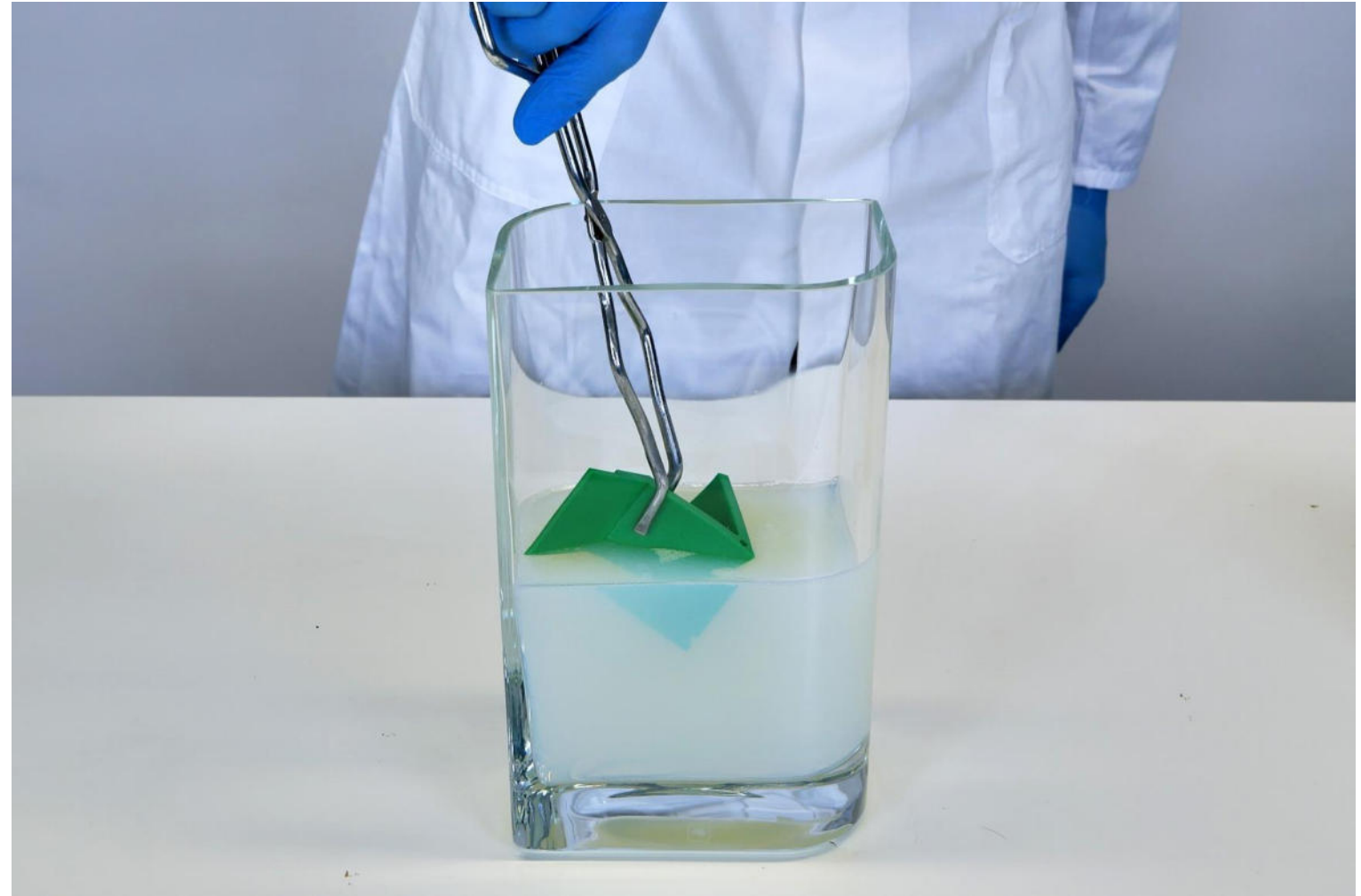
Wie wird versiegelt?

Video: Wasserdichte 3D-Drucke:
So gelingen schöne
Oberflächen mit dichtol



Applikation - Tauchen

1. Verwenden Sie einen geeigneten Behälter
2. Füllen Sie eine ausreichende Menge des dichtol hinein
3. Legen Sie die zu versiegelnden Bauteile in den Behälter
4. Lassen Sie das dichtol über die benötigte Zeit infiltrieren
5. Nehmen Sie die Bauteile heraus
6. Lassen Sie den Versiegler aushärten



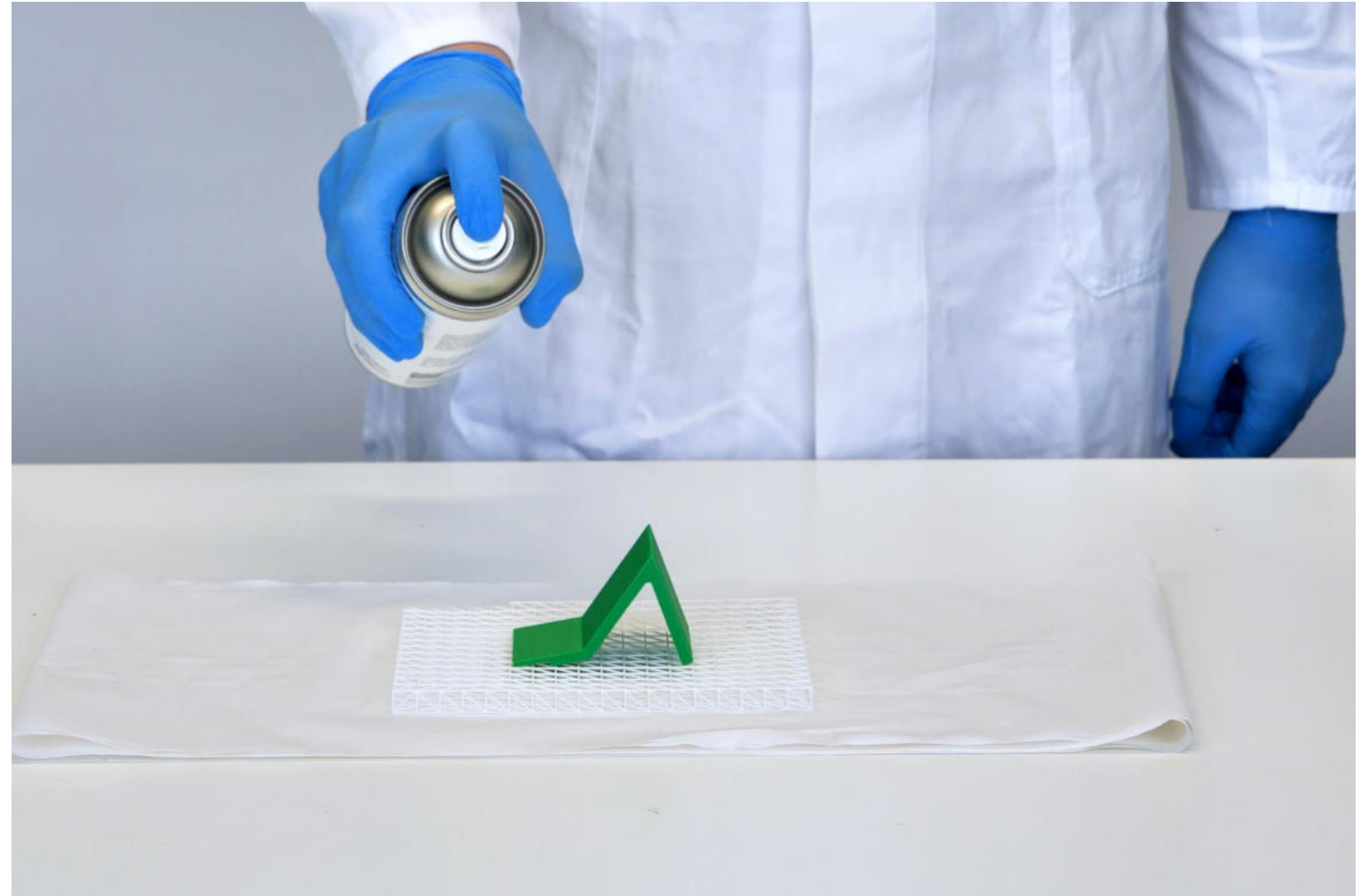
Applikation - Pinseln

1. Verwenden Sie einen geeigneten Pinsel
2. Füllen Sie ggf. die benötigte Menge dichtol in einen geeigneten Behälter ab
3. Pinseln Sie das Bauteil ein
4. Streichen Sie mehrmals drüber, damit das Bauteil für mehrere Minuten feucht bleibt
5. Lassen Sie den Versiegler aushärten



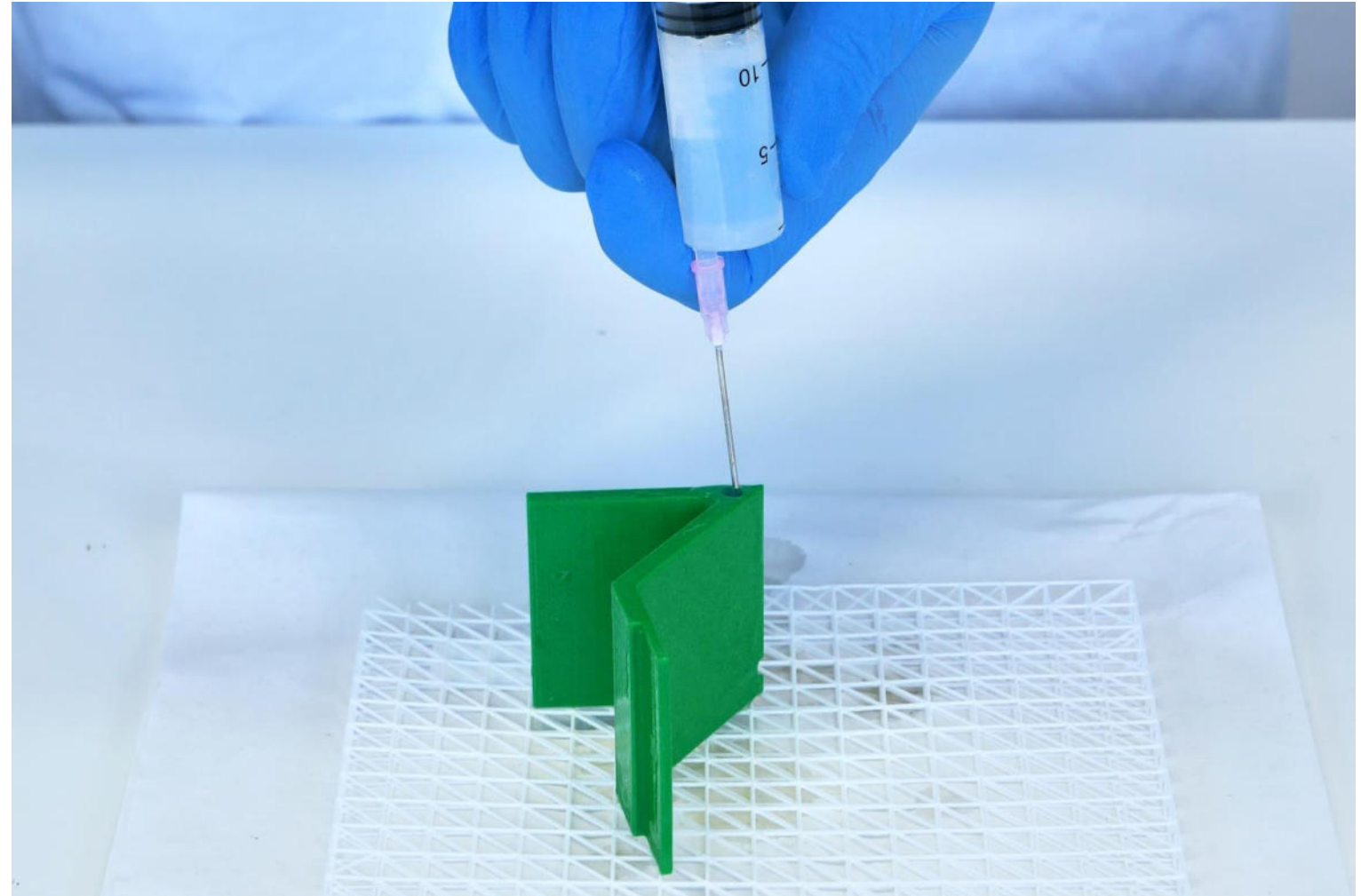
Applikation - Sprühen

1. Verwenden Sie in der Sprühflasche erhältliche Produkte oder verwenden Sie eine Spritzpistole
2. Sprühen Sie das dichtol auf das Bauteil
3. Sprühen Sie mehrfach auf, damit die Oberfläche für mehrere Minuten feucht bleibt
4. Lassen Sie den Versiegler aushärten



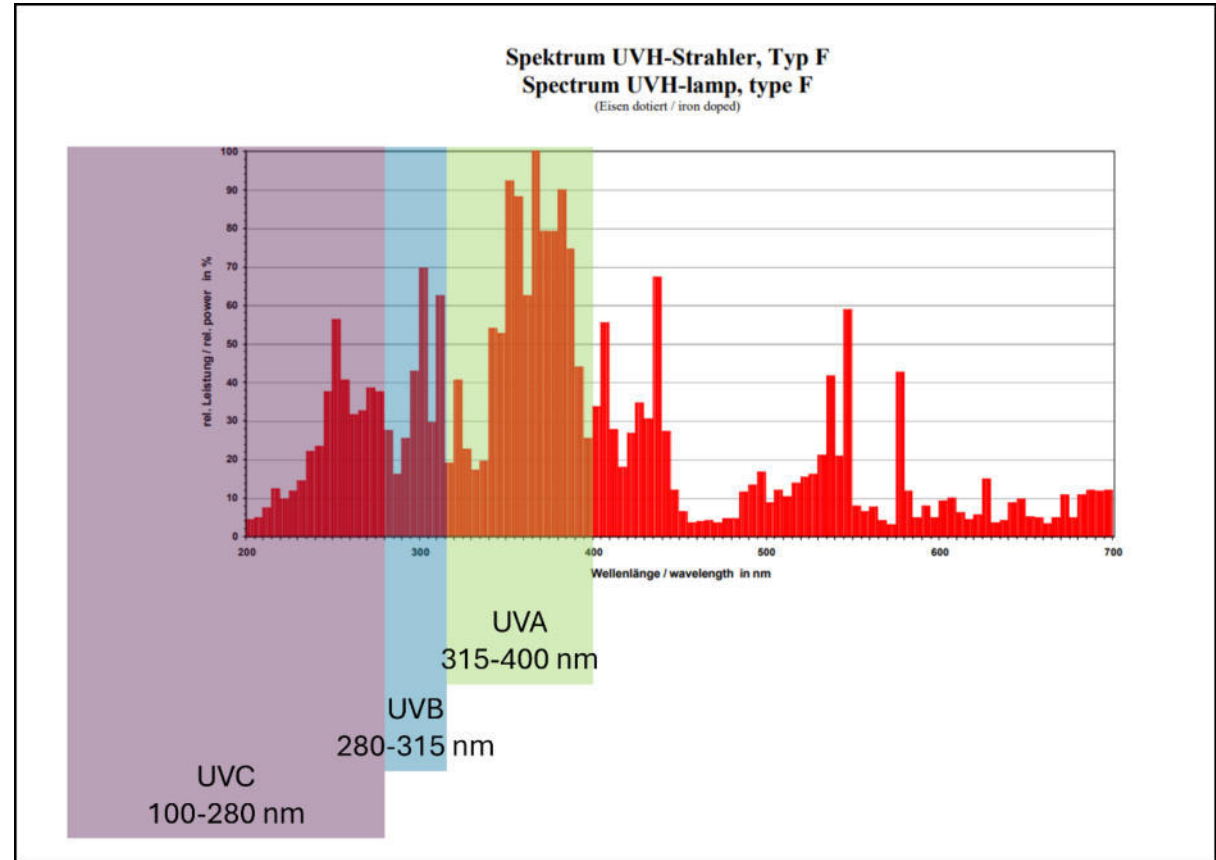
Applikation - Injektion

1. Nehmen Sie eine Spritze und ziehen diese mit dichtol auf
2. Füllen Sie das dichtol in schwer zu erreichende Kavitäten
3. Lassen Sie das dichtol für eine ausreichende Zeit infiltrieren
4. Schütten Sie das überstehende dichtol ab
5. Lassen Sie den Versiegler aushärten



Simulation des UV-Schutzes

- Effekt der UV-Belastung für 1 Jahr simuliert
- Annahmen:
 - *UV-Index = 4 (mittel)*
 - *Anzahl der Sonnenstunden = 2.000*
 - *Resultierende Belastung = 720 kJ/m² = 0,2 kWh/m²*
- UV-Lampe:
 - *Emissionsspektrum der verwendeten UV-Lampe an Sonnenstrahlung in Erdnähe angenähert*
 - *Nennleistung = 800 mW/cm²*
- UV-Belastung für 1 Jahr wird durch Bestrahlung für 2,5 Stunden simuliert



UV-Schutz durch Versiegelung

Ergebnisse – vor der Belichtung



ohne Versiegelung



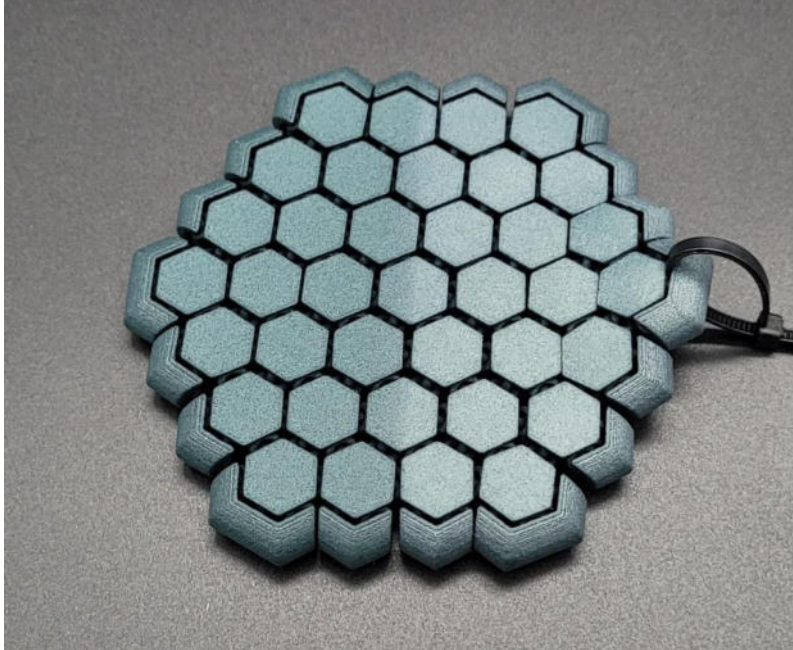
mit dichtol AM



mit dichtol AM UV Protection

UV-Schutz durch Versiegelung

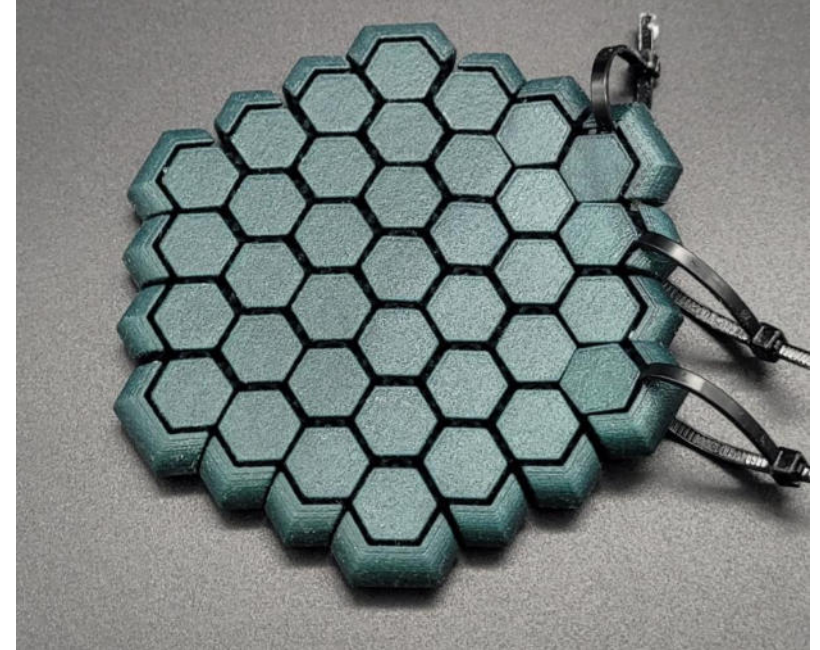
Ergebnisse – nach der Belichtung



ohne Versiegelung



mit dichtsol AM



mit dichtsol AM UV Protection

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Welche Anwendungen können mit einer Versiegelung realisiert werden?

- Schutz von Material und Farben vor dem Ausbleichen, Vergilbung und Versprödung durch UV-Strahlung
- Schutz vor Wasseraufnahme
- Abdichtung medienführender Bauteile gegen Flüssigkeiten und Gase
- Verbesserung der chemischen Beständigkeit
- Kombination aus Versiegelung und Färbung
- Elektrische Ableitfähigkeit (Kunststoffe)
- Elektrische Isolation (Metalle)
- Korrosionsschutz

Welche Eigenschaften benötigen Sie für Ihre Anwendung?



Kontakt

DANIEL FLACHSENBERG
Key Account Manager

DIAMANT Polymer GmbH
Marie-Bernays-Ring 3a
41199 Mönchengladbach



☎ +49 2166 9836 – 26

☎ +49 171 10 96 777

✉ daniel.flachsenberg@diamant-polymer.de

🌐 www.diamant-polymer.de



Session 5: Post-Processing und Folgeverfahren

Warum ist Post-Processing bei dem 3D-Druck unerlässlich?

Ingrid Prestien,
Cipres GmbH

Die entscheidende Rolle des Post-Processings im 3D-Druck von Kunststoffteilen

Wie Nachbearbeitung die Qualität und Effizienz in der additiven Fertigung steigert

Ingrid Prestien / CIPRES GmbH

16.10.2024



Ingrid Prestien

CIPRES GmbH

Mit über 28 Jahren Erfahrung in der additiven Fertigung, davon über 8 Jahre bei EOS

Seit 2006 leite ich bei CIPRES die Serienproduktion und habe erfolgreich das Färben von AM-Produkten eingeführt.

Zu meinen Tätigkeitsschwerpunkten zählen:

- Administrative Führung
- Produktions-Workflow-Optimierung
- Entwicklung von Farbtechniken, Farbeinheiten und Farbrezepturen
- Implementierung von Post-Processing-Lösungen, die den Mehrwert von Bauteilen steigern, darunter Glättung, Infiltration, UV-Schutz, Flammenschutz und Zertifizierung.



Wer ist CIPRES?

Gründung 2004 als Dienstleister für Prototypen.

2006 begann die Serienproduktion von Endprodukten durch das Einfärben von SLS-Komponenten.

Sind Vorreiter des Farbprozesses und führender Dienstleister auf diesem Gebiet.

Fokus heute:

- Verkauf von Färbe- und Finishmaschinen
- Weiterentwicklung von Farbtechniken und Farberezepturen
- Lösungen für Oberflächenveredelung
- Automatisierung der Serienproduktion mit AM (Additive Manufacturing)
- Stärke des Unternehmens
- Herstellung von kleinen Produktchargen zu wettbewerbsfähigen Preisen



Quelle: www.eos.info
2007 CIPRES erstellt

Problematische Oberflächen ohne Post-Processing

- Raue Oberflächen und sichtbare Schichtlinien
- Ungenügende Maßhaltigkeit und Passgenauigkeit
- Schwache mechanische Eigenschaften und Haltbarkeit
- Schlechte optische Qualität (ästhetisch unattraktiv)

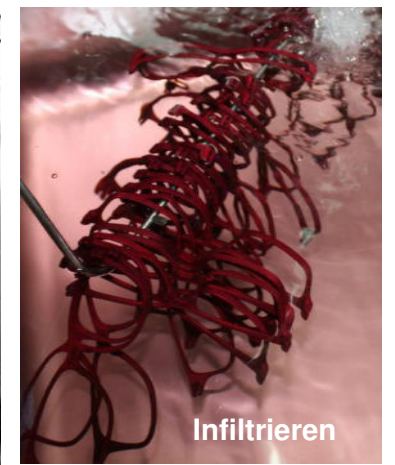
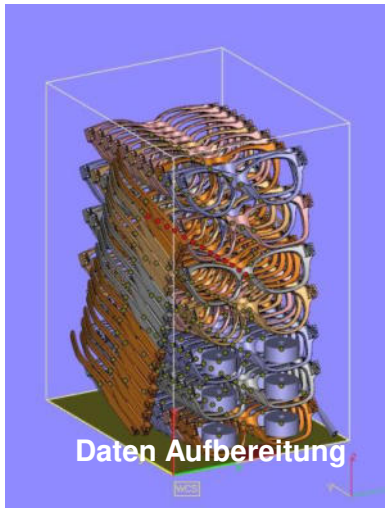


Problematische Oberflächen ohne Post-Processing

- Ohne Nachbearbeitung sind Teile oft nur für Prototypen geeignet
- Qualität und Ästhetik genügen nicht für den Verkauf als Endprodukt
- Post-Processing als kosten- und zeitintensive Herausforderung



„Lohnt es sich, trotz des Aufwands in Post-Processing zu investieren?“



Warum Post-Processing den Unterschied macht

- **Erhöhte Verkaufsfähigkeit**

Teile werden durch Nachbearbeitung zu marktfähigen Produkten

- **Wertsteigerung durch Qualität**

Bessere Gewinnmargen durch erstklassige Oberflächen und Passgenauigkeit

- **Erweiterung der Anwendungsbereiche**

Post-Processing macht den Schritt von Prototypen zu verkaufsfertigen Kleinserien möglich

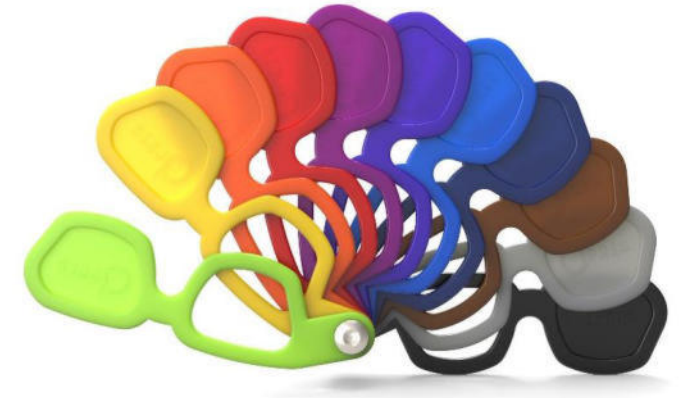
- **Kundenspezifische Anpassungen**

Post-Processing erlaubt personalisierte, maßgeschneiderte Produkte für Nischenmärkte



Post-Processing in der Brillenproduktion

- **Hohe Anforderungen an Passform und Ästhetik:**
Perfekte Oberflächen, Farbgebung und Maßhaltigkeit sind entscheidend
- **Wertschöpfung durch Nachbearbeitung**
Ein nachbearbeitetes Brillengestell kann deutlich höhere Verkaufspreise erzielen
- **Erweiterung der Anwendungsbereiche**
Post-Processing macht den Schritt von Prototypen zu verkaufsfertigen Kleinserien möglich
- **Serienproduktion mit individuellem Touch**
Automatisiertes Post-Processing ermöglicht individualisierte Brillen für Nischenmärkte



Post-Processing – Herausforderung

Ebenso vielfältig wie das Spektrum additiv gefertigter Bauteile sind die Anforderungen an die Oberfläche der Werkstücke.

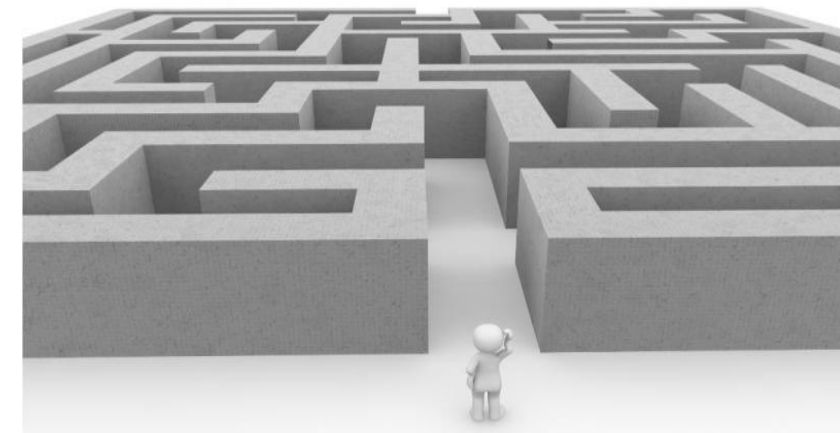
Dies erfordert eine anwendungsspezifisch angepasste Bearbeitung mit reproduzierbarem Ergebnis:

- Auspacken
- Entpulvern
- Entfernen von Stützstrukturen
- Homogenisieren
- Glätten der Oberfläche
- Polieren
- Färben

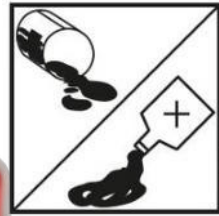


Wechselnde Anforderungen beim Post-Processing

- Wechselnde Anforderungen beim Post-Processing in Abhängigkeit der Branche
- Anforderungen erst durch eine Vielzahl von Nachbearbeitungsprozessen erreichbar
- (Farbton, Haptik, UV-Resistenz, Rauheit, Matt oder Glanz, Luftdicht, V02)
- Kombinationen von mehreren Arbeitsschritten erforderlich
- Verschiedene Materialien, unterschiedliche Verarbeitung
- Keine überwachten Standards
- Hohe Investitionskosten für Post-Processing
- Stabilität in Bezug auf Abmessungen, Dichte und Festigkeit
- Prozesskontrolle für die Einhaltung der Reproduzierbarkeit der Bauteile
- Beherrschung der Nachbearbeitungstechniken für die beste Oberflächenqualität



Weitere Anforderungen



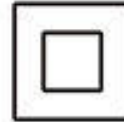
Resistent gegen Flecken, Haushaltschemikalien



staubdicht



wasserdicht



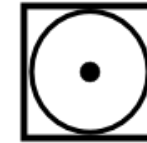
schutzisoliert (Schutzklasse II)



Brandprüfung gem. DIN 4102



spritzwassergeschützt



Hygienisch



Abriebfest/ Druckfest



explosiongeschützte, baumustergeprüfte Betriebsmittel



Automatisiertes Post-Processing: Effizienz und Skalierbarkeit

- **Reduktion der Arbeitskosten:**

Automatisierte Nachbearbeitungsprozesse minimieren den manuellen Aufwand

- **Schnellere Produktionszeiten:**

Automatisierung ermöglicht die schnelle Bearbeitung von Kleinserien

- **Wettbewerbsfähigkeit erhöhen:**

Automatisiertes Post-Processing macht kleine Serien rentabel



Integration von Post-Processing

3D-Druck und Nachbearbeitung verschmelzen zu einem nahtlosen Prozess Post-Processing

AM Solutions – Ihr One-Stop-Partner auf dem Weg zur perfekten Oberfläche



Werkstück im Pulverbett



Werkstück nach dem Entpulvern

Step 1

Entpulvern:

HP 3D Automatic Unpacking Station
(powered by AM Solutions)

- Einfache Übergabe des Druckjobs sowie sämtlicher dazugehöriger Druckdaten
- Automatisiertes, bauteilspezifisches Entpulvern ohne jeglichen Pulverkontakt
- Deutlich reduzierter Materialeinsatz dank maximaler Pulverrückgewinnung



Entpulvern/Auspacken/Polieren

Step 2

Reinigen:
AM Solutions S1

- Sicheres und ergonomisches Arbeiten
- Automatischer Strahlprozess mit optimalen und reproduzierbaren Ergebnissen
- Wirtschaftlicher Strahlmitteleinsatz dank integrierter Aufbereitungseinheit



S1 – DIE 2-IN-1-LÖSUNG



Werkstück nach dem Strahlprozess

Step 3

Glätten:
AM Solutions M1 Basic

- Einfache Bedienung und höchste Reproduzierbarkeit
- Schnelle und gleichzeitige Bearbeitung unterschiedlicher Bauteile
- Perfekte Oberfläche auf konstant hohem Niveau

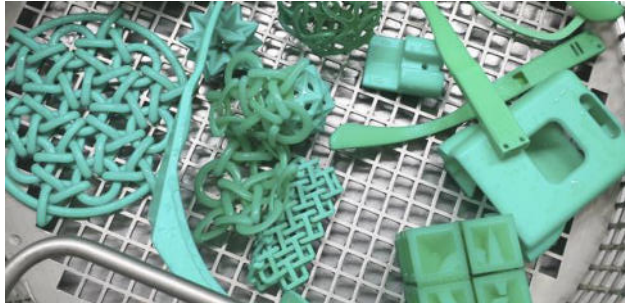


Werkstück nach dem Oberflächenfinish

Kleine Serien als Endprodukte für Nischenmärkte werden dank fortschrittlichem Post-Processing immer attraktiver



Fortschritte bei Kunststoffen verbessern die Qualität von 3D-Drucken, reduzieren den Nachbearbeitungsaufwand





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Ingrid Prestien

CIPRES GmbH

Ingrid.prestien@cipres.biz

Session 5: Post- Processing und Folgeverfahren

**Untersuchungen zu Abtragsmechanismen beim
Plasmapolieren**

Paul Geßner,
Hochschule Anhalt

Untersuchungen zu Abtragsmechanismen beim Plasmapolieren

Geißner, P.; Landenberger, D.; Bagdahn, J.
Hochschule Anhalt

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Optimierung des Plasmapolierverfahrens untersucht, um sowohl hohe Abtragsraten als auch eine gleichmäßige Politur zu erzielen. Ein zentrales Augenmerk liegt auf der Vermeidung von Gasblasenansammlungen, da diese die Abtragsrate erheblich beeinflussen können. Es hat sich gezeigt, dass eine zusätzliche Anströmung des Elektrolyten die Abtragsrate signifikant erhöht. Daher ist es essenziell, eine effektive Umströmung des Werkstücks sicherzustellen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die vertikale Ausrichtung relevanter Flächen, um den Materialabtrag zu beschleunigen.

1 Grundlagen des Plasmapolierens

Werkstücke mit komplexen Geometrien wie Hinterschneidungen oder Hohlräumen lassen sich häufig nur mit additiven Verfahren fertigen. Die durch das genannte Verfahren hergestellten Werkstücke können meist nicht ohne Nachbearbeitung eingesetzt werden, da die Oberfläche vergleichsweise rau ist. Um geringe Rauheitskennwerte zu erreichen, ist deshalb der Einsatz von ergänzenden Fertigungsverfahren erforderlich. Eine Möglichkeit zur Nachbearbeitung ist das Plasmapolieren.

In der DIN 8580 (siehe Tabelle 1) werden Fertigungsverfahren systematisch klassifiziert. Die additive Fertigung wird in die erste Fertigungshauptgruppe eingeordnet. Diese Verfahren schaffen neue Werkstücke durch das Fügen von Material, oft Schicht für Schicht, direkt aus digitalen Modellen. Im Gegensatz dazu gehört das Plasmapolieren zu den abtragenden Verfahren, welche in die dritte Hauptgruppe Trennen einzuordnen sind.

Tabelle 1: DIN 8580 [DIN22]

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		
Hauptgruppe 1 Urformen	Hauptgruppe 2 Umformen	Hauptgruppe 3 Trennen	Hauptgruppe 4 Fügen	Hauptgruppe 5 Beschichten	Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaften ändern

Beim Plasmapolieren, das dem elektrochemischen Oberflächenabtragen nach DIN 8590 [DIN03] zugeordnet werden kann, wird das Werkstück als Anode geschaltet und positiv gepolt. Das Verfahren basiert wie das Elektropolieren auf der anodischen Metallauflösung, wobei sich Anode und Kathode in einem Elektrolyten befinden. Im Gegensatz zum klassischen Elektropolieren, bei dem mit Gleichspannungen bis ca. 40 V gearbeitet wird [MEY14, S. 1229], kommen beim Plasmapolieren Gleichspannungen im Bereich von 180 – 400 V [ZEI22] bzw. 280 – 320 V [BOE06] zum Einsatz.

Abhängig von der Elektrolytzusammensetzung und den Bearbeitungsparametern lassen sich zahlreiche metallische Werkstoffe plasmapolieren. Verbreitete Anwendung findet das Verfahren beispielsweise bei nichtrostenden Stählen [NES16].

Plasmapolieranlagen bestehen aus einem kathodisch geschalteten Polierbecken, in welches das Werkstück eintaucht (siehe Abbildung 1). Bis zum Entstehen eines stabilen Plasmas entstehen Stromspitzen, weshalb eine Eintauchbewegung gebräuchlich ist. Dadurch entsteht das Plasma zunächst nur auf begrenzten Flächen des Werkstücks. Als Elektrolyte können ungiftige, schwachkonzentrierte Salzlösungen eingesetzt werden, was einen Vorteil gegenüber dem klassischen Elektropolieren darstellt, bei dem meist mit hochkonzentrierten Säuren gearbeitet wird. Plasmapolieranlagen verfügen außerdem typischerweise über eine Beckenheizung, mit der der Elektrolyt auf 70 – 90 °C vortemperiert werden kann.

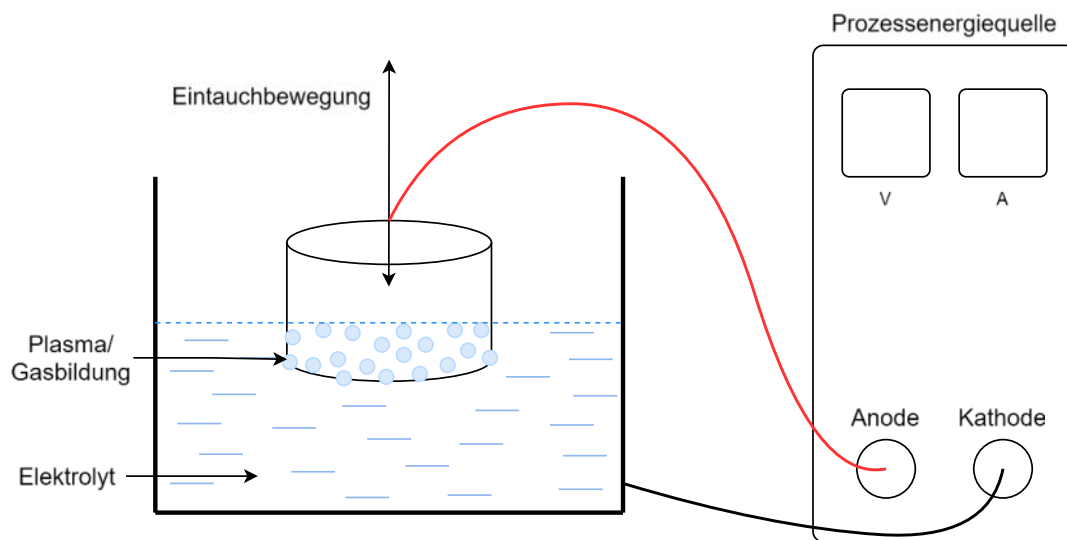


Abbildung 1: Schematischer Aufbau Plasmapolitur

Wichtige Prozessparameter, die das Polierergebnis beeinflussen, sind:

- Prozessspannung
- Elektrolyttemperatur
- Elektrolytzusammensetzung
 - Leitwert
 - pH-Wert
- Werkstückorientierung/Elektrolytströmung

Insbesondere die Werkstückorientierung soll in dieser Arbeit untersucht werden und Rückschlüsse auf die Gasströmung zulassen.

Die zu polierenden Werkstücke können verschiedenartig vorbearbeitet sein. Es ist beispielsweise möglich additiv nach dem LPBF-Verfahren (Laser Powder Bed Fusion) gefertigte Werkstücke direkt nach dem Reinigen bzw. Entfernen des Pulvers zu bearbeiten. Die folgende Abbildung 2 zeigt das Rauheitsprofil einer additiv gefertigten Werkstückprobe aus X5CrNiCuNb16-4 vor und nach dem Plasmapolieren. Die Probe wurde 10 min bei 340 V Prozessspannung und 70 °C Elektrolyttemperatur bearbeitet. Dadurch reduziert sich die Oberflächenrauheit von Ra 4,2 µm auf Ra 1,1 µm.

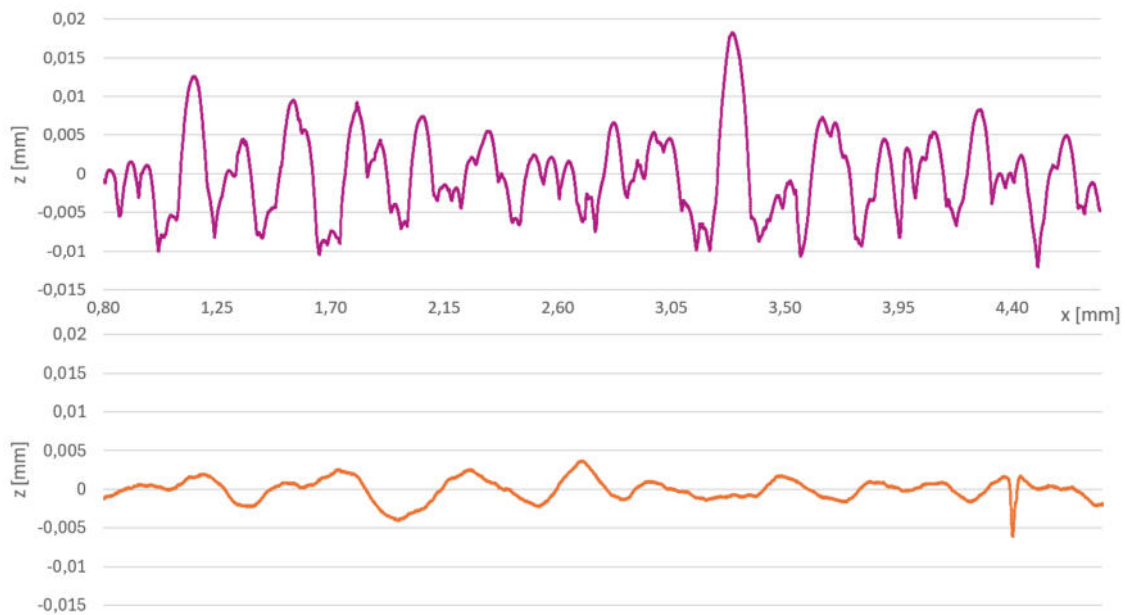


Abbildung 2: Rauheitsprofile, oben unbearbeitet - unten 10 min poliert

2 Forschungsstand der Untersuchungen

Durch die Gasbildung beim Plasmapolieren entsteht am Werkstück eine Strömung. Es wird angenommen, dass eine optimierte Strömung [COR20, S.28] den Materialabtrag begünstigen und somit eine glattere Oberflächenstruktur erzeugen kann. Besonders bei der Politur von Kavitäten deuten theoretische Modelle darauf hin, dass diese bis zu einer bestimmten Tiefe effizient durchgeführt werden kann. Zudem wird davon ausgegangen, dass das elektrische Feld einen Einfluss auf die maximal erreichbaren Poliertiefe hat [COR20, S.53]. Der Einfluss dieser Strömung auf den Materialabtrag und die Oberflächenqualität wurde bislang aber nicht gezielt untersucht.

Eine wichtige Fragestellung ist der Einfluss der Werkstückorientierung auf den Materialabtrag. Weiterhin zu untersuchen ist die Polierbarkeit von nach unten gerichteten Kavitäten. Hier ist zu klären, ob und ggf. wie das Plasma diese schwer zugänglichen Bereiche bearbeiten kann. Schließlich sind mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Abtragsleistung in Kavitäten zu untersuchen.

3 Versuchsaufbau – allgemeine Randbedingungen

Bei allen nachfolgend beschriebenen Versuchen wurden die Werkstücke aus nichtrostendem Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 (X5CrNi18-10) gefertigt. Das Elektrolytbecken hat ein Volumen von 300 Litern. Dieses Becken ist kathodisch gepolt und ermöglicht die Bearbeitung von Werkstücken mit einer maximalen Größe von $300 \times 500 \times 300 \text{ mm}^3$. Die experimentellen Bedingungen erlaubten eine Stromstärke von bis zu 150 Ampere bei einer Spannung von 400 Volt. Der Elektrolyt bestand aus einer 5 % Ammoniumsulfatlösung, die auf einen pH-Wert von 3,5 eingestellt wurde. Die Temperatur des Elektrolyten wurde auf 70 °C eingestellt. In Abbildung 3 ist das Elektrolytbecken mit dem in vertikaler Richtung beweglichen Werkstückträger sowie einem Werkstück dargestellt.

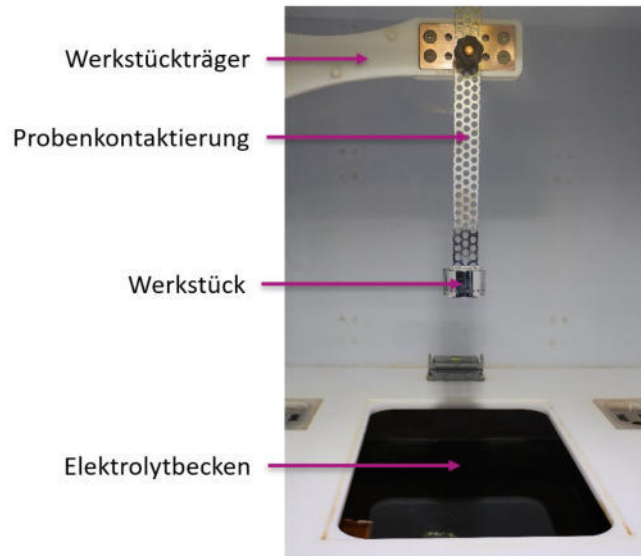


Abbildung 3: Versuchsaufbau - allgemein

4 Untersuchung von würfelförmigen Proben mit drei zu untersuchenden Flächen

Zur Untersuchung des Einflusses der Orientierung von Werkstücken im Elektrolyten wurden wie in Abbildung 4 dargestellt würfelförmige Werkstücke (Würfelproben) angefertigt. Die Werkstücke weisen drei senkerodierte Flächen auf, wobei ein Werkstück Taschen mit einer Tiefe von 3 mm und ein zweites Werkstück Taschen mit einer Tiefe von 0,2 mm besitzt. Das Senkerodieren erzeugt eine gleichmäßige Ausgangsoberfläche, deren Beschaffenheit unabhängig von der Bearbeitungsrichtung ist, wodurch die Materialabträge der Flächen miteinander vergleichbar sind.

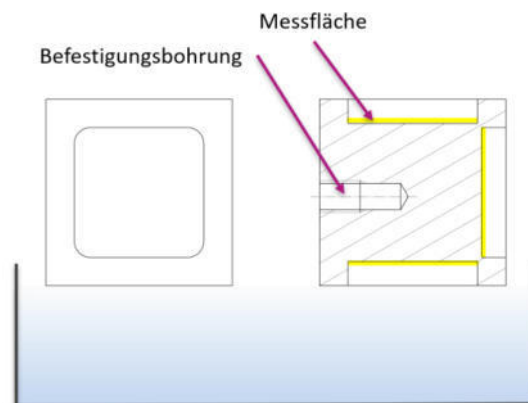


Abbildung 4: Versuchsaufbau Würfelprobe

Das Werkstück wird an der Befestigungsbohrung kontaktiert, wodurch sich drei Orientierungen der zu untersuchenden Flächen („Messflächen“) ergeben. Es wird angenommen, dass sich bei der nach unten gerichteten 3 mm tiefen Tasche entstehendes Gas in der Kavität ansammelt. Durch das angesammelte Gas wird eine Bearbeitung verhindert, wodurch die Rauheit kaum reduziert werden kann (siehe Abbildung 5, links). In den beiden anderen Orientierungen kann das Gas aus den Kavitäten wegströmen und es findet eine deutliche Rauheitsreduzierung statt. Im Gegensatz dazu werden bei der Probe mit 0,2 mm Taschentiefe alle drei Flächen bearbeitet (siehe Abbildung 5, rechts). Es zeigt sich, dass die vertikale Fläche die größte Rauheitsreduktion aufweist. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Effekt auf die Gastströmung zurückzuführen ist, da das Gas entlang der Fläche nach oben strömt und dabei eine Strömung erzeugt, die den Materialabtrag erhöht.

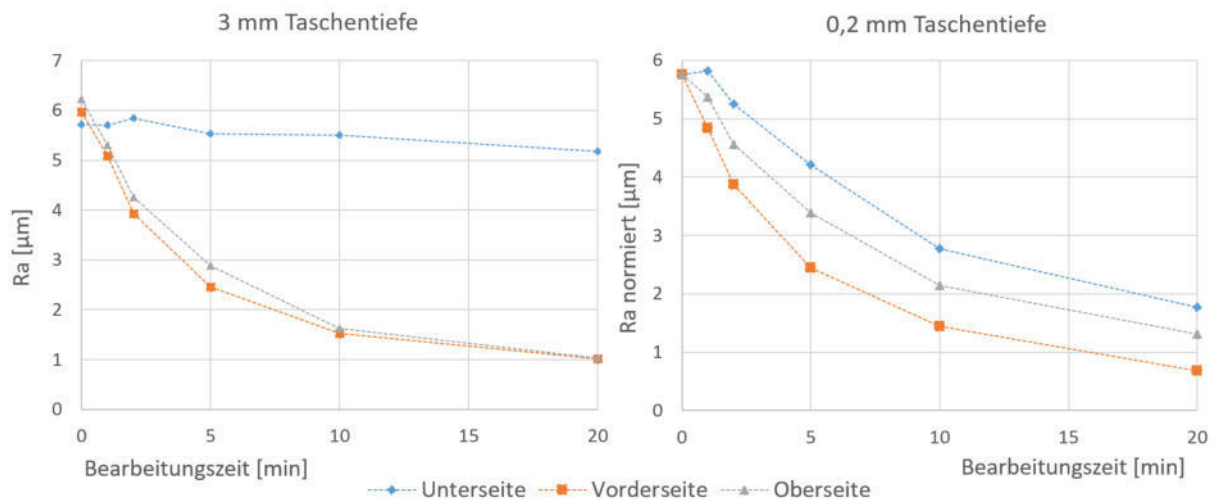


Abbildung 5: Diagramme Würfelprobe

5 Untersuchung von scheibenförmigen Proben mit einer zu untersuchenden Fläche

Bei den zuvor beschriebenen Untersuchungen befinden sich drei Flächen auf einem Werkstück. Alle drei Flächen werden zeitgleich bearbeitet. Es ist nicht möglich festzustellen, wie sich die Orientierung auf die Massenabnahme pro Zeiteinheit auswirkt. Deshalb wurde ein alternativer Versuchsaufbau entwickelt (siehe Abbildung 6). Das Ziel bestand darin, die Rauheits- und Massenabnahme für eine einzelne Fläche zu evaluieren. Zu diesem Zweck wurde ein Werkstückhalter mit einer flachen Sacklochbohrung gefertigt. Dieser Aufbau ermöglicht die Demontage des Werkstücks während der Zwischenschritte, um die Masse- und Rauheitswerte nach unterschiedlichen Bearbeitungszeiten zu erfassen. Durch eine Passungstoleranz H7/h7 mit einer maximalen Spaltbreite von 0,02 mm wird die Bildung eines Plasmas zwischen Werkstück und Werkstückhalter unterbunden. Eine Bearbeitung der Rückseite und der Umfangsfläche der Probe erfolgt nicht. Es wird lediglich die Stirnfläche bearbeitet, auf die sich die Versuchsauswertung bezieht.

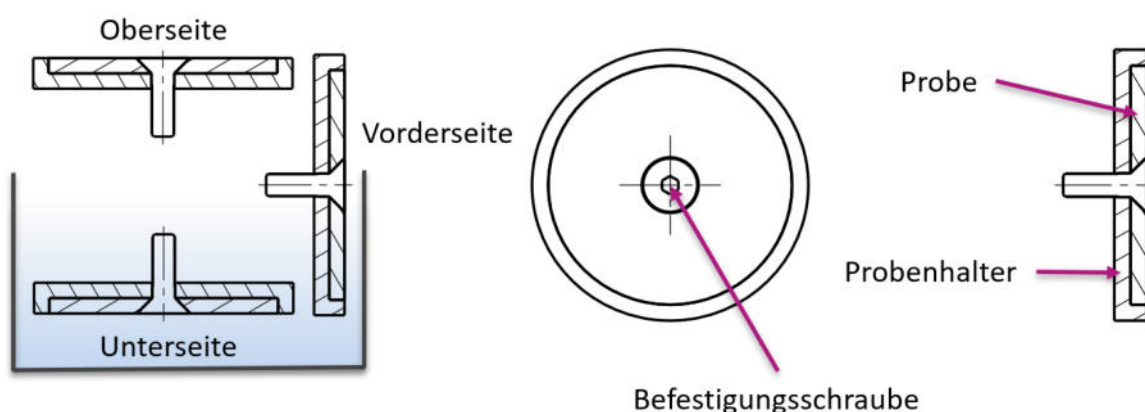


Abbildung 6: Gasströmung Scheibenprobe

Die Rauheit sowie die Massenabnahme wurden für die Ausrichtungen Unterseite, Vorderseite und Oberseite gemessen (siehe Abbildung 7). Die Massenabnahme ist bei allen drei Orientierungen nahezu linear. Im Gegensatz dazu ist die Rauheitsabnahme nicht konstant und tendiert gegen einen

Minimalwert, was zu regressiven Kurvenverläufen führt. Ähnlich wie bei der Würfelprobe zeigt sich, dass die Rauheitsreduzierung bei der vertikalen Ausrichtung (Vorderseite) am schnellsten erfolgt.

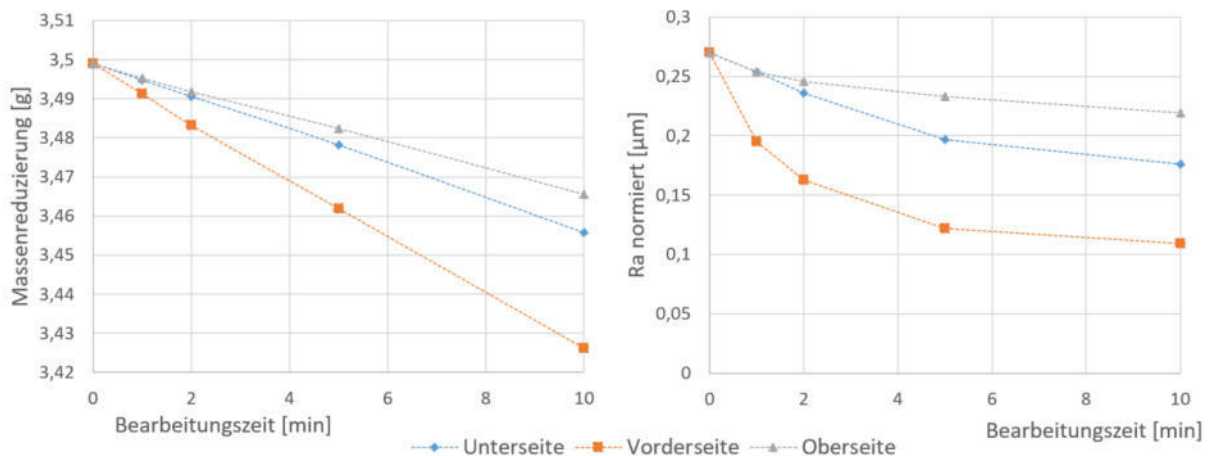


Abbildung 7: Diagramme Gasströmung Scheibenprobe

In den letzten fünf Minuten der Bearbeitungszeit lässt sich nur eine minimale Rauheitsreduzierung feststellen. Zum Festlegen einer praxistauglichen Bearbeitungszeit für die Rauheitsreduzierung kann werkstück- und orientierungsindividuell der Verlauf der Rauheitskurven herangezogen werden.

6 Untersuchung von scheibenförmigen Proben mit unterschiedlichen Taschentiefen

Zur Untersuchung wie sich die Tiefe einer Kavität auf die Bearbeitbarkeit auswirkt, wurden unterschiedlich tiefe, nach unten orientierte Taschen untersucht (siehe Abbildung 8). Zu diesem Zweck wurde ein spezieller Probenhalter gefertigt, der es ermöglicht, eine Scheibenprobe mit Sacklochgewindebohrung in verschiedenen Taschentiefen zu positionieren. Um die Vergleichbarkeit der Proben zu erhöhen, wurde die zu bearbeitende Probenoberfläche erodiert. Anschließend wurden mehrere seitlich versetzte Rauheitsmessungen durchgeführt und deren Mittelwerte gebildet.

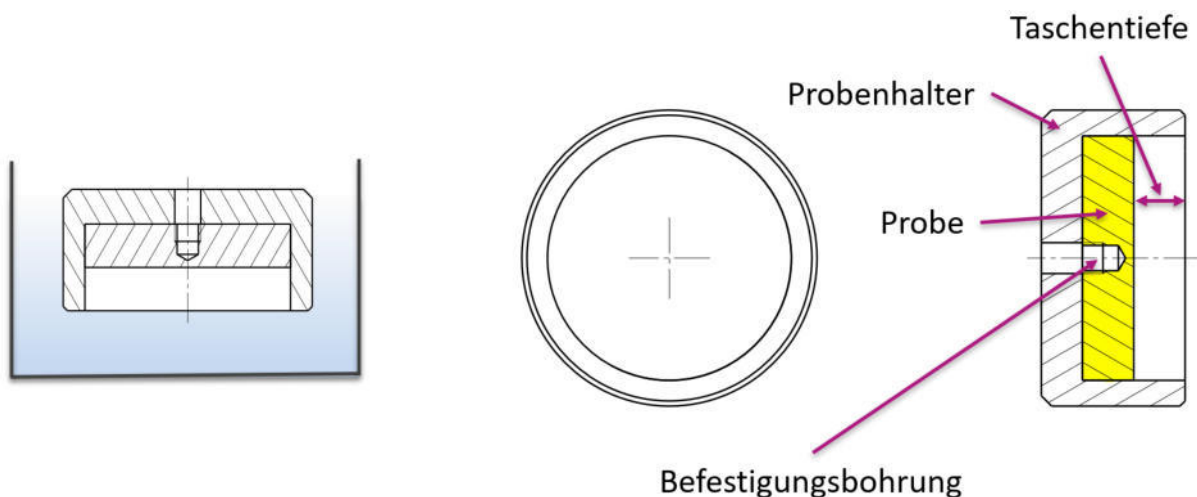


Abbildung 8: Taschenprobe

Die Taschentiefe wurde schrittweise gesteigert. Es ergaben sich die Taschentiefen 0 mm, 2,5 mm, 5 mm und 10 mm (siehe Abbildung 9).

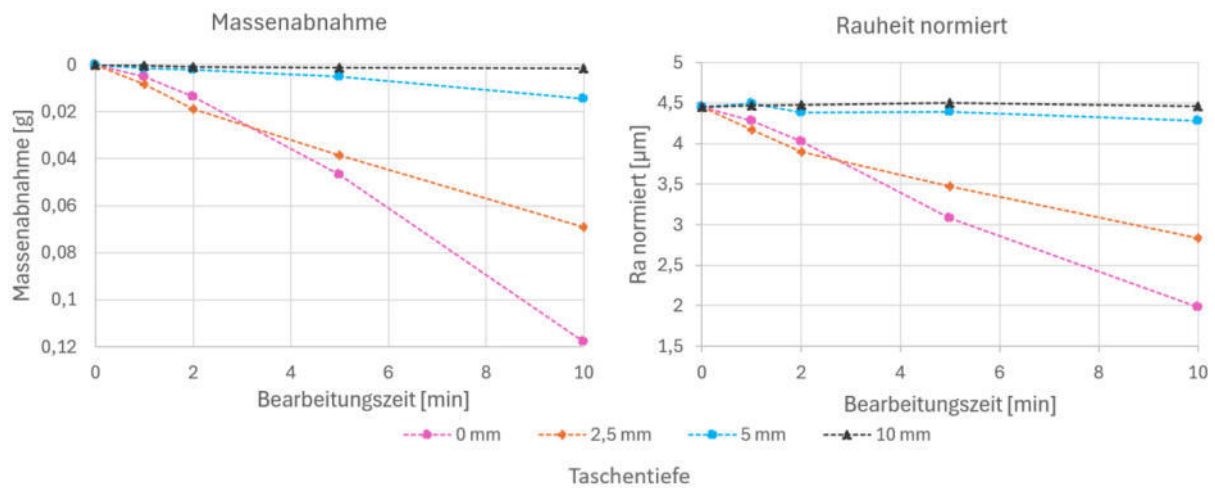


Abbildung 9: Diagramme Taschenproben

Die Kurvenverläufe zeigen auf, dass der Materialabtrag mit zunehmender Taschentiefe abnimmt. Bei einer Taschentiefe von 5 mm ist der Abtrag nur noch minimal. Es wird angenommen, dass dies auf die Gasbildung und die damit verbundene Gasansammlung in der Kavität zurückzuführen ist.

Durch eine Anströmung wird das in der Kavität vorhandene Gas verdrängt, wodurch eine Strömung in diesem Bereich entsteht. Dies führt zu einem signifikant erhöhten Materialabtrag im Vergleich zu einer nicht angeströmten Taschenprobe (siehe Abbildung 10).

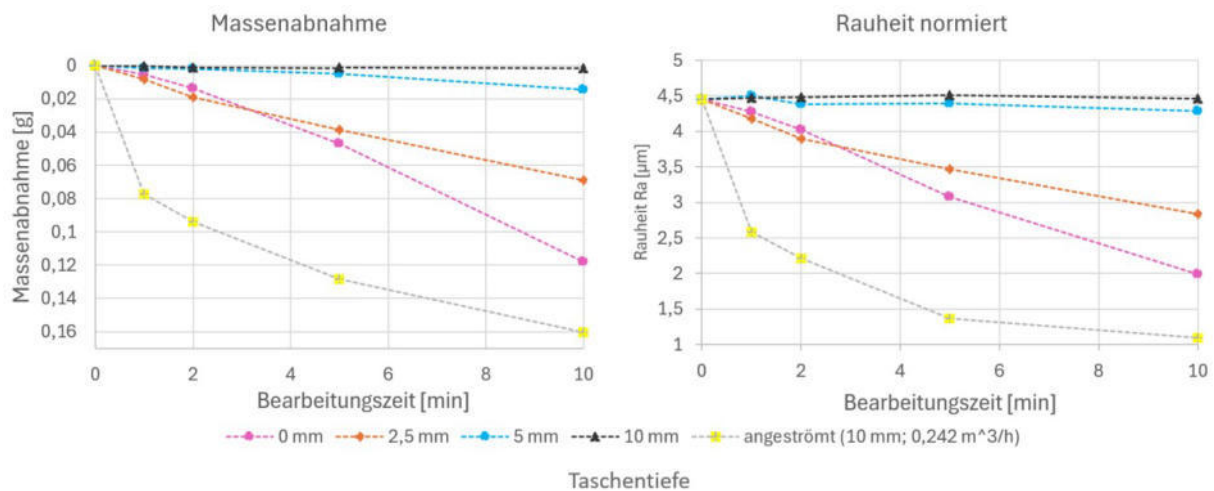


Abbildung 10: Diagramme Taschenprobe mit Anströmung

Die Abtragsrate der angeströmten Probe (10 mm) ist deutlich erhöht und übersteigt die Abtragsrate bei einer Taschentiefe von 0 mm. Das Versuchsergebnis zeigt, dass durch gezielte Anströmung einer Ansammlung von Gasblasen entgegengewirkt und der Materialabtrag partiell erhöht werden kann.

Literatur

- [BOE06] Böhm, A. u. a: Anlage und Verfahren zum Reinigen und Polieren der elektrisch leitfähigen Oberfläche eines Werkstückes sowie Verwendung des Verfahrens, DE 10 2006 016 368 B4, Deutsches Patent- und Markenamt, 2006
- [DIN03] DIN 8590: Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. DIN Media, Berlin, 2003
- [DIN22] DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. DIN Media, Berlin, 2022
- [MEY14] Meyer, W.: Polieren. In: Heisel, U., Klocke, F., Uhlmann, E., Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Spanen, Hanser, 2014
- [NES16] Nestler, K.; Böttger-Hiller, F.; Adamitzki, W. u. a.: Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range, 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, Elsevier B.V., 2016
- [ZEI22] Zeidler, H.; Böttger-Hiller, F.: Plasmaelektrolytisches Polieren Ein Überblick über angewandte Technologien und aktuelle Herausforderungen, Jahrbuch Oberflächentechnik, Eugen G. Leuze Verlag, 2022

Session 5: Post-Processing und Folgeverfahren

Additive Manufacturing - Post-Processing und Risiken

Max Fielenbach,
joke Technology GmbH

Post-Processing und Risiken

Max Fielenbach
Junior Manager / Produktmanager
joke Technology GmbH

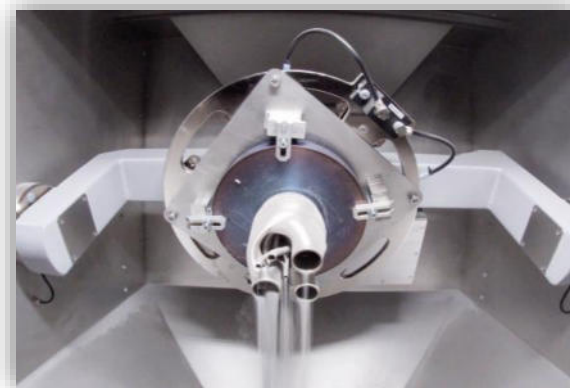
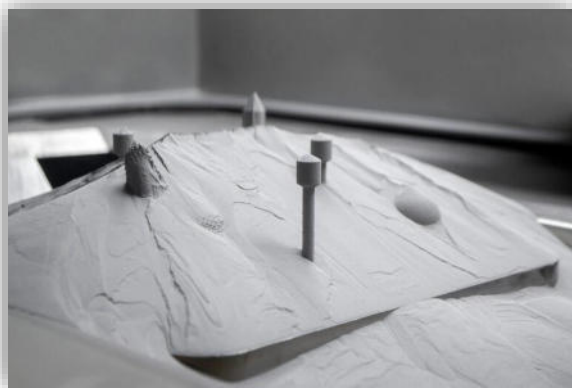
- Seit 1940 am Markt
- Europaweit Marktführer bei Oberflächenendbearbeitung
- Über 20.000 Artikel im Sortiment
- 10.000 Kunden in 63 Ländern
- 22 Exklusivdistributoren weltweit
- Katalog in 14 Sprachen
- Außendienst vor Ort
- Schulungen



- Werkzeug- und Formenbau
- Medizin (z.B. Implantate, med. Instrumente)
- Dentaltechnik
- Automobilindustrie
- Raum- und Luftfahrt
- Glasindustrie
- Optik
- Schmuck- und Uhrenindustrie
- ...



Postprocessing AM



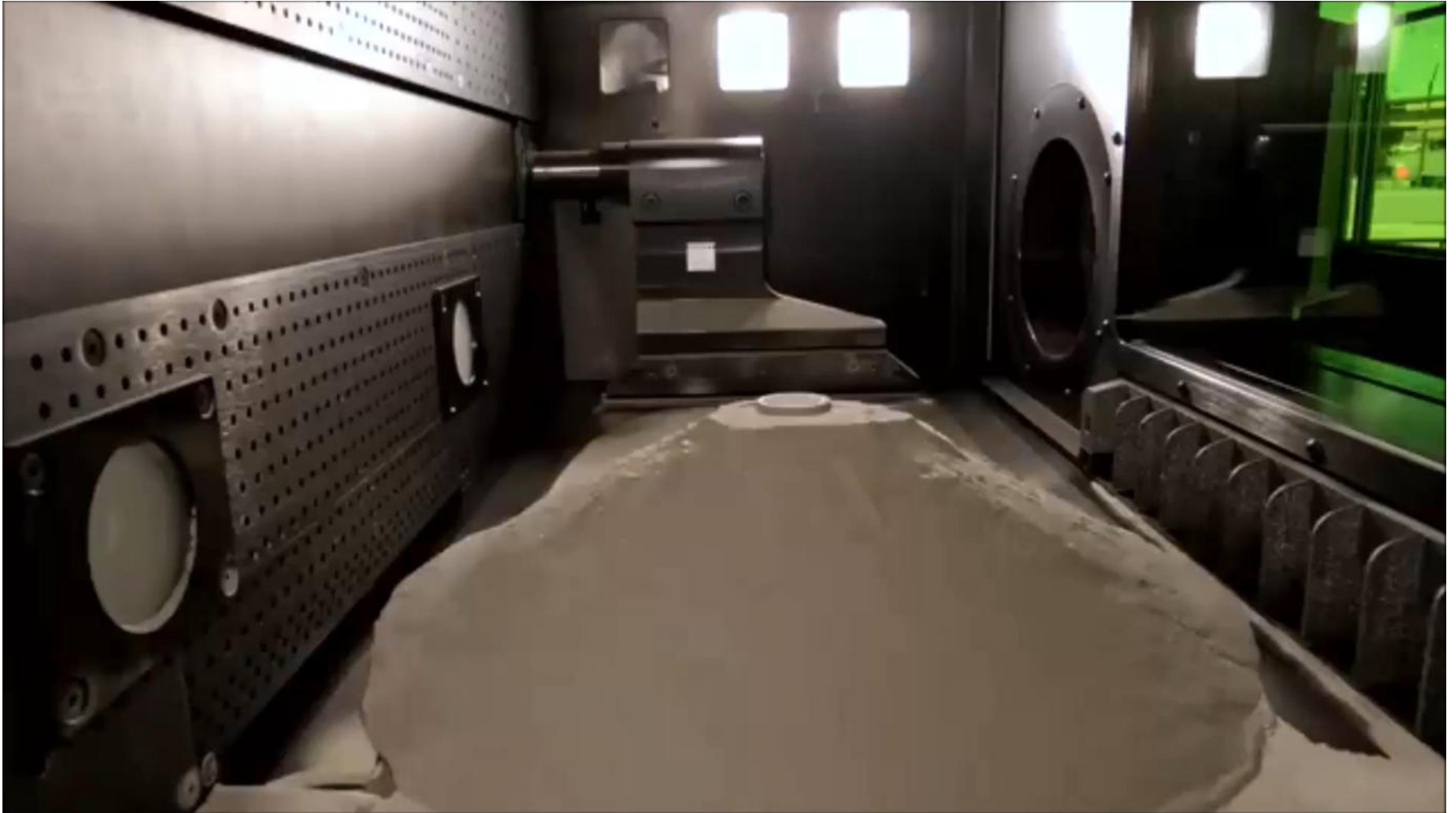
- Vielfältigkeit Material
- Vielfältigkeit Bearbeitungsschritte
 - Entpulvern
 - Trennen von Bauplatte
 - Supportentfernung
 - Entgraten
 - Oberflächenglättung
 - Finish
 - Reinigung
- Bearbeitungsrisiken für Bauteil & Anwender



Wie sieht es heute aus?



Werbung vs. Realität





- Beschädigung oder Zerstörung durch
 - a) unsachgemäße Bearbeitung
 - b) ungeeignete Werkzeuge



Risiken für Anwender



- Funken
- Restpulver
- Stäube
- Entzündung
- Verpuffung / Explosion



- Brennbarer Staub
- Partikelgröße kleiner 500 μm (üblich 15 – 150 μm)
- Ausreichendes Sauerstofflevel (21%)
- Ausreichende Staubkonzentration (20 g / Kubikmeter)
- Zündquelle



Staubexplosionen – Berühmte Beispiele



'Incredibly destructive': Safety board publishes report on fatal dust explosion

January 12, 2014 One Comment



CHEMICAL SAFETY CHEMICAL SAFETY BOARD COMBUSTIBLE DUST OSHA STANDARDS



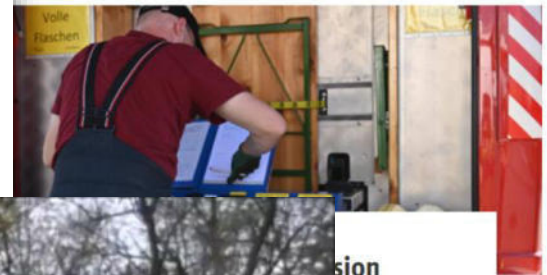
Photo: Chemical Safety Board

Dust Explosion Forces Evacuation of DuPont Plant

January 7, 2019

1 Min Read

Editor's Choice



Großinsatz nach Jäckering im H

Erreicht: 10.09.2019 Aktualisiert: 10.09.2019

Von: Lisa Döcker

Kommentare



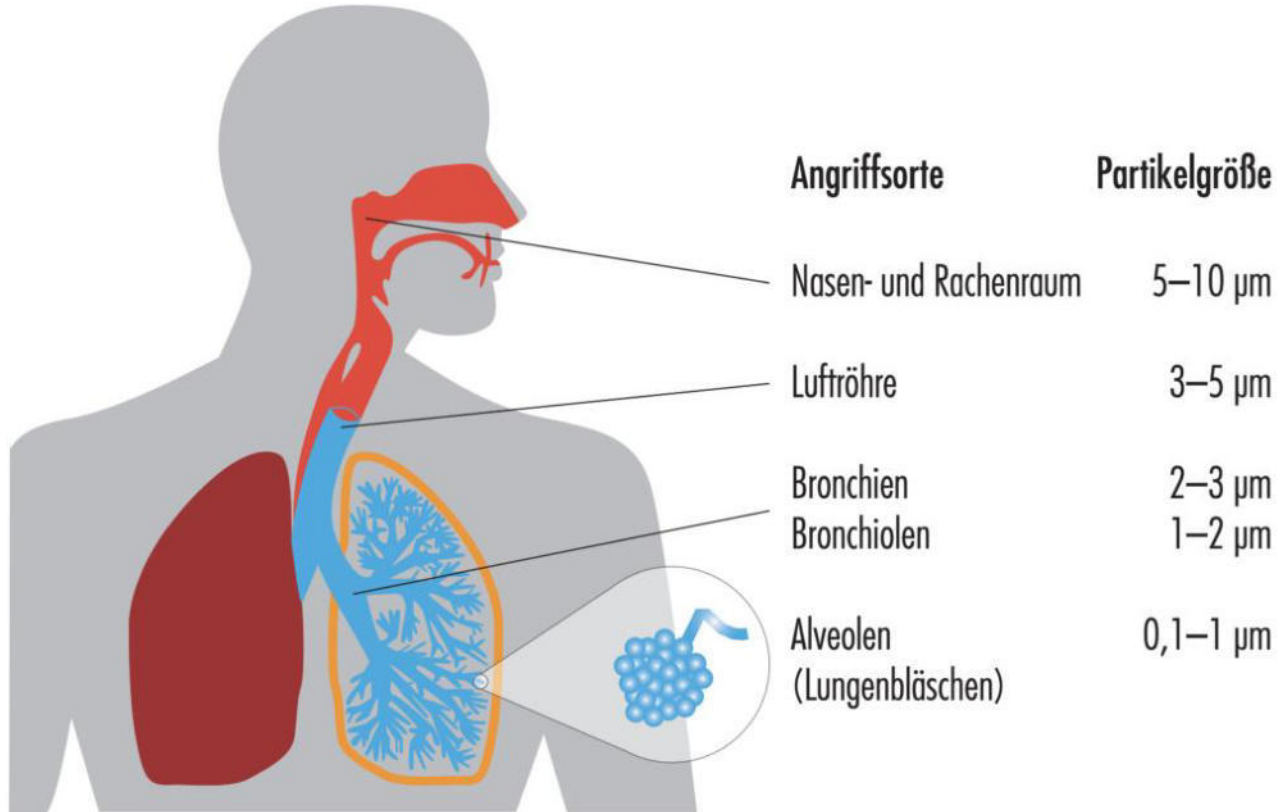
sion
iertel ist am Montag ein
, der wohl überhitzt

Tellen

tag Silos mit
explosion und
arbeiter

dust explosion in east





Angriffsorte des Feinstaubs in den Atemwegen:
Je kleiner die Partikel, desto tiefer dringen sie in das Lungensystem ein.

- **Hautreizung**

Berufsbedingten Hauterkrankungen, sogenannte Berufsdermatosen, gehören zu den häufigsten anerkannten und entschädigungspflichtigen Berufskrankheiten in Deutschland. Die Symptome sind Rötungen, trockene Haut, Schuppung, Juckreiz und Einrisse bis hin zu chronischen Entzündungen.
- **Asthma**

Asthma (medizinisch Asthma bronchiale) ist eine chronische, entzündliche Erkrankung der Atemwege mit dauerhafter Überempfindlichkeit. Die Entzündung kann zu anfallsweiser Atemnot infolge einer akuten Verengung der Atemwege führen. Auf verschiedene Reize reagieren die Atemwege empfindlich und können sich entzünden. Etwa 5 % der Erwachsenen und 7 bis 10 % der Kinder leiden an Asthma.
- **Staublunge**

Die Staublunge (oder Pneumokoniose) entsteht durch Inhalation von anorganischen Stäuben. Es kommt zu Lungenveränderungen, die zur Lungenfibrose führen können. Sie ist eine der häufigsten Berufskrankheiten in Deutschland. Verursacher sind meist Kohle-, Asbest- oder Quarzstäube.
- **Krebserkrankungen**

Vor allem Feinstaub erhöht das Risiko, an verschiedenen Tumorarten zu erkranken. Das Lungenkrebsrisiko war schon länger gut dokumentiert. Jüngere Forschungen zeigen aber auch bei Tumoren im oberen Verdauungstrakt, an Brust, Leber, Pankreas oder Gallenblase ein deutlich höheres Risiko.

Worauf ist zu achten?



- Kein Hautkontakt mit Pulvern & Stäuben
- Einatmen von Stäuben ausschließen
- Staub nicht unkontrolliert entweichen lassen
- Absaugung gezielt und unmittelbar an Entstehungspunkt
- Reaktion Pulver / Stäube mit Luft, Wasser unterbinden





10 goldene Regeln (dt. Unfallvers.)



- Staub erst gar nicht entstehen lassen
- Staubarme Materialien verwenden
- Möglichst in geschlossener Anlage arbeiten
- Staub unmittelbar an Austrittsstelle absaugen
- Absauganlagen optimieren und warten
- Arbeitsräume ausreichend lüften
- Abfälle sofort und staubfrei beseitigen
- Arbeitsplätze regelmäßig reinigen
- Arbeitskleidung sauber halten
- Atenschutz für staubintensive Arbeiten





- abgeschlossener Raum
= 0 Staubkontakt
- Unmittelbare Absaugung von Staub
- Überwachung & Inertisierung
- Prozesssicher
- Auf Anwender anpassbar
- Geeignet für
 - Entfernung Restpulver
 - Trennen von Bauplatte
 - Supports entfernen
 - Entgraten
 - Grobe & feine Bearbeitung

Referenzen







Session 6: polymerbasierter 3D-Druck

**Kunststoffschäume im großvolumigen 3D-
Druck**

Hans Georg PenseL,
Ernst-Abbe-Hochschule Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences

Kunststoffschäume im großvolumigen 3D-Druck

11. Mitteldeutsches Forum | 3D-Druck in der Anwendung
Hochschule Merseburg

Autoren: Hans Georg Pensel¹, Toni Wille¹, Andreas Hopf¹, Andrea Barz¹, Jens Bliedtner¹, Karl-Christian Danz²
1 – Ernst-Abbe-Hochschule Jena
2 – kcd Kunststoffe, Additive und Beratung GmbH

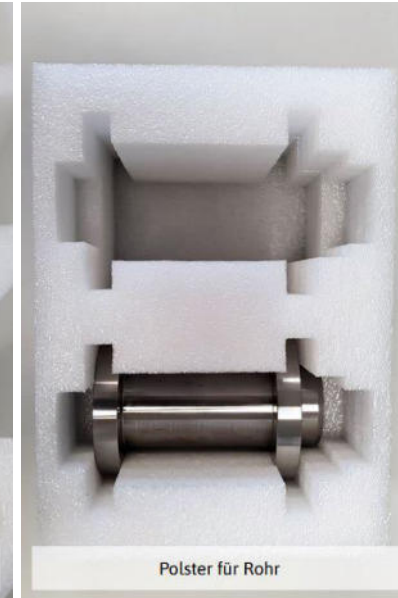
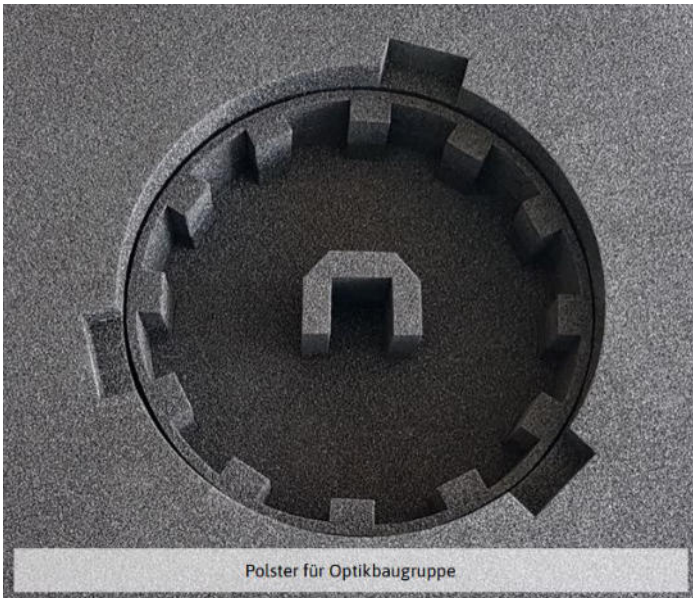


Inhalt

- Motivation
- Stand der Wissenschaft und Technik
- Experimentelle Ergebnisse
- Zusammenfassung & Ausblick
- Danksagung

Motivation

- Ansatz: konventionelle Herstellung von Verpackungen

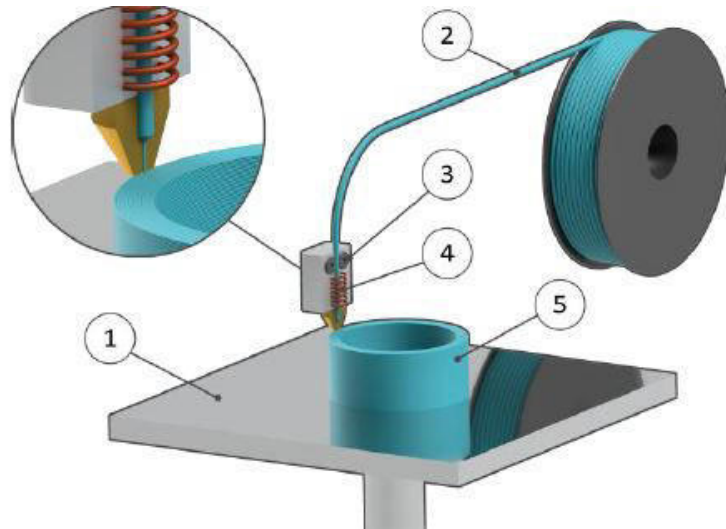


Verpackungsbeispiele:
<https://www.ditte-eppelin-kg.de/produkte/polster-lagerungen/>

- Plotten der 2D-Geometrie aus Schaumstoffplatten
- Verkleben/Verschweißen der geplotteten Scheiben zu Gesamtverpackung
- Verschnitt/Innengeometrie → meist als Industrieabfall entsorgt
- **Idee: Geschäumte Werkstoffe im großvolumigen 3D-Druck**
- **Komplexe Verpackungen direkt drucken**

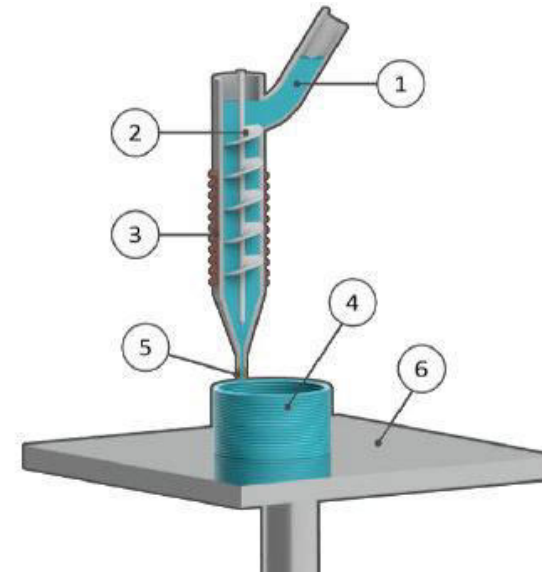
Stand der Wissenschaft und Technik

- **Filamentextrusion**



- 1: Bauplattform
- 2: Filament
- 3: Filamentförderer
- 4: Beheizte Düse
- 5: Bauteil

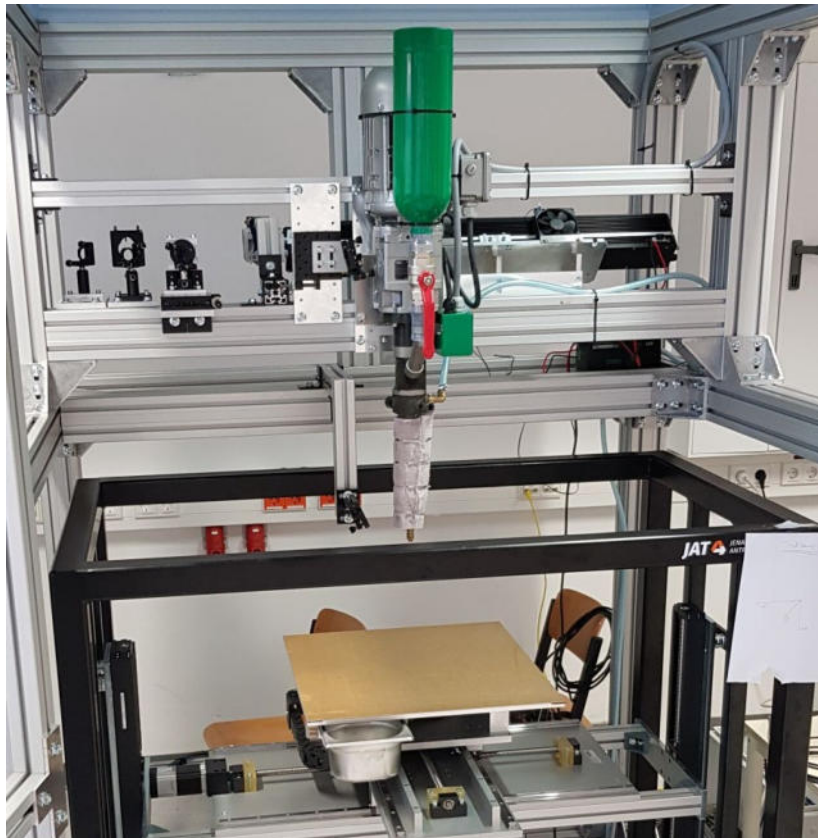
- **Granulatrextrusion**



- 1: Materialeinzug
- 2: Schnecke
- 3: Heizband
- 4: Bauteil
- 5: Düse
- 6: Bauplattform

Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

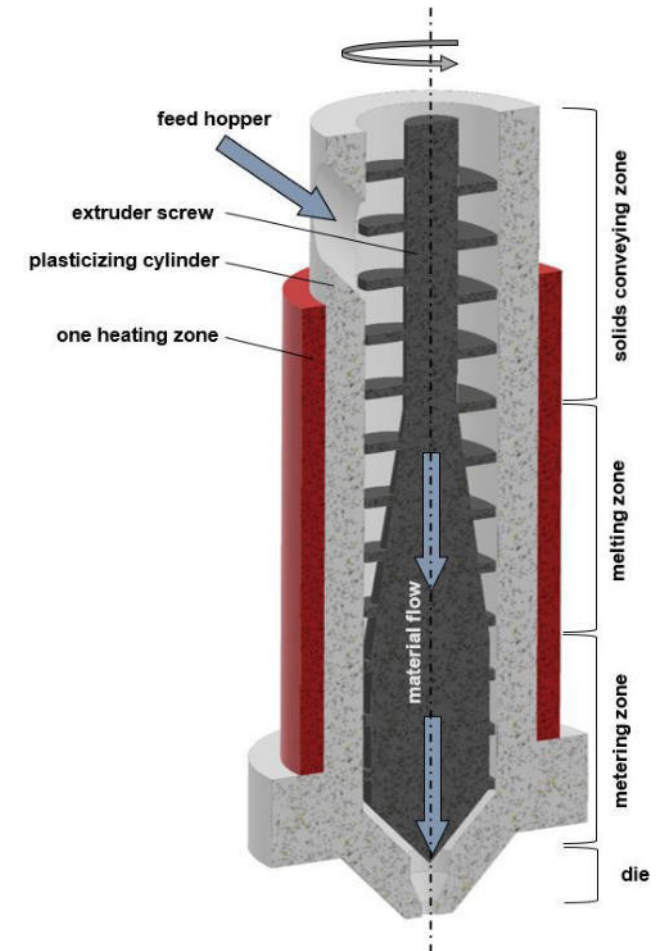
Stand der Wissenschaft und Technik



Aufbau für großvolumiges Schmelzschichtverfahren
(feststehender Extruder und Bauplattform (JAT) für XYZ-Achsen)

Einflussgrößen

- Temperatur
- Druckverhältnisse
- Drehzahl
- Ausgangsmaterial
- Treibmittel
- Vorschubgeschwindigkeit
- Zustellung
- Extruderdimensionen
- Extruderschnecke

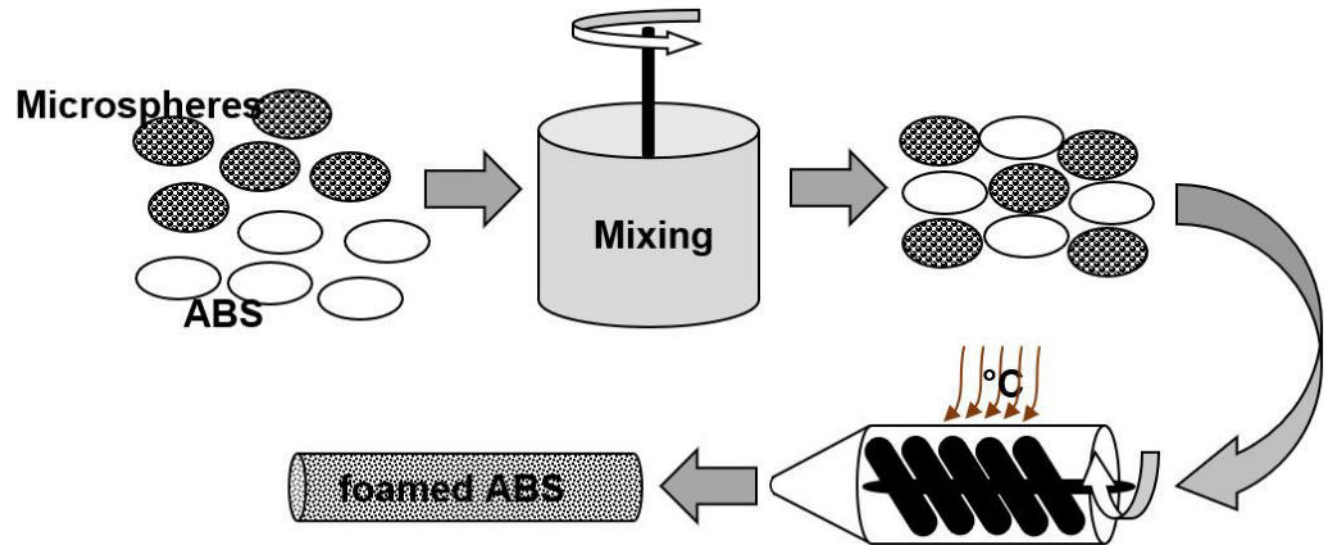


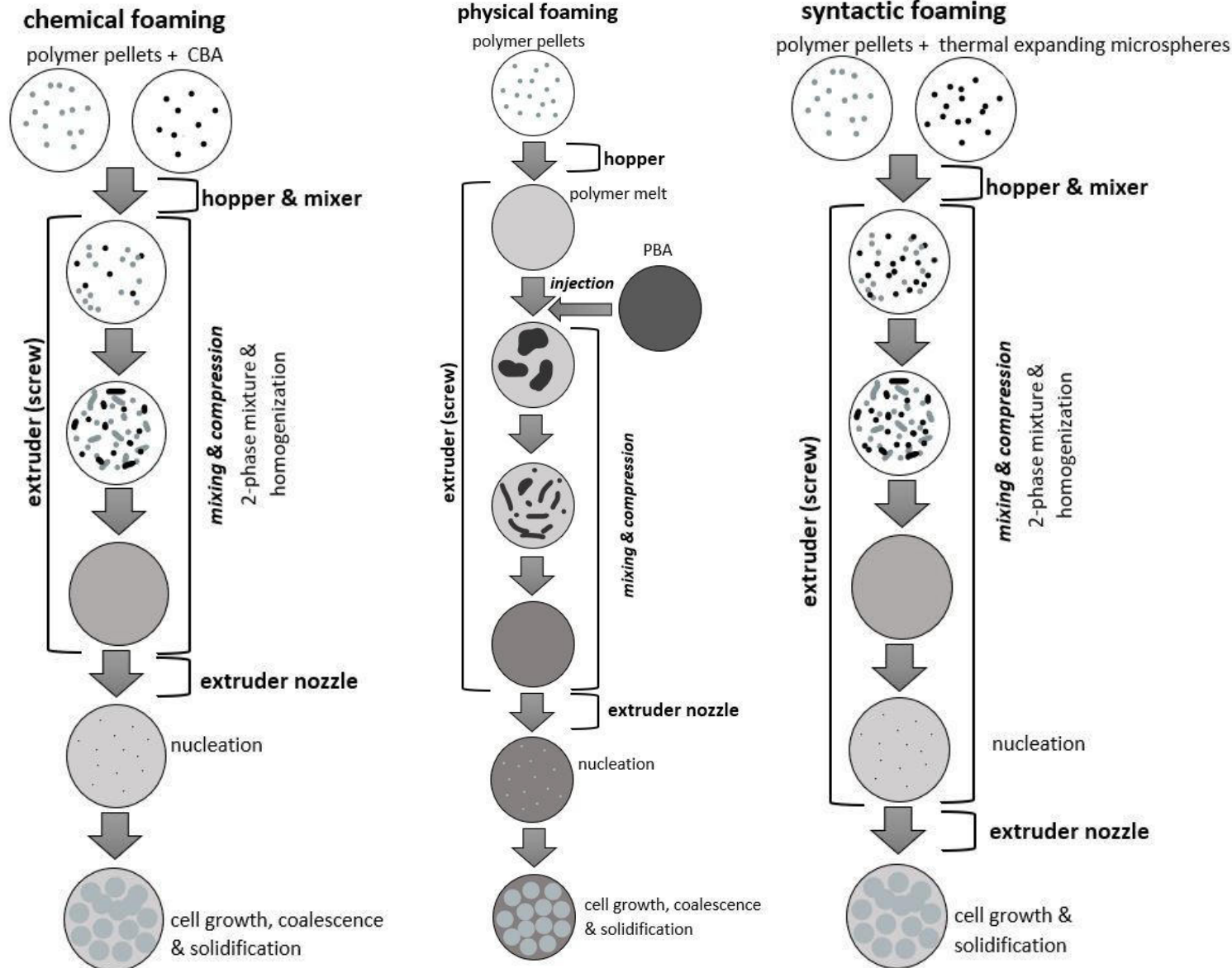
Extruder - schematisch

Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

Stand der Wissenschaft und Technik

- **Foaming - Schäumen**
- Drei Varianten
- Unterschiede in Expansionsvorgang
- Granulate – Pulver – Masterbatches
- Fluide – Gase – Gemische
- **Microspheres**



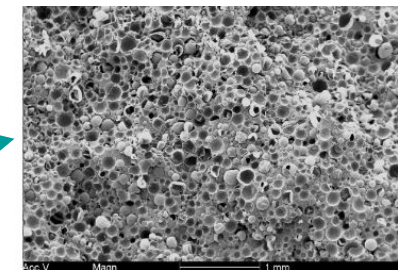
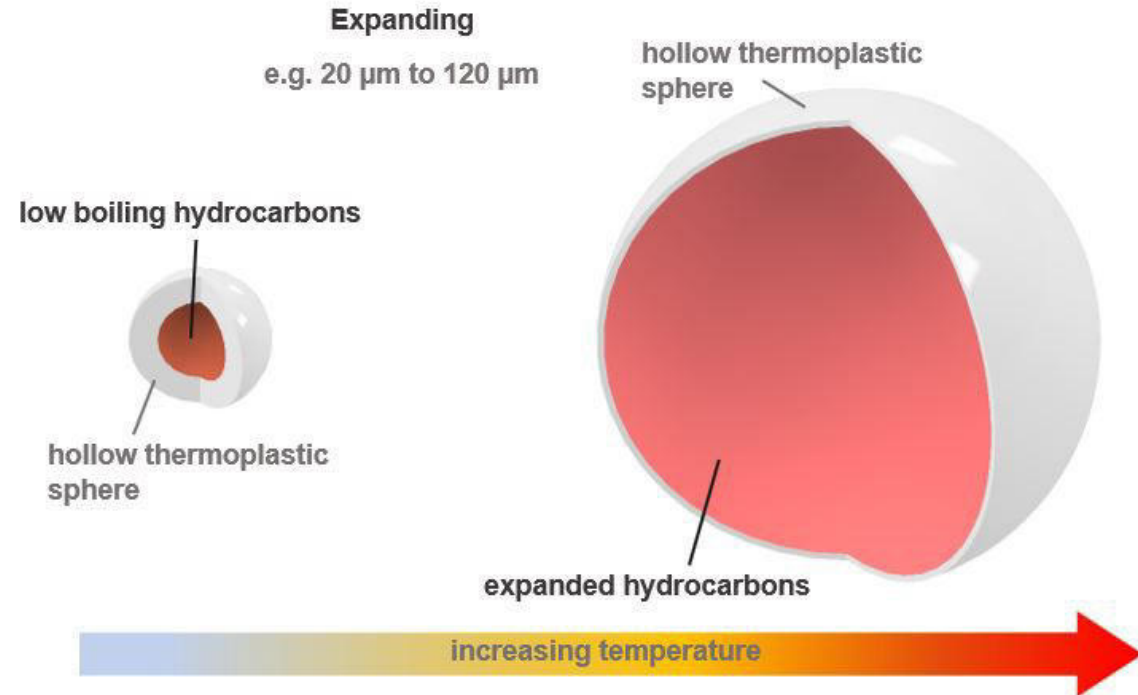


- **Foaming - Schäumen**
- Drei Varianten
- Unterschiede in Expansionsvorgang
- Granulate – Pulver – Masterbatches
- Fluide – Gase – Gemische
- **Microspheres**

Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

Stand der Wissenschaft

- **Microspheres**
- Verfügbar als Masterbatch
 - 65 % MS + 35 % EVA-Wachs
- Expandieren durch Wärmezufuhr
- Unterschiedliche Temperaturbereiche
 - $T > 200\text{ °C}$ schwierig herstellbar
- Expansion: $15 - 30\text{ }\mu\text{m} \rightarrow \sim 120\text{ }\mu\text{m}$
- Anfällig gegen Scherung

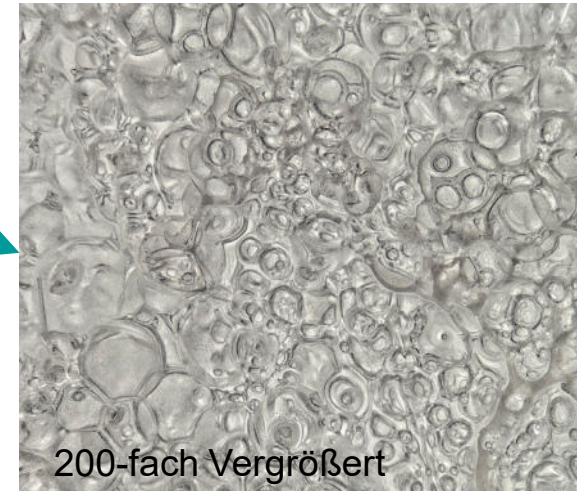
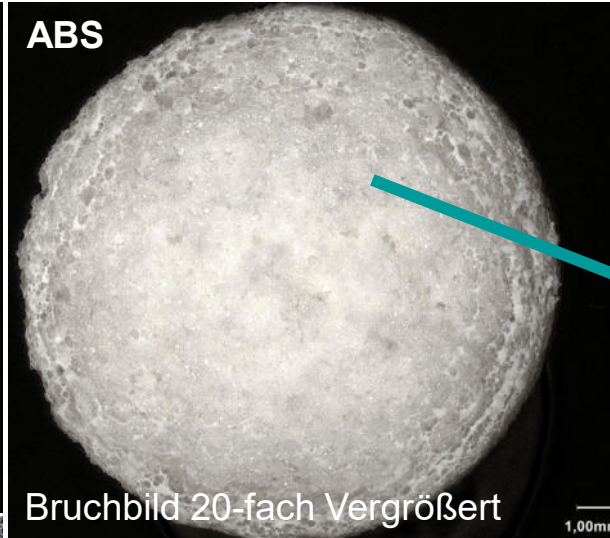
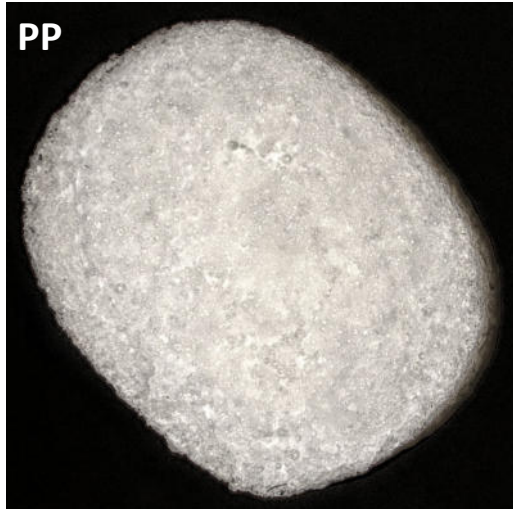


Braun, D.-I. A. (2011).
Verfahrensentwicklung von
physikalisch geschäumten
Polypropylenplatten für den
Einsatz als Kernmaterial von
Sandwichverbunden (Diss.).

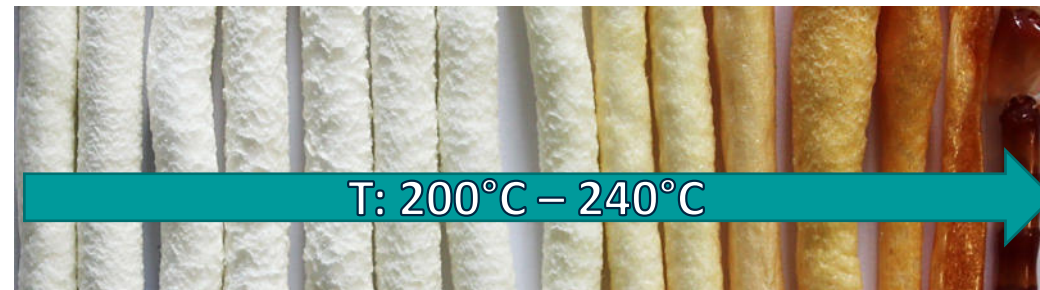
<https://www.wlw.de/de/pd/firma/kcd-kunststoffe-additive-und-beratung-gmbh-601378/produkte/microspheres-masterbatche-24710106>

Experimentelle Ergebnisse

- Anteil Treibmittelmasterbatch: 2 %



- Temperatureinfluss auf Microspheres

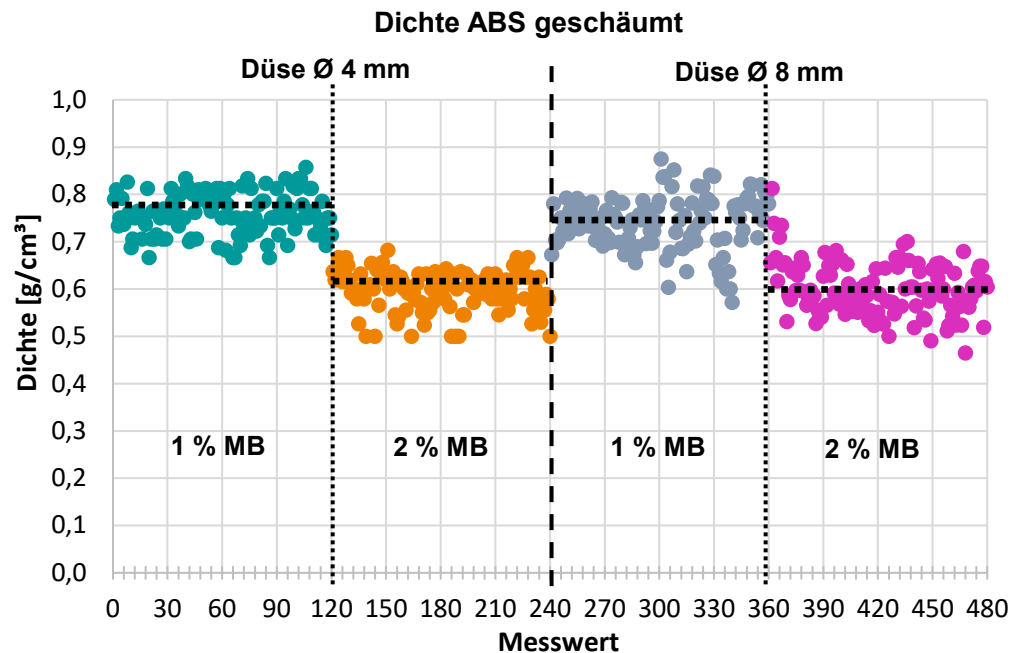


- Untersuchte Materialien:
PP/PE/ABS/ASA/PLA &
TPE (begonnen)

Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

Experimentelle Ergebnisse

- Dichtebestimmung der Materialgemische

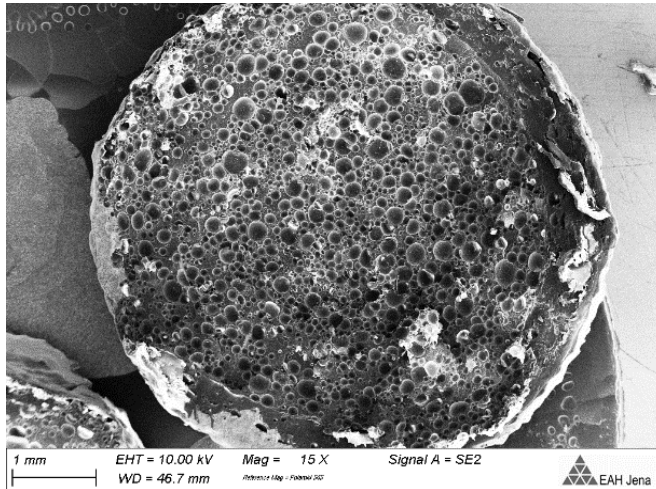


- ABS Materialeinsparung: $\approx 39\%$ bzw. 53%
- PLA Materialeinsparung: $\approx 18\%$ bzw. 35%
- ASA Materialeinsparung: $\approx 17\%$ bzw. 41%

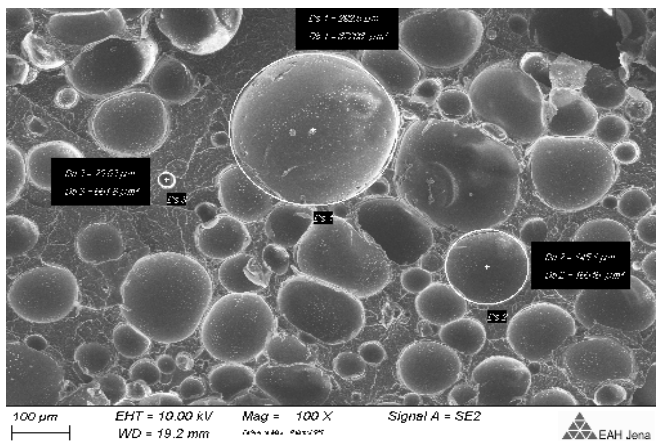
Material	Treibmittelanteil	Dichte
ABS	0 %	1,05 g/cm ³
ABS	1 %	0,75 g/cm ³
ABS	2 %	0,60 g/cm ³
PLA	0 %	1,00 g/cm ³
PLA	1 %	0,82 g/cm ³
PLA	2 %	0,65 g/cm ³
ASA	0 %	1,01 g/cm ³
ASA	0,7 %	0,83 g/cm ³
ASA	2,1 %	0,59 g/cm ³

Experimentelle Ergebnisse

- REM-Analyse



REM-Aufnahme Querschnitt ABS-Strang 4 mm Düse

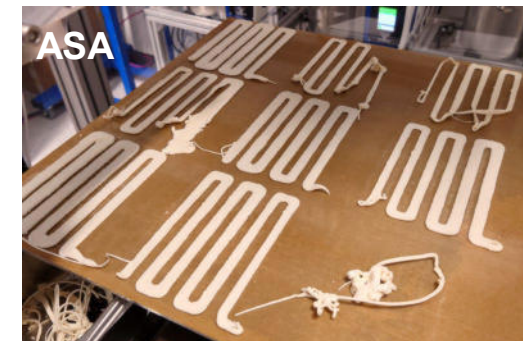


REM-Aufnahme Porendarstellung ABS-Strang 4 mm Düse

- Zellgröße zwischen **30 und 250 µm**
- Zellengröße widerspricht Datenblatt des MB
- **Zerstörte MS** (thermisch/mechanisch)
- Gas tritt in Schmelze ein
- Wirkung wie bei Treibmittel direkt in Schmelze gelöst
- Bei Verlassen des Werkzeuges und Reduzieren des Drucks
- Expansion bis Innendruck = Außendruck

Geeignete Parameter (ABS/PLA):

- Temperatur 180 °C - 220 °C
- Drehzahl $\approx 60 \text{ min}^{-1}$
- Konzentration Treibmittel 1-2 %



Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

Experimentelle Ergebnisse

- Erste Druckversuche & Bauteilherstellung

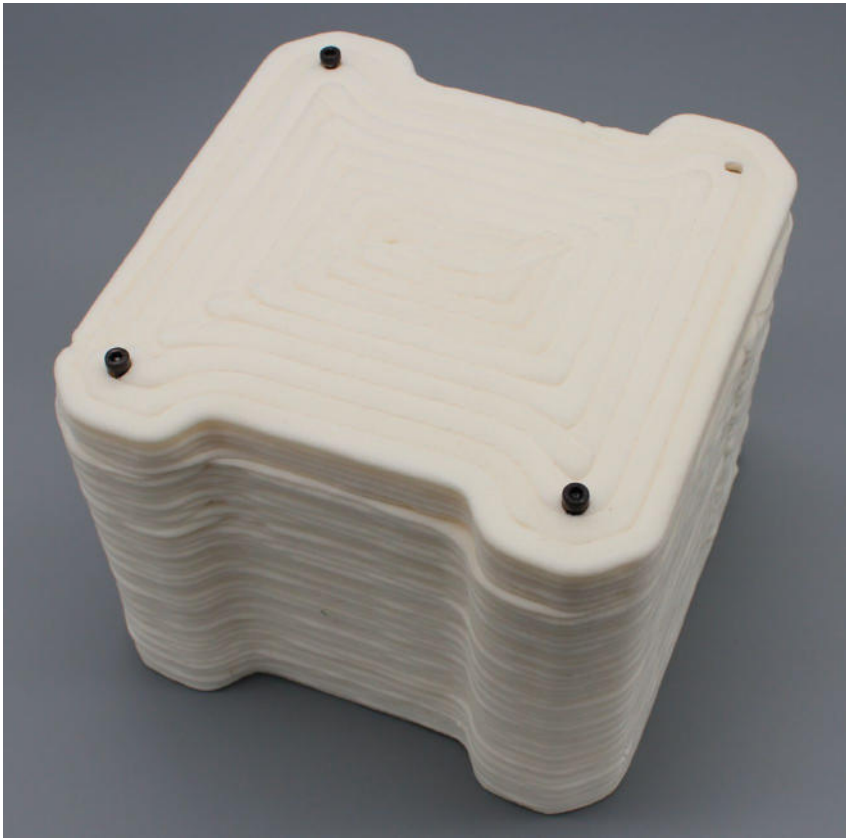


- Darstellung der Schichtverbindung einzelner Layer nach dem Druck
- Bauteile für Verpackungen (Demonstratoren)
- Hart-Weich-Verbindung in einem Bauteil → neue Materialtests mit TPE

Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

Experimentelle Ergebnisse

- Demonstrator: Verpackung (Datei durch Projektpartner bereitgestellt)



Zusammenfassung & Ausblick

Aktueller Stand

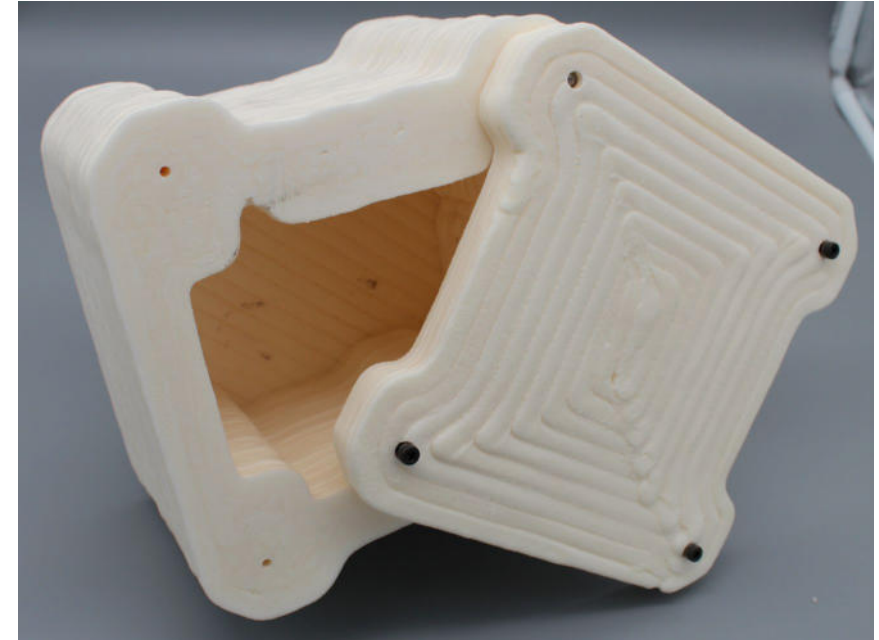
- ABS, PLA gut verarbeitbar
- Prozessfenster für großvolumiges Schmelzschichtverfahren definiert
- Schichthaftung und -verbindung erfolgreich
- Bauteile und Demonstratoren realisiert
- Veröffentlichung (in Review):

Investigations into the foaming behavior of ABS by means of granule extrusion using expandable microspheres

(Wille, Pensel, Barz, Hopf, Bliedtner, Danz; 2024)

Potential zur Optimierung

- Extrudertechnik, Heizzonen, Materialeinzug
- Microspheres teilweise mechanisch/thermisch zerstört
- Homogenität der Schmelze erhöhen
- Weiter Materialerprobung (TPE)



- Angepasste Microspheres, Masterbatches
- Größere Stabilität bei hohen Temperaturen
- Extruder anpassen
 - Anzahl Heizzonen, Schneckenengeometrie

Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

Zusammenfassung & Ausblick

Ausblick

- Materialerprobung von TPE
- Versuche mit weiteren Microspheres Typen
- verbesserte Materialgemische → Microspheres schon im Granulat enthalten
- Charakterisierung Dämpfungseigenschaften, Rückstellvermögen, Festigkeit, ...
- Erproben von Hart-Weich Verbindungen
- Nachbearbeitung der Bauteile (Spanend)
- Erproben von Verpackungen im Einsatz



Bilder: EAH-Jena | AG-Bliedtner

Danksagung

Projekthintergrund

- **3D-Schaum** – Entwicklung eines Verfahrens und einer Prozesskette zur Herstellung geschäumter Bauteile im großvolumigen Schmelzschichtverfahren



- Verfahrens- & Prozessentwicklung
- Materialerprobung
- Formgebung im additiven Verfahren



- Materialentwicklung
- Kunststoffgranulate & Pulver
- Treibmittel im Masterbatch & Pulver



- Anforderungsvorgaben
- Bereitstellen der Datensätze
- Charakterisierung der Modelle & Bauteilprüfung



Kofinanziert von der Europäischen Union

Laufzeit: 1. Juli 2023 - 30. Juni 2026

Das vom Freistaat Thüringen geförderte Projekt wird durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.

Vielen Dank

Fragen?

Kontakt:

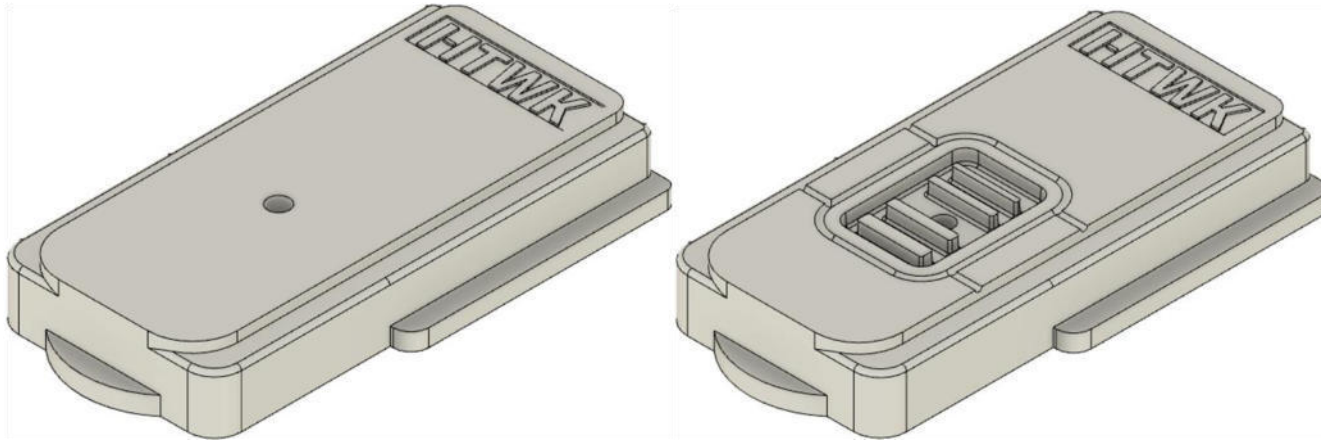
Hans Georg Pensel, 03641/205 768

HansGeorg.Pensel@eah-jena.de

Session 6: polymerbasierter 3D-Druck

**Untersuchungen zum Spritzgießen mit additiv
gefertigten Werkzeugeinsätzen aus Kunststoff**

Hauke Adler,
HTWK Leipzig



Untersuchungen zum Spritzgießen mit additiv gefertigten Werkzeugeinsätzen aus Kunststoff

11. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung
Session 6 – polymerbasierter 3D-Druck

Hauke Arno Adler
16.10.2024

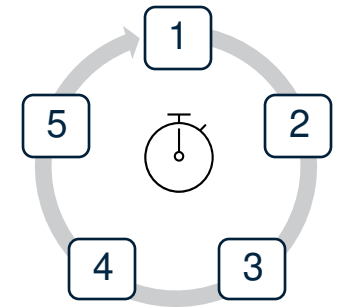
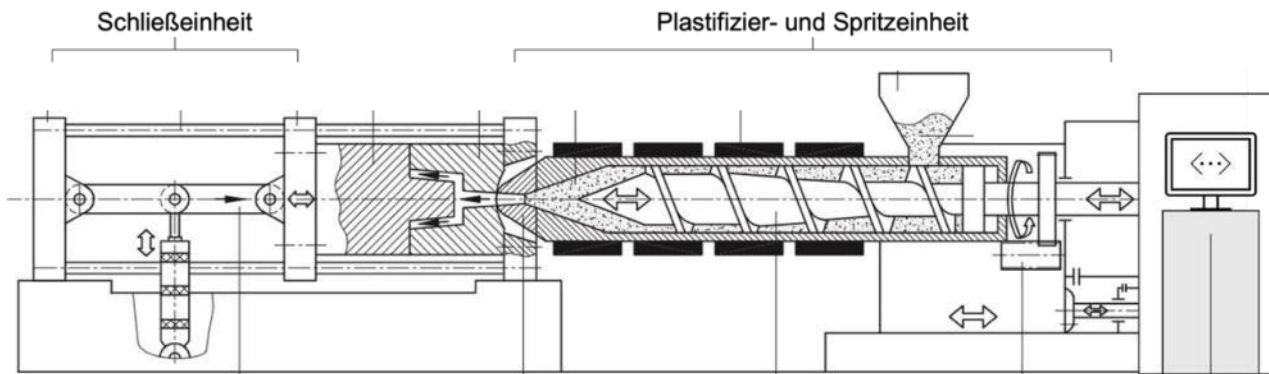
Gliederung

1. Einführung
2. Methodik und Versuche
3. Ergebnisse
4. Zusammenfassung & Ausblick
5. Gemeinsame Diskussion
6. Quellenverzeichnis

Einführung Spritzgießen

Spritzgießen:

... ist ein Fertigungsverfahren, bei dem flüssige Kunststoffschmelze unter hohem Druck in eine Hohlform eingespritzt wird, um durch Abkühlen (formstabile) Teile zu erzeugen



Wesentliche Komponenten:

- Spritzgießmaschine
- Spritzgießwerkzeug
 - *Konventionell: aus Metall*

Wesentliche Prozessparameter:

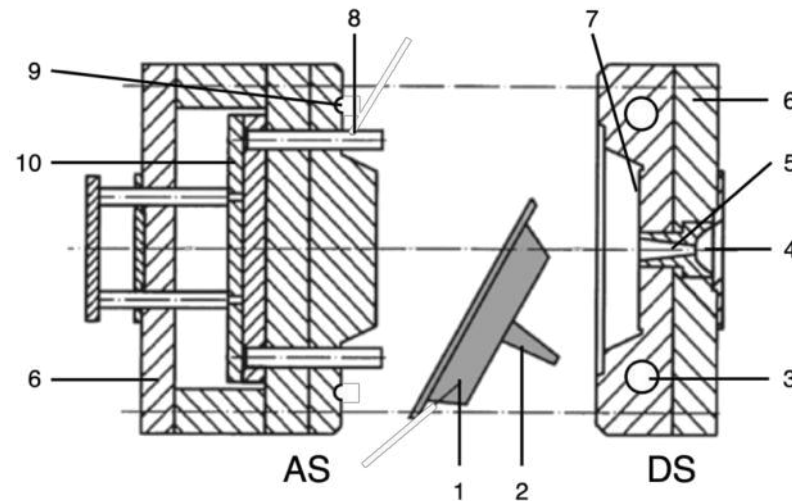
- Temperatur
- Zeit
- Druck

Einführung

Spritzgießwerkzeuge

Konventionelle Spritzgießwerkzeuge:

... sind komplexe Vorrichtungen aus Metall, welche die Bauteilgeometrie als Hohlform beinhalten und zur Erfüllung der Haupt- und Nebenaufgaben mit Funktionskomplexen ausgestattet sind



Vorteile:

- Hohe Standzeiten
- Gute Wärmeleitungsseigenschaften
- Hoher Informationsstand

Nachteile:

- Hoher Herstellungsaufwand
- Hoher Optimierungsaufwand
- Hohe Herstellungskosten

Methodik & Versuche

Versuchsbeschreibung

- Was hat mich besonders interessiert?
 - Prozessparameter
 - Luftkühlung
 - Standzeit und Versagensanalyse
 - Zykluszeit

Methodik & Versuche

Versuchsbeschreibung

- **Was hat mich besonders interessiert?**
 - Prozessparameter
 - Luftkühlung
 - Standzeit und Versagensanalyse
 - Zykluszeit
- **Wie bin ich vorgegangen?**
 - Recherchen: Stand der Technik, Spezifische Herausforderungen, Auslegungsrichtlinien
 - Vorversuch: Ermittlung geeigneter Prozessparameter → vergleichbare Bedingungen für Hauptversuch
 - Hauptversuch: Vergleich von vier Versuchswerkzeugen (zzgl. zwei nachträglich)

Methodik & Versuche

Versuchsbeschreibung

- **Was hat mich besonders interessiert?**
 - Prozessparameter
 - Luftkühlung
 - Standzeit und Versagensanalyse
 - Zykluszeit
- **Wie bin ich vorgegangen?**
 - Recherchen: Stand der Technik, Spezifische Herausforderungen, Auslegungsrichtlinien
 - Vorversuch: Ermittlung geeigneter Prozessparameter → vergleichbare Bedingungen für Hauptversuch
 - Hauptversuch: Vergleich von vier Versuchswerkzeugen (zzgl. zwei nachträglich)
- **Verwendete Ressourcen:**
 - Spritzgießautomat BOY XS
 - FDM-Verfahren (Markforged Onyx One)
 - SLA-Verfahren (Anycubic Photon S)

Stand der Technik

Konzept Kassettenwerkzeug

- Kassettenwerkzeug = Stammform + Werkzeugeinsatz



Stand der Technik

Konzept Kassettenwerkzeug

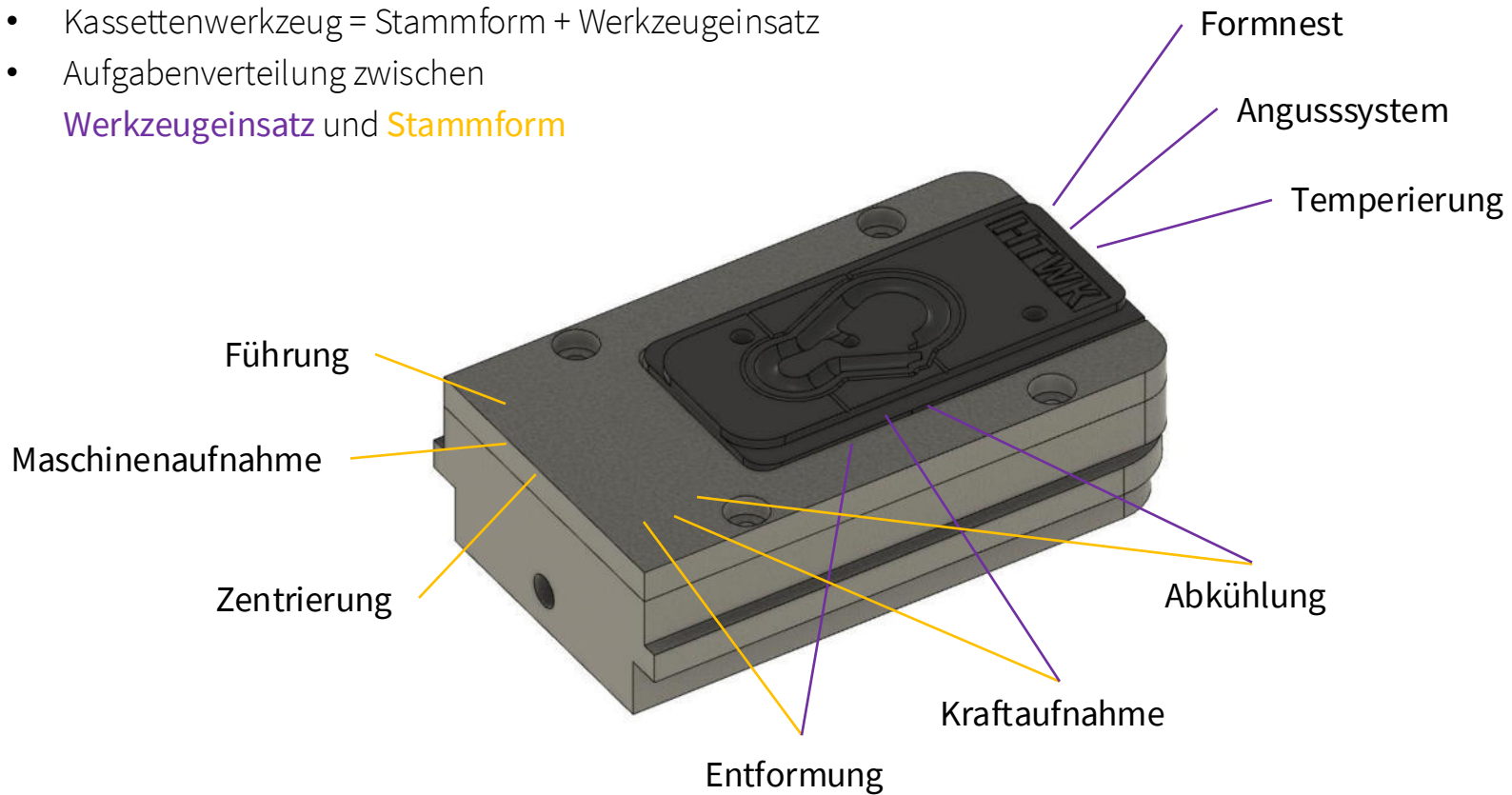
- Kassettenwerkzeug = Stammform + Werkzeugeinsatz
- Aufgabenverteilung zwischen **Werkzeugeinsatz** und **Stammform**



Stand der Technik

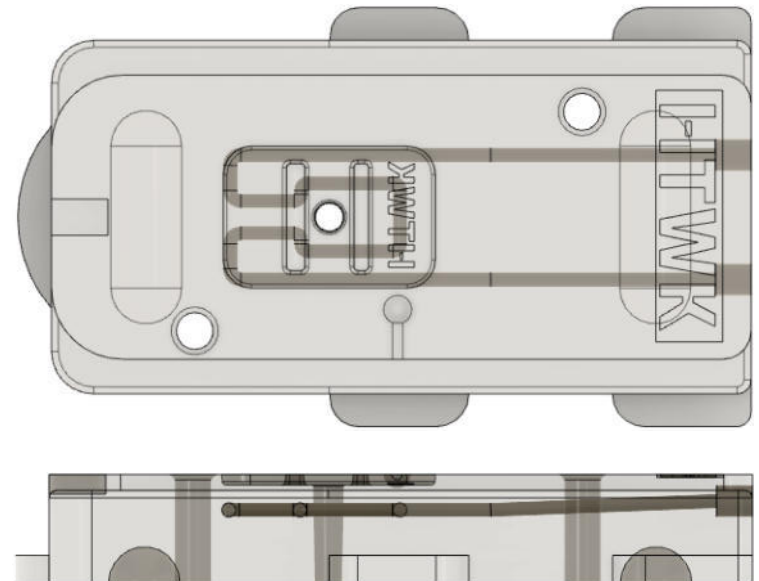
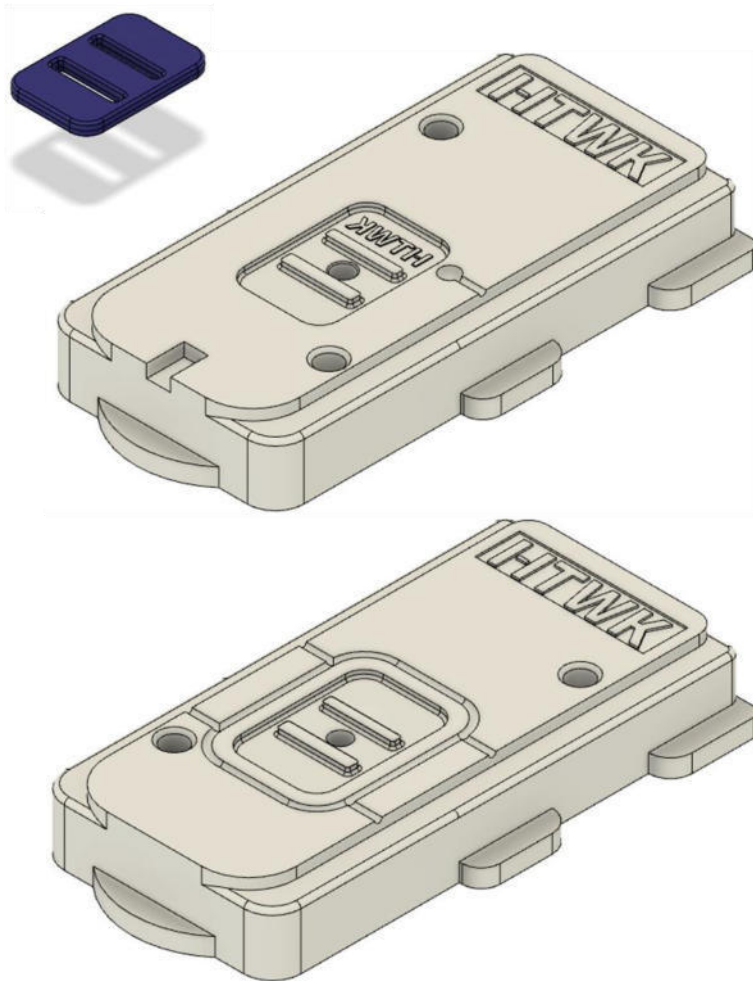
Konzept Kassettenwerkzeug

- Kassettenwerkzeug = Stammform + Werkzeugeinsatz
- Aufgabenverteilung zwischen **Werkzeugeinsatz** und **Stammform**



Testwerkzeuge

Werkzeugauslegung



Testwerkzeuge

Übersicht



SLA1

Anycubic Standard Resin +

SLA2

Siraya Tech Sculpt

SLA1K

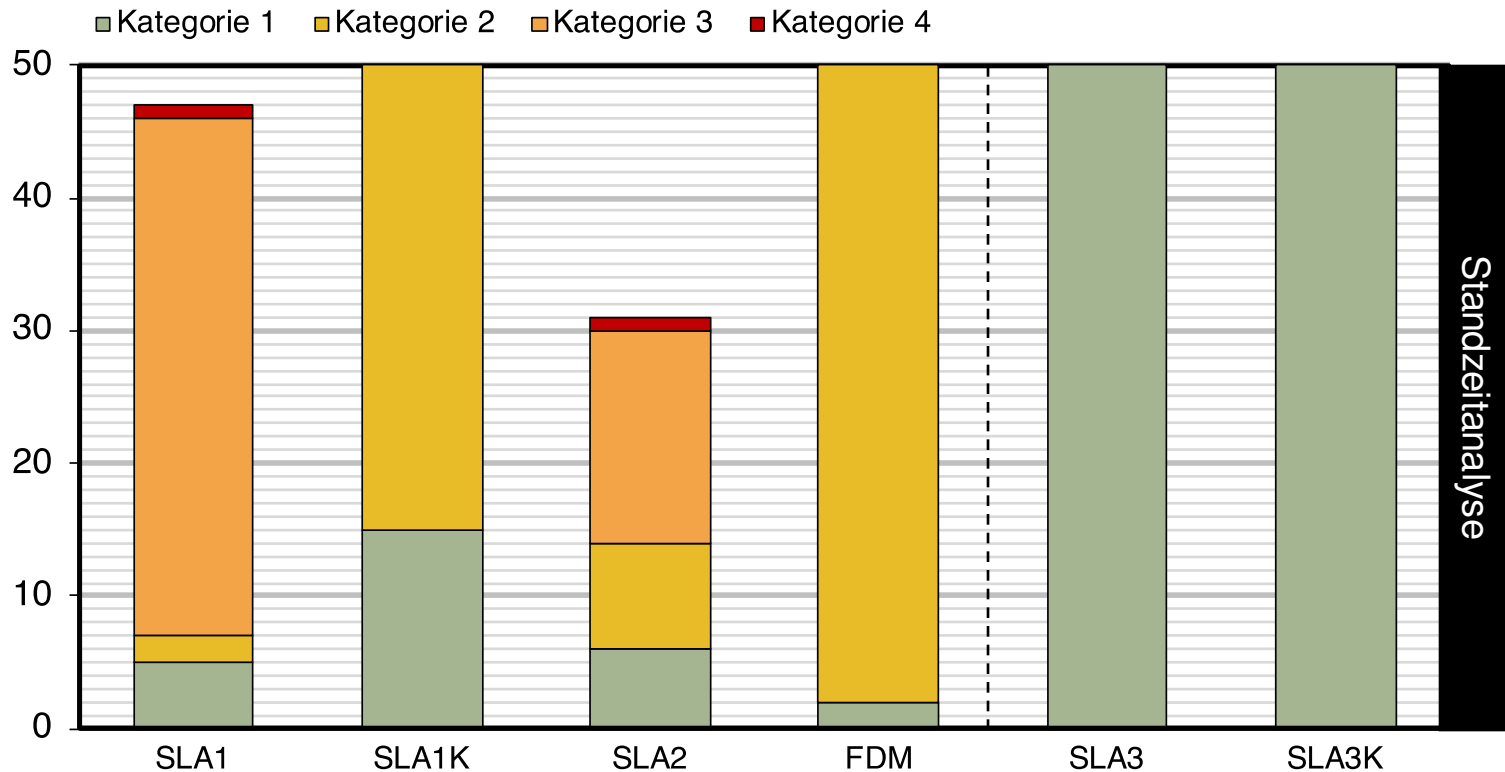
Anycubic Standard Resin +

FDM

Markforged Onyx

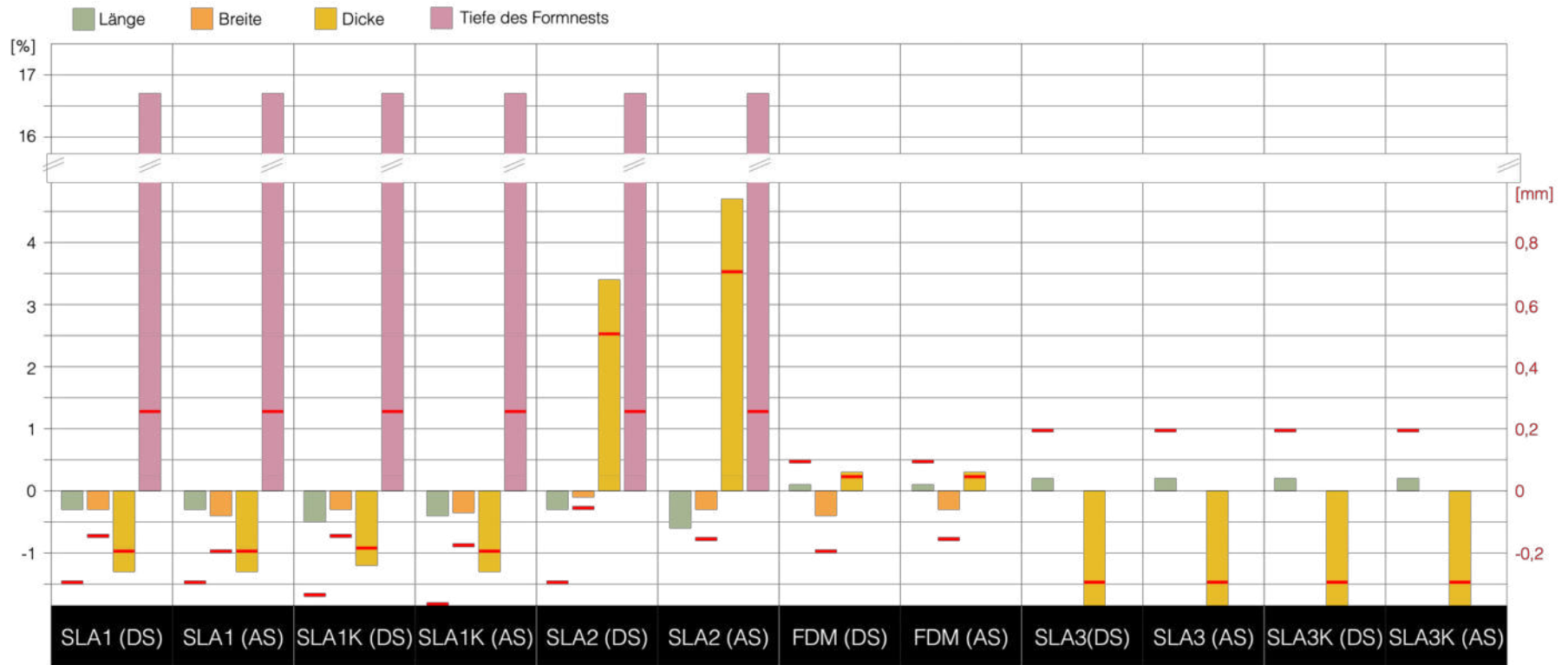
Ergebnisse

Standzeitanalyse



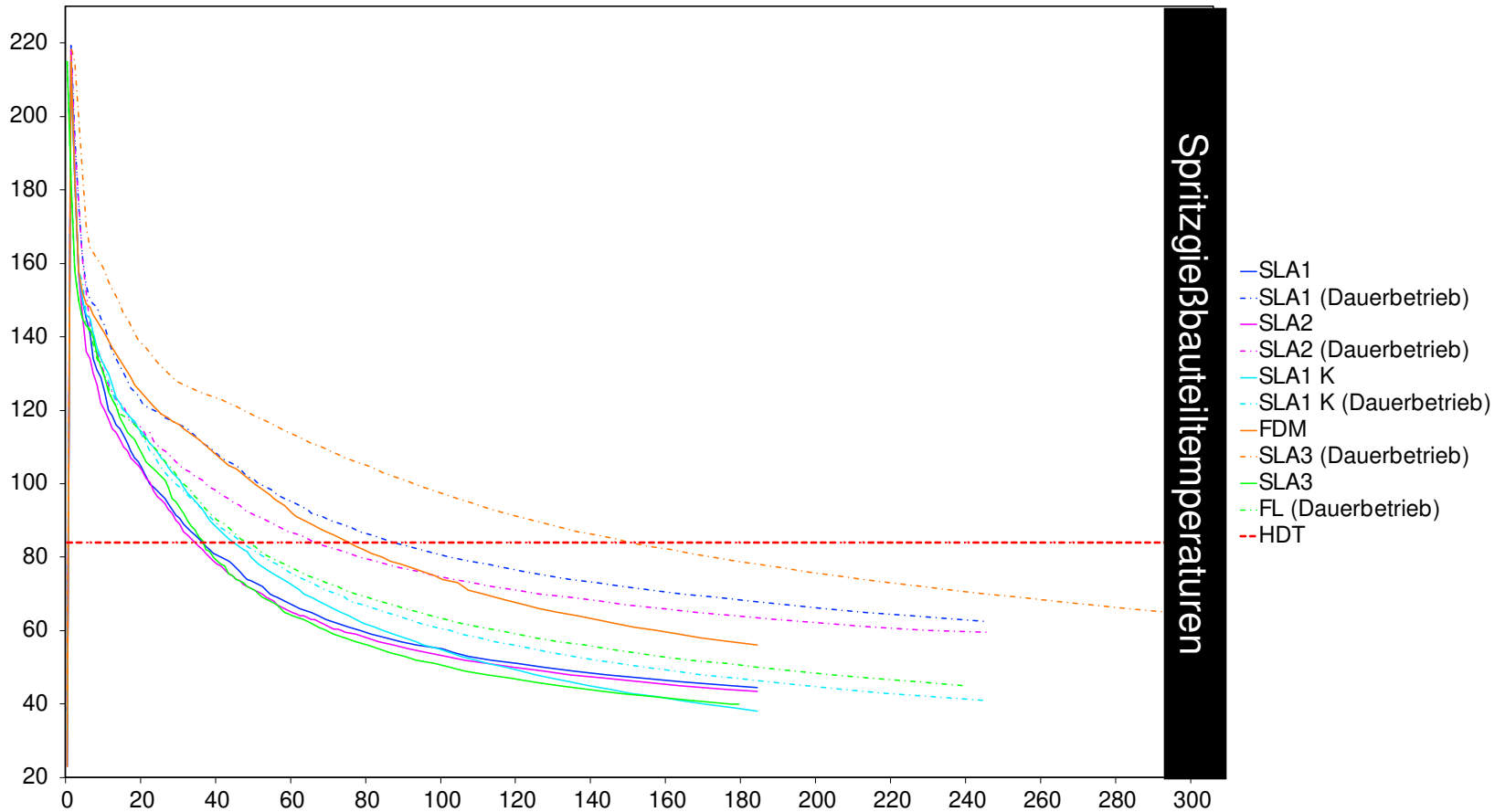
Ergebnisse

Geometrische Abmessungen



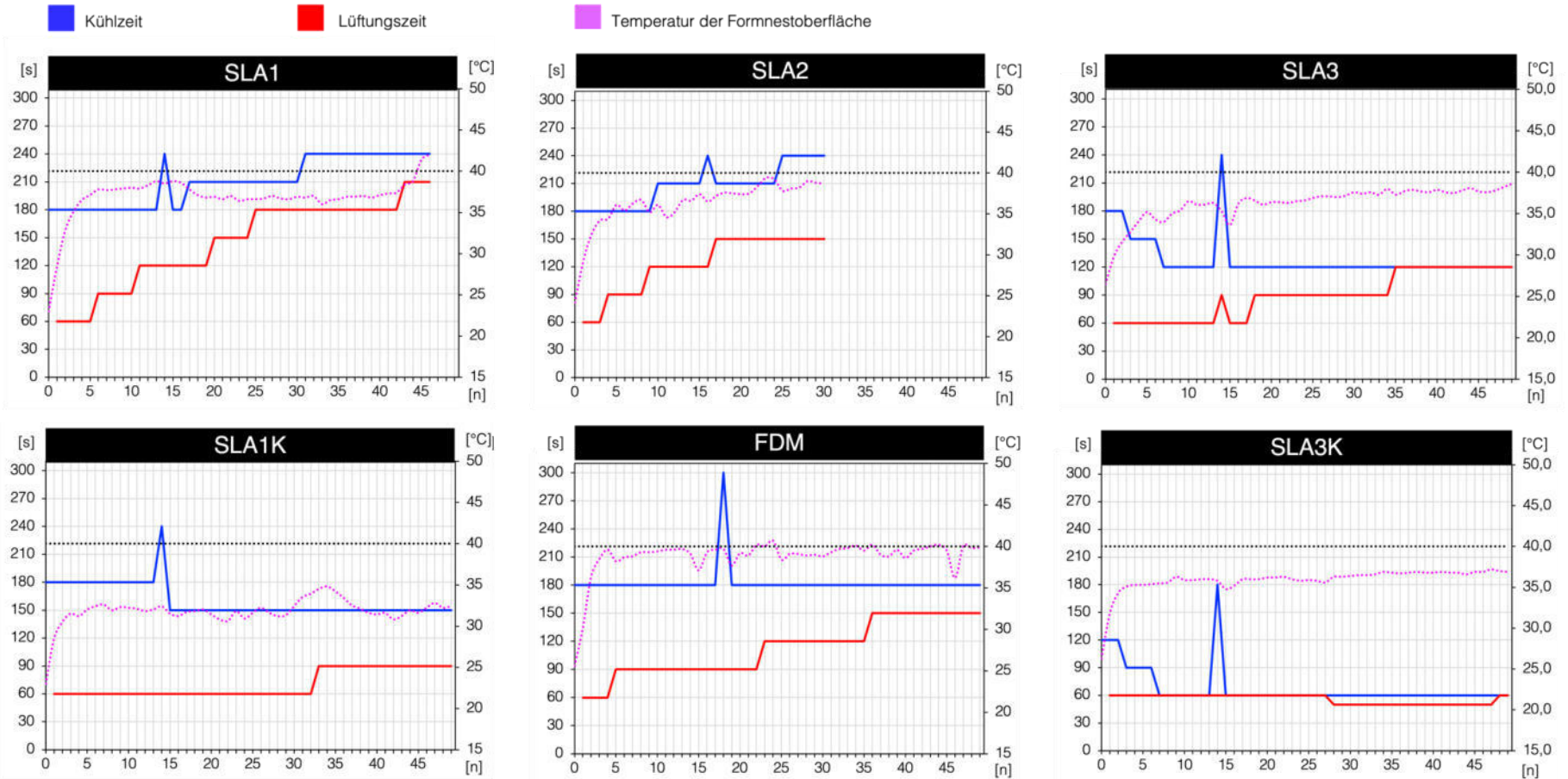
Ergebnisse

Temperaturmessungen - Spritzgießbauteiltemperaturen



Ergebnisse

Temperaturmessungen – Lüftungs- und Kühlzeiten



Ergebnisse

Bauteilqualität



Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung:

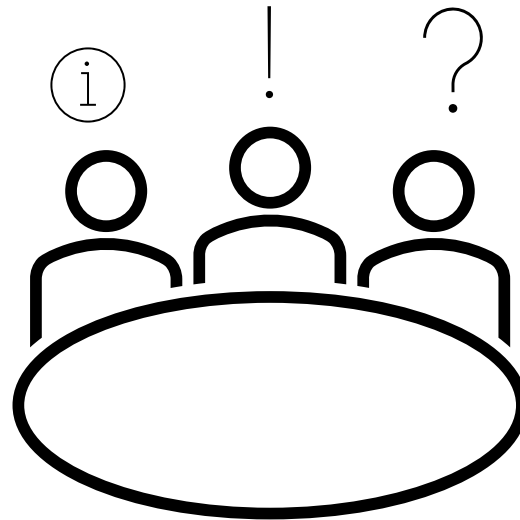
- Spritzgießprozess und Werkzeugauslegung erfordern Anpassungen
 - Beste Ergebnisse wurden mit Entformungsschrägen von 5° und einer 50/50 Aufteilung erreicht
 - Kanten sollten idealerweise mit Entformungsschrägen ausgestattet werden
 - Der Spritzgießprozess muss um den Schritt „Lüftung“ erweitert werden
- Das FDM-Verfahren und der Hersteller Formlabs boten höchste Präzision
- Spezial-Materialien sind nicht zwingend notwendig, können jedoch erhöhte Standzeit ermöglichen
- Die Zykluszeit beträgt ohne Kühlung schnell 4-5 Minuten
- Eine Luftkühlung kann die Zykluszeit auf ca. 2-3 Minuten reduzieren

Ausblick:

- Evaluierung des systematischen Fehlers
- Standzeitanalyse bis zum Totalversagen der Werkzeuge SLA3 und SLA3K
- Untersuchung des Einflusses des Füllgrads auf die Leistungsfähigkeit von FDM-Werkzeugen
- Untersuchung weiterer Werkzeugwerkstoffe
- Untersuchung weiterer Bauteilgeometrien

Gemeinsame Diskussion

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Quellenverzeichnis

- [1] H. Krahn, D. Eh, und H. Vogel, 1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen, 1. Aufl. München: Hanser, 2008.
- [2] C. Hopmann, W. Michaeli, H. R. Greifeld, F. Ehrig, und H. Greif, Technologie des Spritzgießens: Lern- und Arbeitsbuch, 4., Aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2017.
- [3] J. Levesque, A. Shah, S. Ekhtiari, J. Yan, P. Thornley, und D. Williams, „Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: A scoping review“, EFORT Open Rev., Bd. 5, S. 430–441, Juli 2020, doi: 10.1302/2058-5241.5.190024.
- [4] „https://formlabs.com/_next/image?url=https%3A%2F%2Fformlabs-media.formlabs.com%2Ffiler_public_thumbnails%2Ffiler_public%2F3a%2F67%2F3a672615-25aa-4e27-8a63-6ab6e73dc1ea%2F210114-ed-sls-guide-fuse-launch-illustrations-2-xl.png__1354x0_q85_subsampling-2.jpg&w=1920&q=75“. Zugegriffen: 17. Mai 2024. [Online].
- [5] T. Mitterlehner, „Auslegung und Charakterisierung additiv gefertigter Formeinsätze für Spritzgießwerkzeuge“, Linz, 2020.

Session 6: polymerbasierter 3D-Druck

**Entwicklung von additiv gefertigten
Stützstrukturen für die Integration von
Transpondern in Spritzgussbauteile**

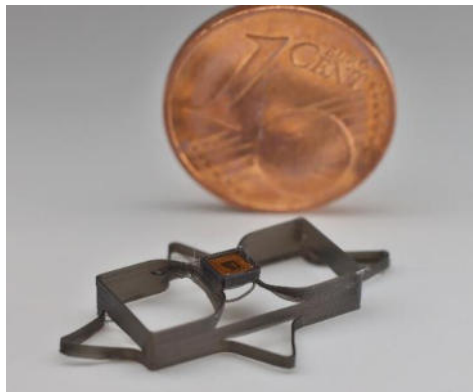
Jonas Siegrist,
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

„Entwicklung von additiv gefertigten Stützstrukturen für die Integration von Transpondern in Spritzgussbauteilen“

Autoren: **Jonas Siegrist**¹, Andreas Hopf¹, Jens Bliedtner¹, Michael Jubit², Wilhelm Radle³, Nicole Radle³

¹Ernst-Abbe-Hochschule Jena, ²PRIME-tec GmbH, ³new direction GmbH

Produkte zu kennzeichnen ist zu einer Standardaufgabe bei der Herstellung dieser geworden. So werden bspw. Barcodenummern aufgedruckt oder Etiketten auf die Produkte und Verpackungen direkt gedruckt. Wesentliche Ziele sind dabei, das Produkt zu kennzeichnen, Daten zu hinterlegen, wie Seriennummern und Verfallsdatum oder auch ein Firmenlogo dem Produkt zuzuweisen. Bei Spritzgussbauteilen wird aktuell die Bauteilhistorie über aufgedruckte oder geprägte Seriennummern realisiert. Nachteilig hierbei ist, dass diese Codierung durch Abnutzungen oder Verschleiß teilweise bzw. komplett unkenntlich wird. Dies erschwert eine Rückverfolgung der Bauteile, einerseits für eine verfolgbare Prozess- und Lieferkette und zum anderen zur Bauteiloptimierung für Rückschlüsse auf Produktionsmängel. Aus diesem Grund sollen RFID-Chips in Spritzgussbauteile integriert werden. Diese sollen die während der Herstellung erhobenen Prozessdaten und bauteilspezifischen Daten (z.B. CAD-Modell) in einem digitalen Zwilling zur Nutzung als Bauteilhistorie speichern. Eine präzise Positionierung des RFID-Chips im Bauteil soll durch die Entwicklung einer additiv gefertigten Stützstruktur realisiert werden. Durch die RFID-Chips inklusive Stützstruktur kann eine konstante Positionierung der Chips während des Spritzgusses im Werkzeug gewährleistet werden, während gleichzeitig die Stützstruktur homogen ins Bauteil eingeschmolzen wird. Um dieses Ziel zu erreichen, werden ausgehend von Simulationsmodellen verschiedene Strukturen entwickelt und im Prozess charakterisiert. Anschließend wird die Position und die Funktionalität der RFID-Chips aufgenommen und bewertet. Anhand dieser Ergebnisse können in Abhängigkeit der Spritzgussgeometrie die additiv gefertigte Stützstruktur abgeleitet werden.



Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen KK5091622KU2)



Session 6: polymerbasierter 3D-Druck

Polymere Spritzgusswerkzeuge aus dem 3D-Drucker

Valentin Wiesner,
Hochschule Coburg



HOCHSCHULE
COBURG | TTZ OBERFRANKEN
Digitale Intelligenz in Lichtenfels

POLYMERE SPRITZGUSSWERKZEUGE AUS DEM 3D-DRUCKER

Ein vielversprechender Weg für den Spritzguss in
kleinen Stückzahlen

Valentin Wiesner, Jonas Nüßlein, Daniel Kubat, Christian Jäckel, Dimitri
Mehlmeister, Andreas Graf, Alexander Rost, Markus Stark, Marcel Trier





Automatisierung



Neue Werkstoffe und
Produktionsverfahren



KI für Engineering und
Produktion



Motivation - Spritzguss

Stand der Technik

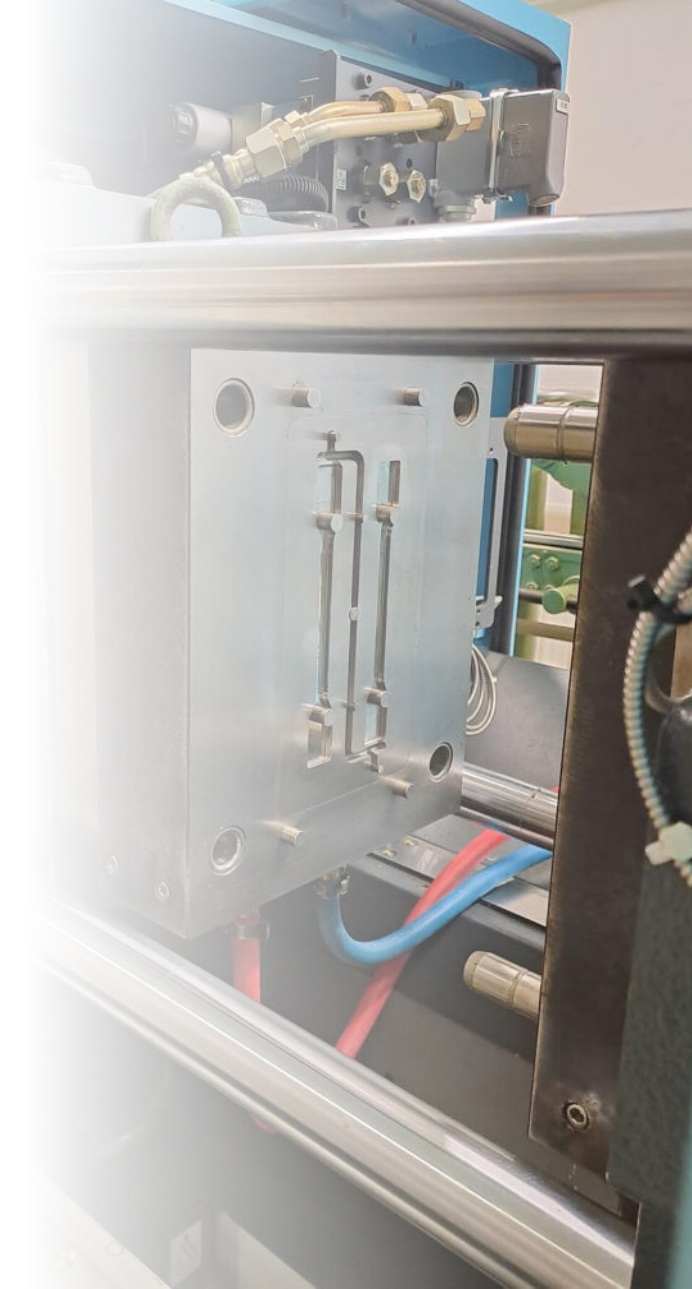
- Metallische Werkzeuge
 - Lange Lieferzeiten
 - Hohe Kosten
- Einsatz in Serienfertigung
- Kostengünstige Spritzgussteile

Herausforderung bei:

- Prototypen im finalen Werkstoff
- kleinen Stückzahlen
- schneller Verfügbarkeit

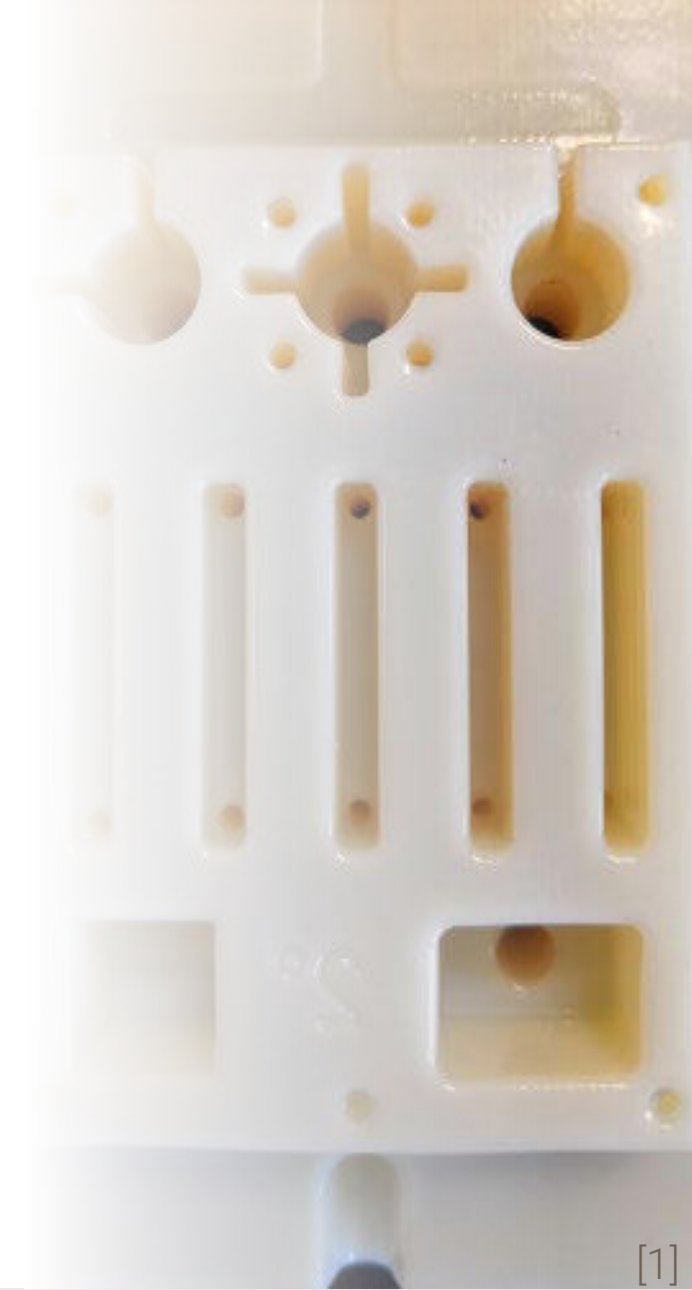
Lösungsansatz:

Polymere, 3D-gedruckte Werkzeuge / Werkzeugeinsätze



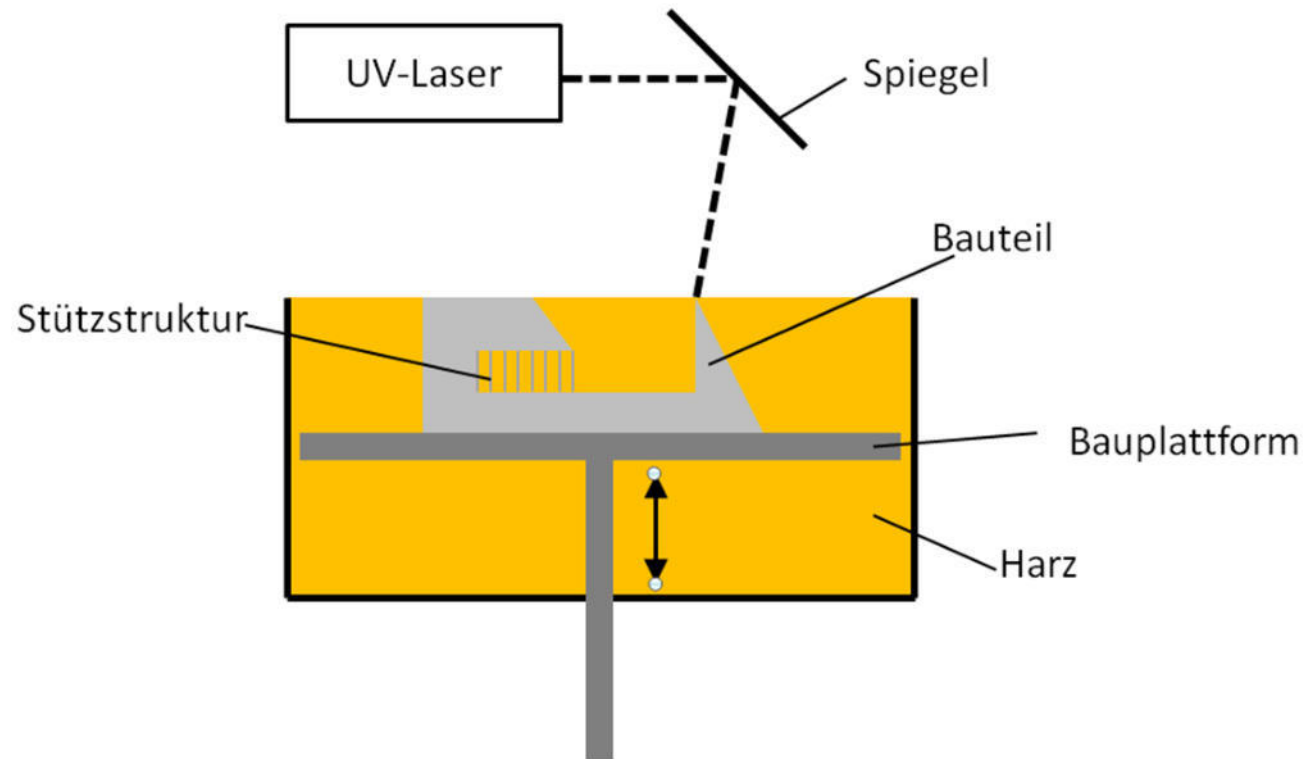
Zielsetzung

- Einsatz von harzbasierten 3D-Druckverfahren für die Herstellung von Spritzgusswerkzeugen und Werkzeugeinsätzen
- Qualifizierung verschiedener Harzsysteme
- Entwicklung einer Anwendung



Verwendete, harzbasierte Verfahren

Stereolithographie (SLA)



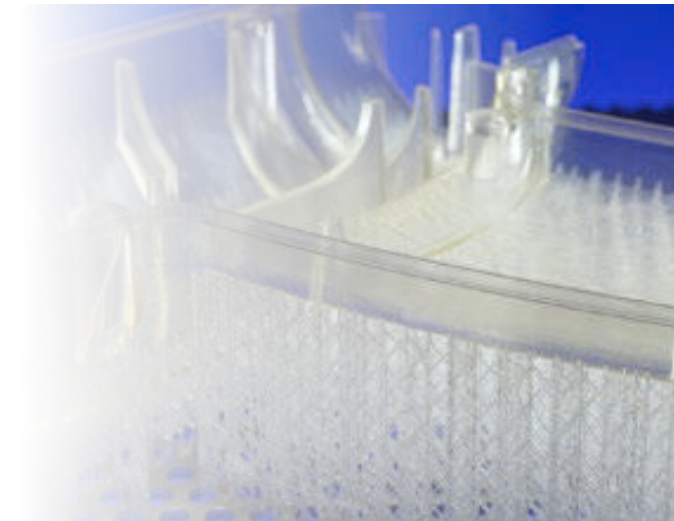
schematische Darstellung des SLA-Verfahrens



[3Dsystems]



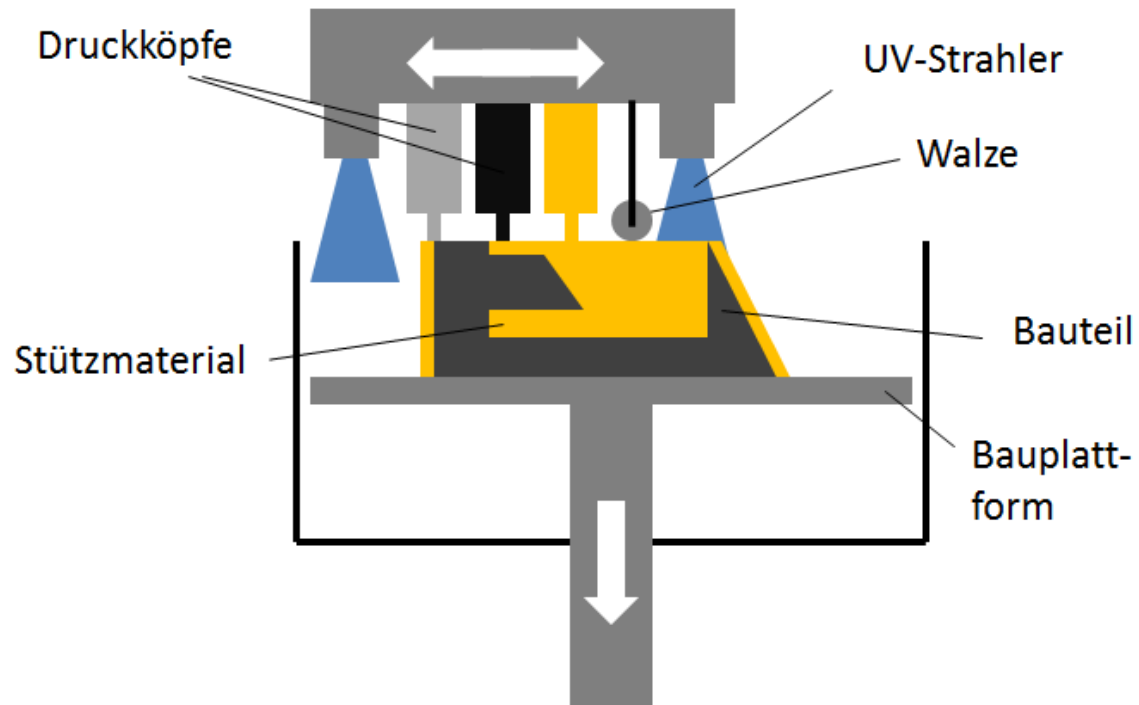
[3Dsystems]



[www.kunststoff.de]

Verwendete, harzbasierte Verfahren

PolyJet Modeling (PJM)



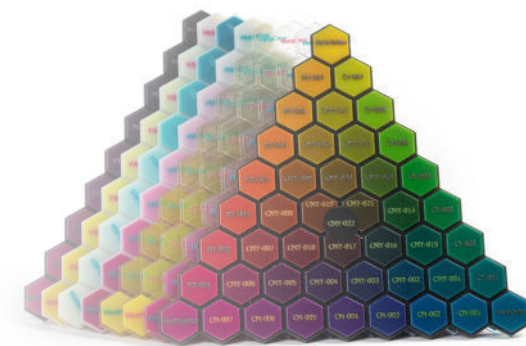
schematische Darstellung des PJM-Verfahrens



[stratasys]



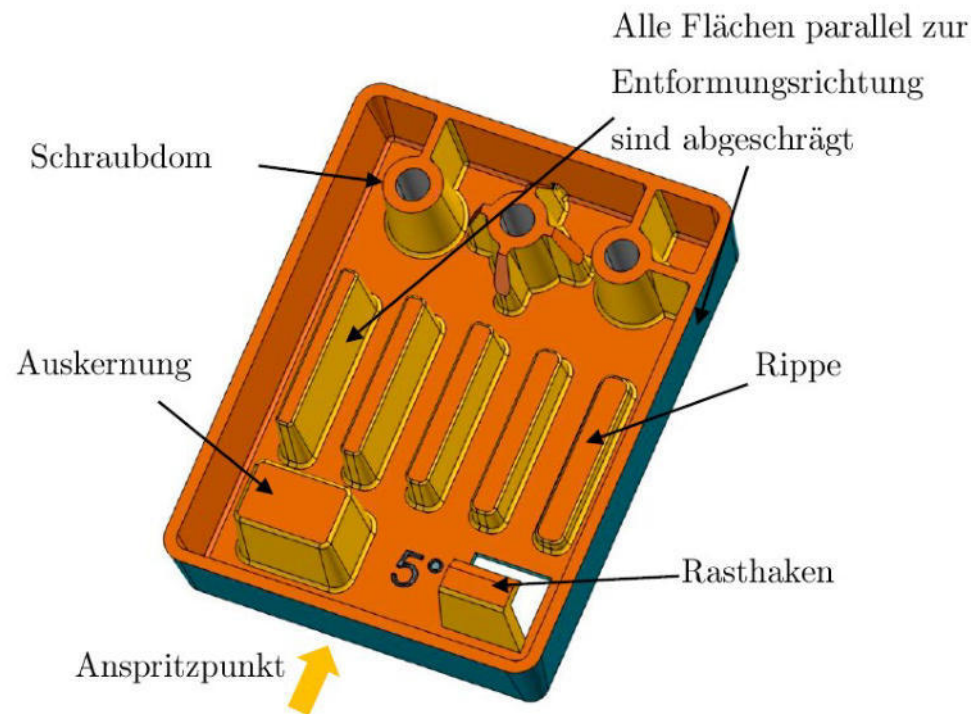
[stratasys]



[materialise.com]

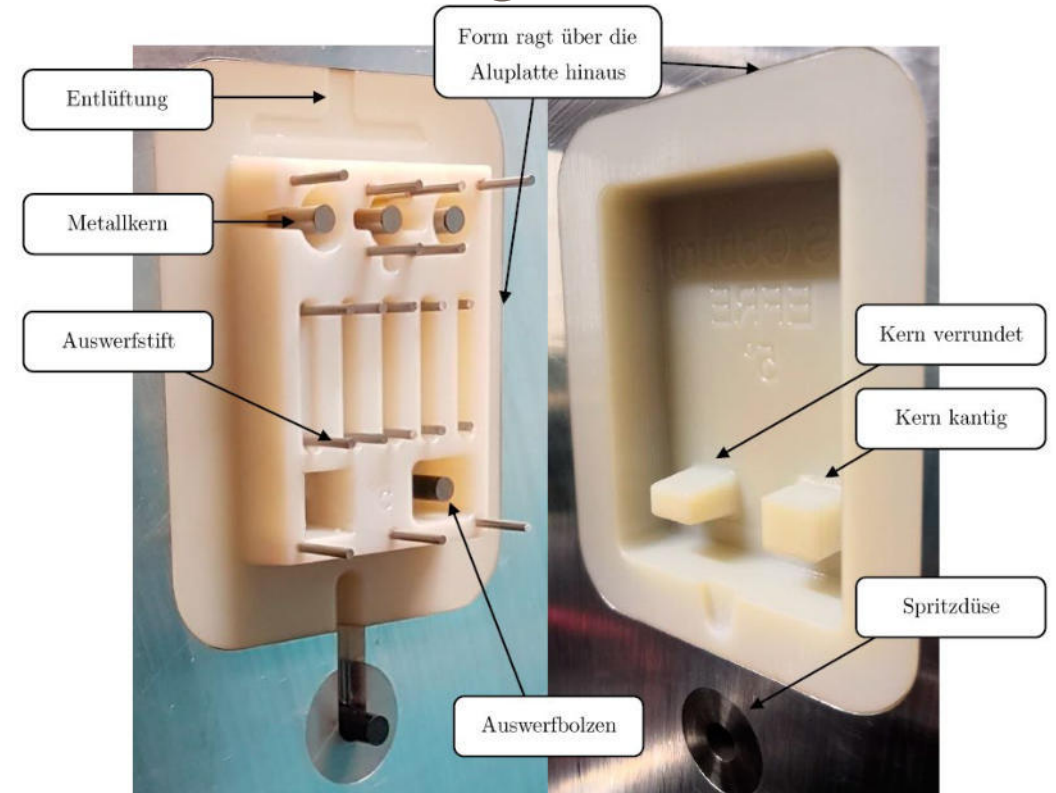
Qualifizierung von Harzen - Testgeometrie

Testbauteil



Bauteiltestgeometrie mit 5° Entformungsschrägen, [1]

Werkzeugeinsatz



Werkzeugeinsatz aus Digital ABS mit dem Kern (links) und der Matrice (rechts), [1]

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 1

Untersuchung von Materialien für das PolyJet Modeling

Material	Materialkennwerte			Druckparameter	
	Zugfestigkeit in N/ mm ²	Zug-E-Modul in N/mm ²	Bruchdehnung in %	Formbeständigkeits- temp. in °C (4,5 bar)	Schichtdicke in µm
VeroClear	50-60	2000-3000	10 - 25	45 - 50	16
VeroGray	50-65	2000-3000	10 - 25	45 - 50	16
Digital ABS PLUS*	55 - 60	2600 - 3000	25 - 40	82 - 90	32

[2,3,4]

Allgemeine Parameter

*Werkzeuge sind getempert

Entformungsschräge

2°

Werkzeugtemp. vor nächstem Schuss:

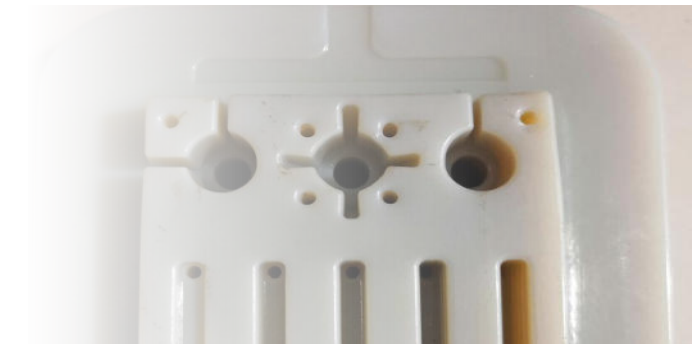
50 °C

Druckmodus

glossy



VeroClear, [1]



VeroGray, [1]



DigitalABS, [1]

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 1

Spritzgussparameter

Spritzgussmaterial	PE-HD
Temp. der Schmelze in °C	185
Volumetrischer Umschaltpunkt in cm ³	6,55
Schließkraft in kN	250
Umschaltdruck in bar (spez.)	720
Nachdruck in bar (spez.)	360
Spritzgeschwindigkeit in mm/s	55
Kühlzeit in s	250

[1]

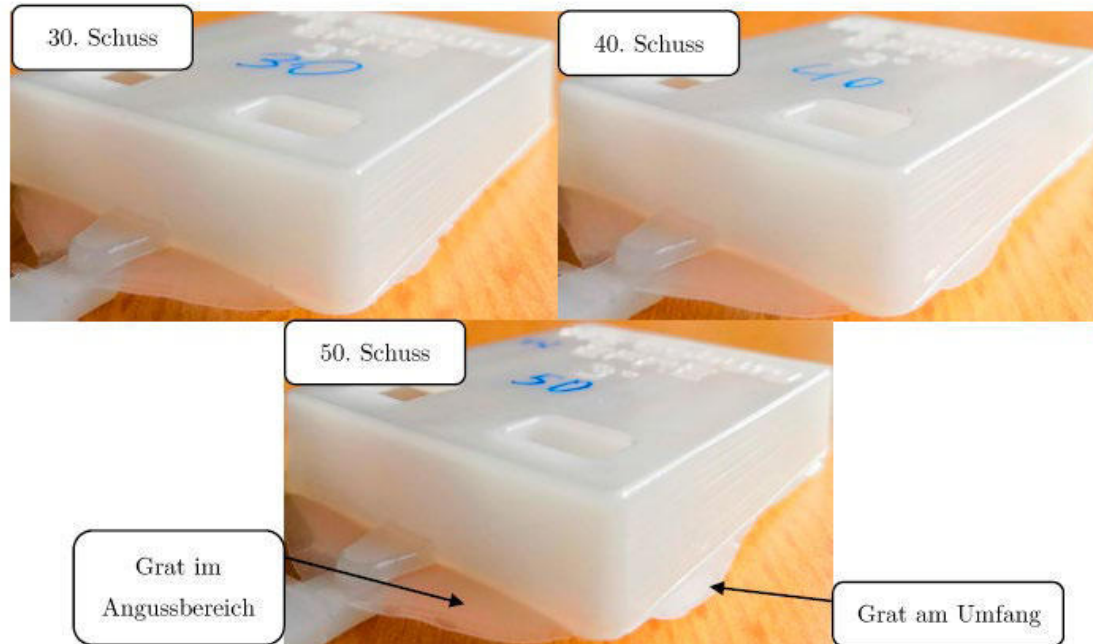


Spritzgussmaschine
ergotech 25/280-120system, [1]

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 1

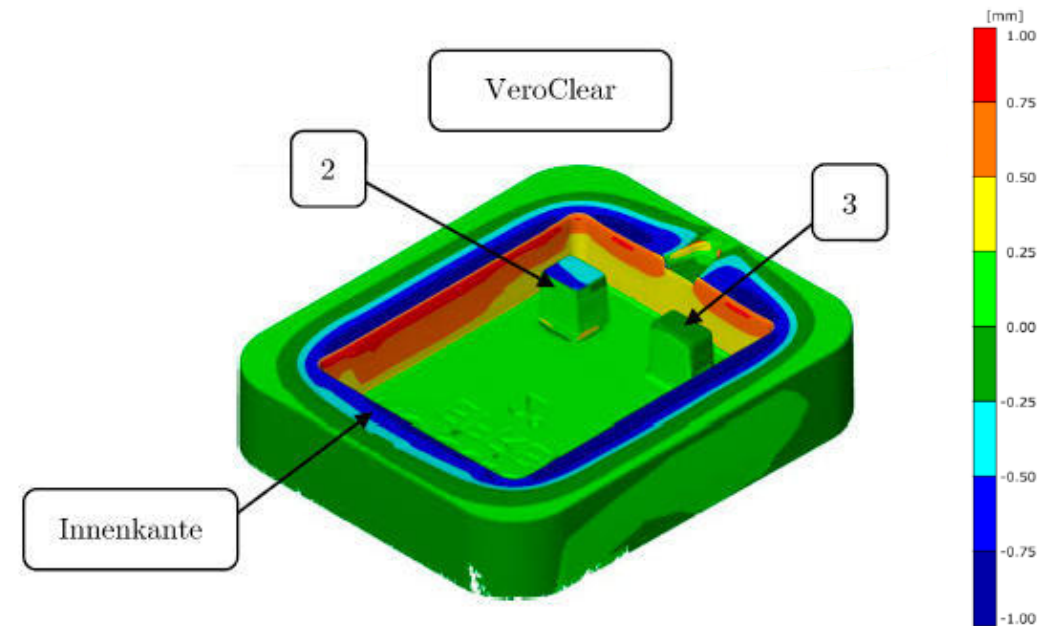
Qualitätsmerkmal: Dicke des Grats

- Grund: Setzverhalten der Werkzeuge



Beispielhafte Gratbildung an Bauteilen, [1]

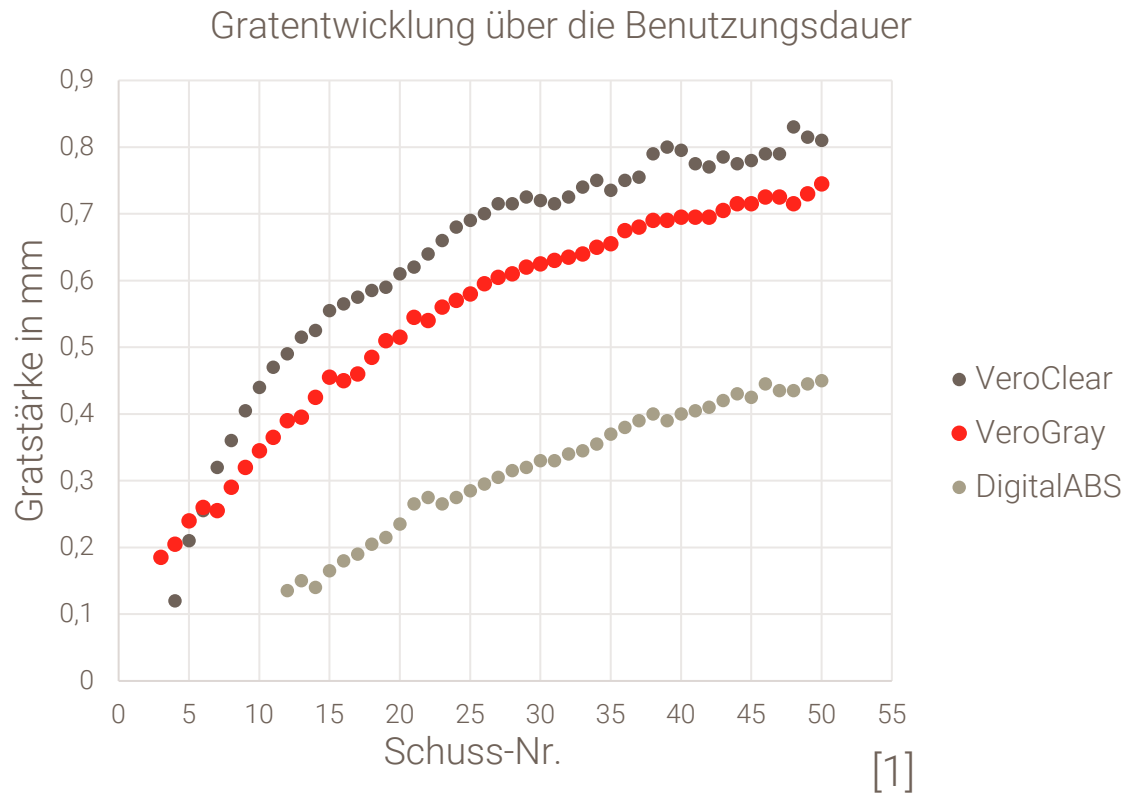
Setzverhalten am Beispiel von VeroClear:



3D-Scan der benutzten Werkzeugform, [1]

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 1

Vergleich des Verhaltens der Werkzeuge in Abhängigkeit der Schusszahl für die drei Harzsysteme auf Basis der Gratstärke



Spritzgussmaterial:
PE-HD

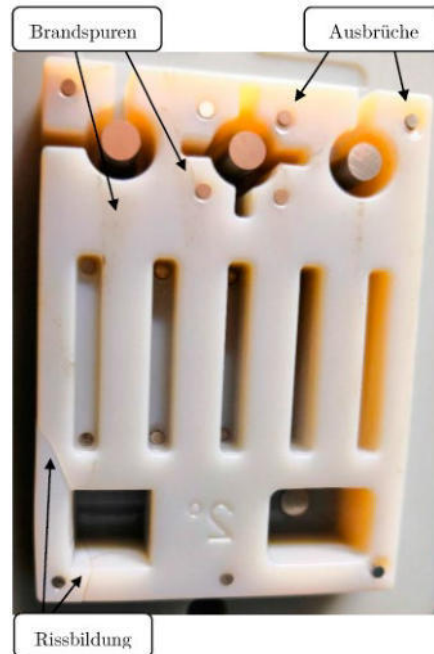
Ergebnis:
Werkzeug aus Digital
ABS sind in Grenzen
geeignet

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 1

Weitere Auffälligkeiten:

Spritzgussmaterial: PE-HD

Werkzeug: VeroGray
Schuss-Nr.: 1



Verschleißausbildung des Kerns, [1]

Spritzgussmaterial: Ultradur S 4090 G6
(PBT+ASA+PET GF30)

Werkzeug: Digital ABS
Schuss-Nr.: 1



- Starke Haftung am Werkzeug
- Beschädigung

Verschleißausbildung der Matrize, [1]

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 2

Untersuchung von Materialien für PJM und SLA

Material	Materialkennwerte				Druckparameter	
	Zugfestigkeit in N/ mm ²	Zug-E-Modul in N/mm ²	Bruchdehnung in %	Formbeständigkeits- temp. in °C (4,5 bar)	Schichtdicke in µm	Druckverfahren
Digital ABS PLUS*	55 - 60	2600 - 3000	25 - 40	82 - 90	32	PJM
Somos Taurus*	49	2206	17	91	50	SLA
Somos PerFORM Reflect*	63,3	9653	0,96	276	50	SLA

[4,5,6]

Allgemeine Parameter

*Werkzeuge sind getempert

Entformungsschräge 2°

Werkzeugtemp. vor nächstem Schuss: 50 °C

Material PE-HD

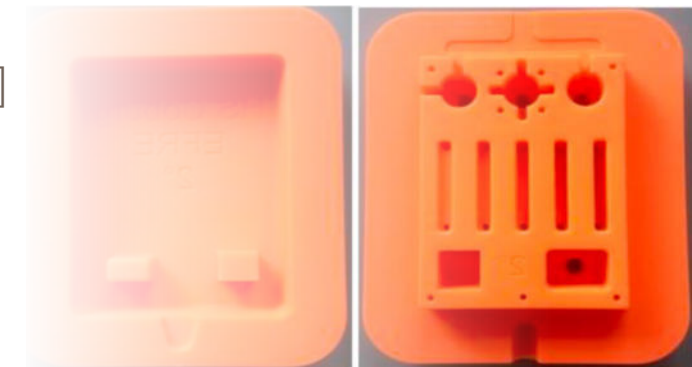
Spritzgussparameter siehe Versuchsreihe 1



Digital ABS PLUS, [7]



Somos Taurus, [7]

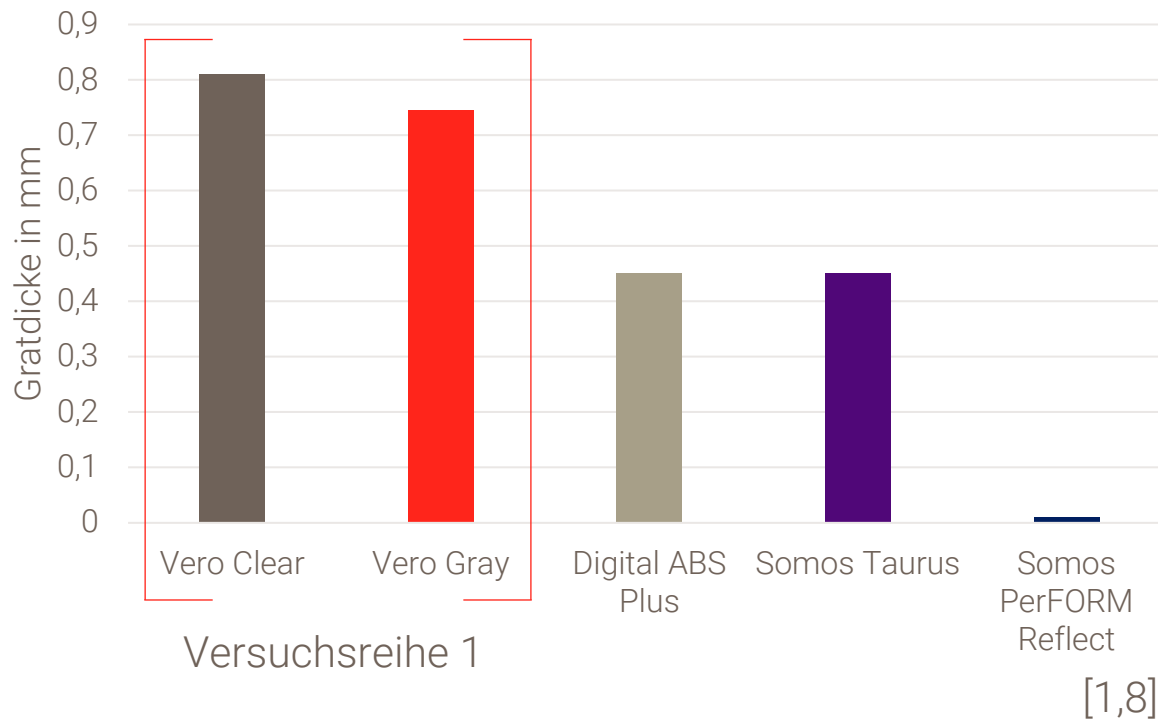


Somos PerFORM Reflect, [7]

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 2

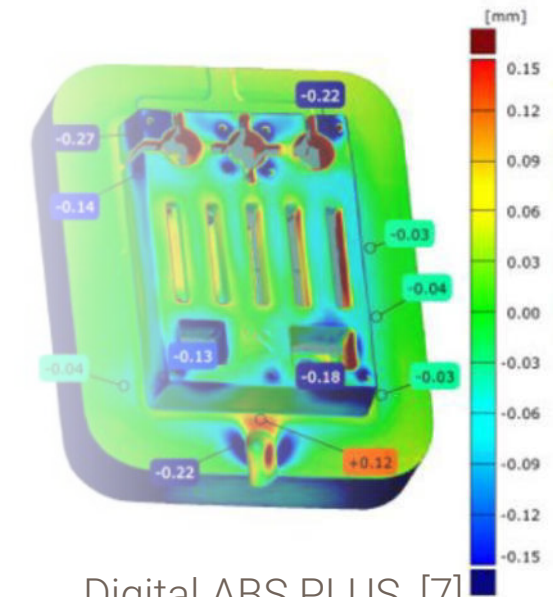
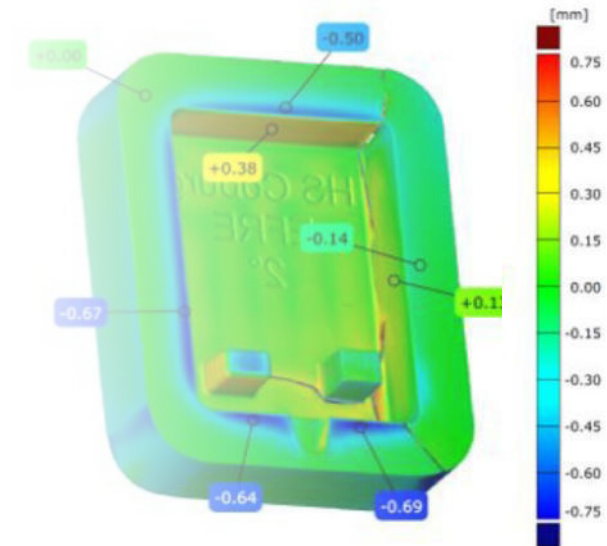
Vergleich des Verhaltens der Werkzeuge: Gratdicke nach 50 Schuss

Vergleich der Gratbildung am 50ten
Spritzgussbauteil



Spritzgussmaterial:
PE-HD

Ergebnis:
Werkzeug aus
Somos PerFORM
Reflect verändert
sich kaum



Digital ABS PLUS, [7]

Harzqualifizierung– Versuchsreihe 2

Anwendung Somos PerForm Reflect für
Ultradur S 4090 G6 (PBT+ASA+PET GF30)



Gefertigtes Bauteil (Schuss-Nr. 6), [7]

Werkzeugbeschädigung
durch Anhaftung



Werkzeugform Somos PerForm Reflect (Schuss-Nr. 36), [7]

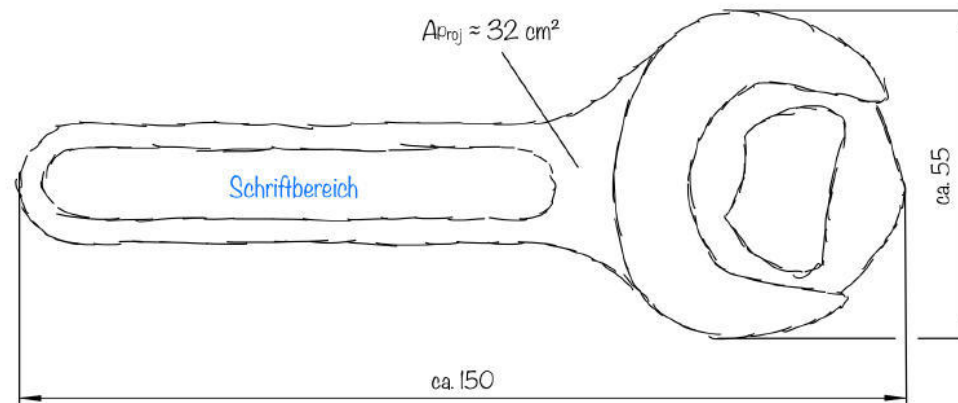
Ergebnis: Mit Werkzeugen aus Somos PerForm Reflect können auch kritischere Materialien verarbeitet werden

Entwicklung einer Anwendung

3D-gedruckte Einleger für die schnelle Individualisierung von Spritzgießwerkzeugen

Ziele:

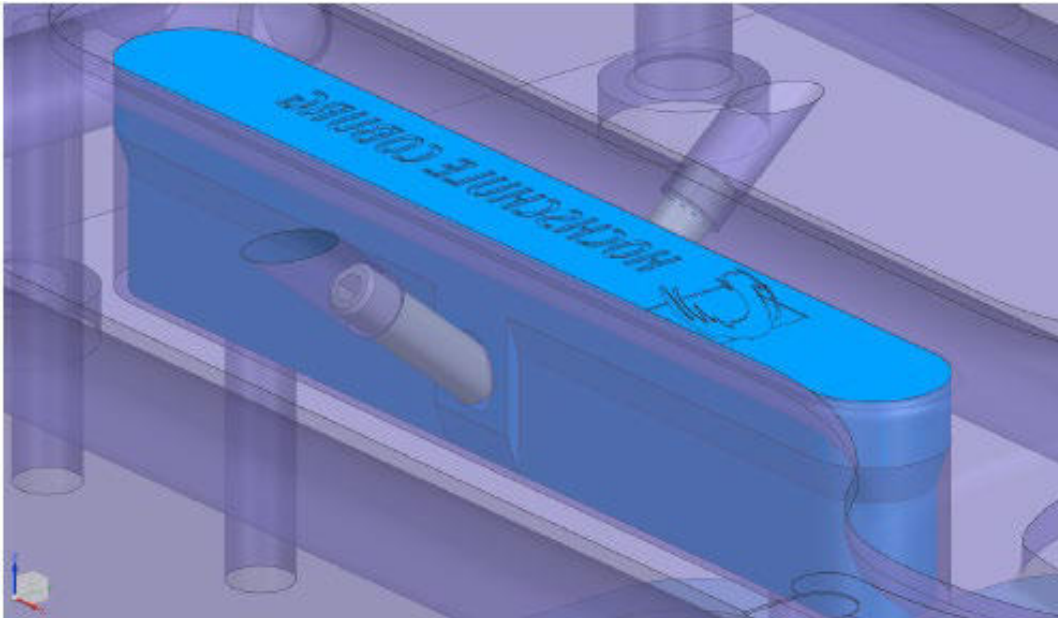
- Spritzgussteil
- metallisches Werkzeug, z. B. aus Aluminium
- Individualisierung eines Bereichs, durch schnell wechselbaren, polymeren, 3D-gedruckten Einsatz, z. B. mit einem Schriftzug / Logo



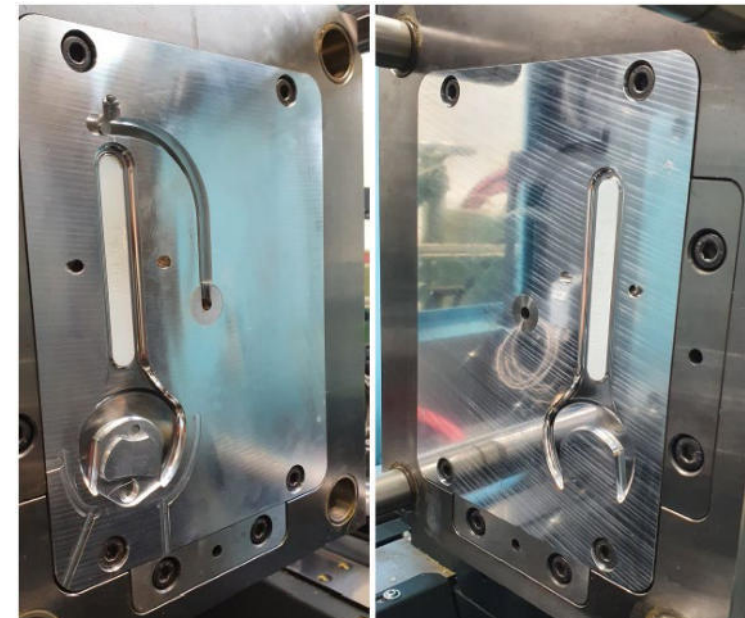
Entwicklung einer Anwendung

3D-gedruckte Einleger für die schnelle Individualisierung von Spritzgießwerkzeugen

Umsetzung:



Gestaltung und Befestigung des Einlegers im Alu-Werkzeug, [9]



Fertig montiertes Wechselformwerkzeug mit Einlegern aus Digital ABS PLUS, [9]

Entwicklung einer Anwendung

3D-gedruckte Einleger für die schnelle Individualisierung von Spritzgießwerkzeugen

Test:

- Einleger für Individualisierung: Digital ABS PLUS
- Material: ABS (mit chemischem Treibmittel) mit schwarzem PC Blend eingefärbt
- Verwendung eines Metall-Einlegers für hochbelastete Bereiche

Spritzgusswerkzeug mit eingelegtem Metall-Einleger (oben) und fertig gespritztem Flaschenöffner (unten), [9]



Zusammenfassung

- **Unterschiedliche Harze für die Herstellung von polymeren Spritzgusswerkzeugen sind verfügbar**
- **Geeignete Verfahren zur Herstellung der Werkzeuge z. B. PolyJet Modeling, Stereolithographie (ohne aufwendige Nachbearbeitung der Oberflächen)**
- **Anwendbarkeit im Spritzguss ist von vielen Faktoren abhängig, u. a.:**
 - Harzsystem, inkl. Druck- und Verarbeitungsparameter
 - Werkzeuggestaltung
 - Spritzgussmaterial
 - Spritzgussparameter
 - Trennmittel
- **Somos Perform Reflect zeigt eine besonders gute Eignung**
- **mit Einlegern lassen sich konventionelle, metallische Werkzeuge schnell individualisieren**



Herzlichen Dank

[9]

Quellen

- 1: Mehlmeister, D. (2020), „Untersuchung der Eignung und Bestimmung der Einsatzgrenzen 3D-gedruckter polymerer Werkzeugeinsätze für den Spritzguss“, Hochschule Coburg, Coburg
- 2: Alphacam GmbH, (o.D.), „Digital ABS Plus“, [Online], Verfügbar unter: <https://www.alphacam.de/materialien/materials-list/material-detail/digital-abs-plus>, [Zugriff am 11.10.2024]
- 3: Alphacam GmbH, (o.D.), „VeroClear“, [Online], Verfügbar unter: <https://www.alphacam.de/materialien/materials-list/material-detail/veroclear>, [Zugriff am 11.10.2024]
- 4: Alphacam GmbH, (o.D.), „DraftGrey“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.alphacam.de/materialien/materials-list/material-detail/draftgrey>, [Zugriff am 11.10.2024]
- 5: dsm: „Materialdatenblatt Somos® Taurus“, [Online], Verfügbar unter: https://c26c15d5-be43-47a7-a97e-2c2f622e73d7.filesusr.com/ugd/2f4767_2d012f95a13c489fbb4fec0570d3504.pdf, [Zugriff am 11.10.2024]
- 6: Stratasys Headquarters, (o.D.), „Somos® PerFORM™“, [Online], Verfügbar unter: https://www.stratasys.com/contentassets/7c70078f60bc45b5bd0cc691ed03d3de/mds_sl_somos-perform_0123a.pdf?v=48f730, [Zugriff am 11.10.2024]
- 7: Graf, A., (2021) „Untersuchung der Eignung von 3D-gedruckten Werkzeugeinsätzen im Spritzguss“, Hochschule Coburg, Coburg
- 8: Kubat, D., et.al, (2022), „Kunststoffe Werkstoffe - Verarbeitung – Anwendung“. In: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG Bd. 03/2022, S. 96–100
- 9: Jäckel, C., (2022), „Entwicklung 3D-gedruckter Einsätze für die schnelle Individualisierung von Spritzgusswerkzeugen“, Hochschule Coburg, Coburg

Session 7:

Medizintechnik

**Slicer-Entwicklungen mit neuartigem
Rotationsdrucker für medizinische Prothesen**

Axel Wolf B. Eng., Dr.-Ing Hagen Bankwitz,
Hochschule Mittweida



Ingenieurwissenschaften



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

Mitteldeutsches Forum | 3D-Druck in der Anwendung

Neuentwicklung eines Slicer-Programms zur Verwendung mit einem
3D-Rotationsdrucker mit Polarkoordinatensystem

Axel Wolf, M.Sc.

[hs-mittweida.de](https://www.hs-mittweida.de)

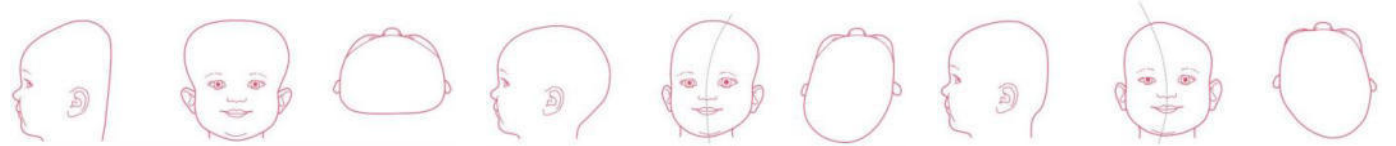
Agenda

1. Einführung
2. 3D-HRD im Detail
3. Programmierung Slice-O
4. Ergebnisse
5. Ausblick

1. Einführung

Forschungsprojekt

- Anwendung aus der Medizin
 - Kopfdeformitäten bei Babys
 - Helmorthese aus manueller Fertigung
 - Zeitintensiver Prozess
 - Schwierig nachträglich Anpassungen vorzunehmen
 - Häufiger Wechsel (Wachstum)
- ➔ Lösung durch additive Fertigung



1. Einführung

Ziele des Forschungsprojekts

- Verbesserung der Herstellungsgeschwindigkeit von rotationssymmetrischen Teilen (u.a. Prothese, Orthesen)
- Automatisierte Einbringung von Sensorik zur telemedizinischen Überwachung der Patientin / des Patienten

Umsetzung

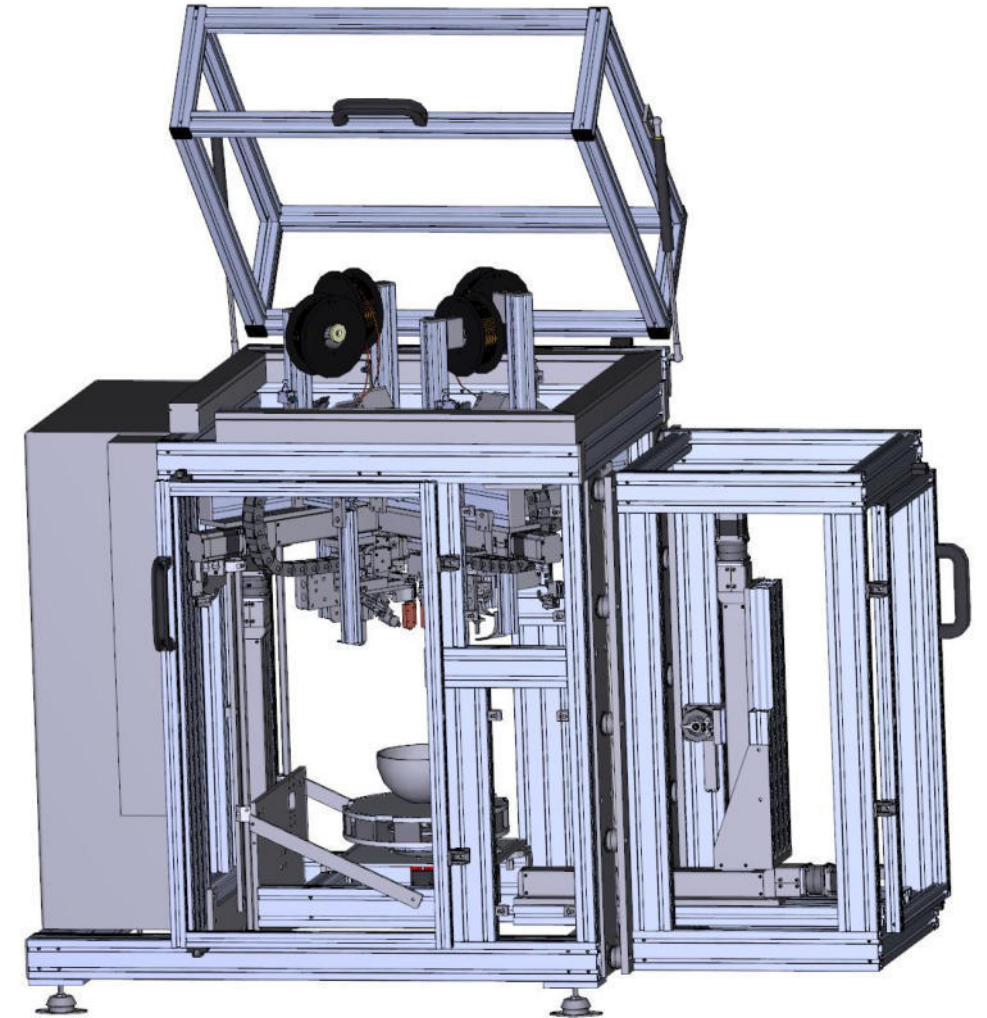
- Entwicklung und Verbesserung eines neuen 3D Hochgeschwindigkeitsrotationsdruckers (3D-HRD)

Agenda

1. Einführung
2. 3D-HRD im Detail
3. Programmierung Slice-O
4. Ergebnisse
5. Ausblick

2. 3D-HRD im Detail

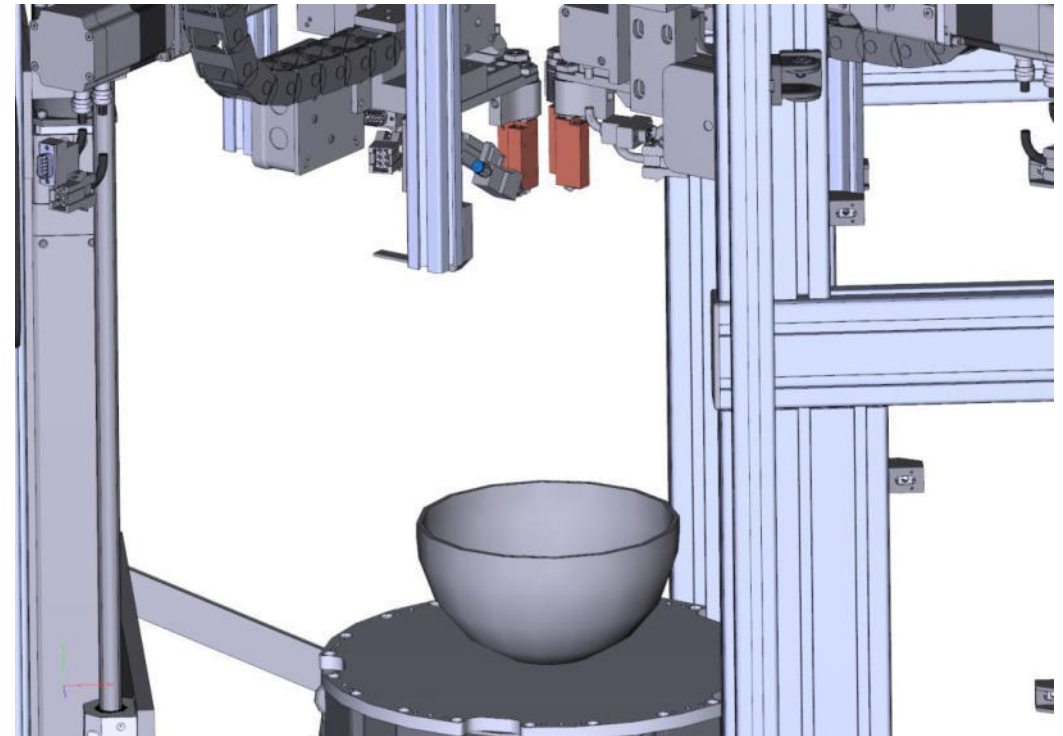
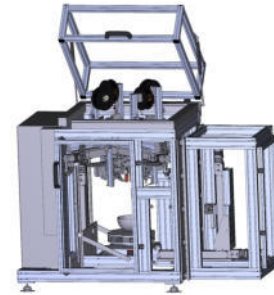
Aufbau und Funktionen des 3D-HRD



2. 3D-HRD im Detail

Aufbau und Funktionen des 3D-HRD

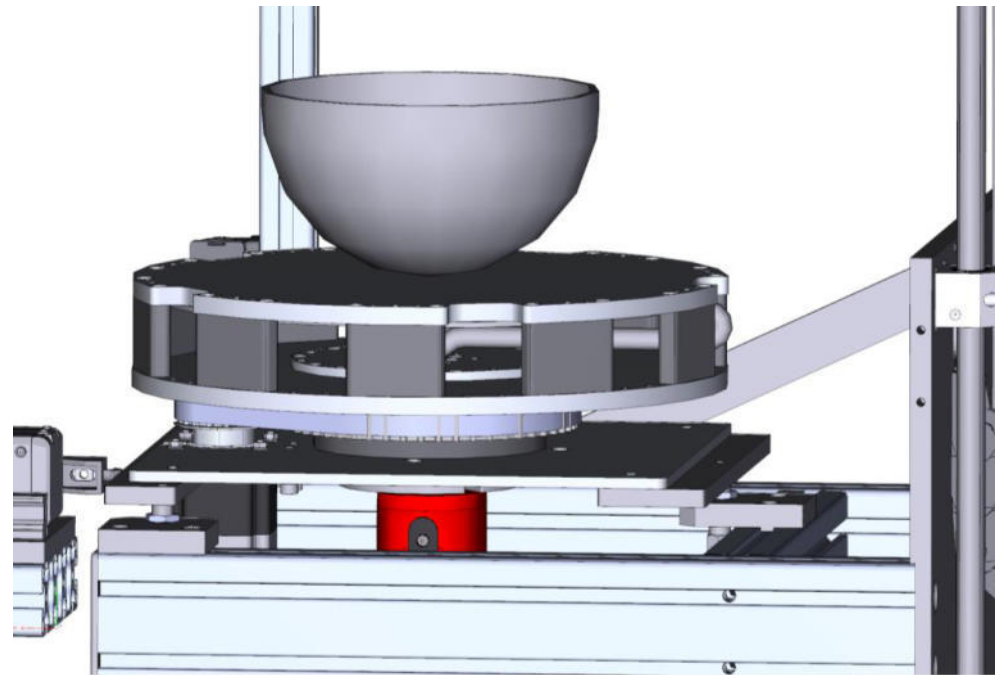
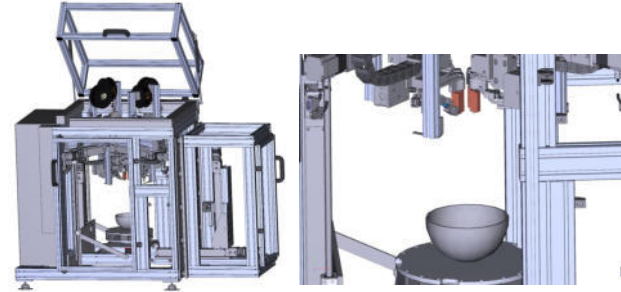
- FLM-Prinzip (50 mm langes Hot End)



2. 3D-HRD im Detail

Aufbau und Funktionen des 3D-HRD

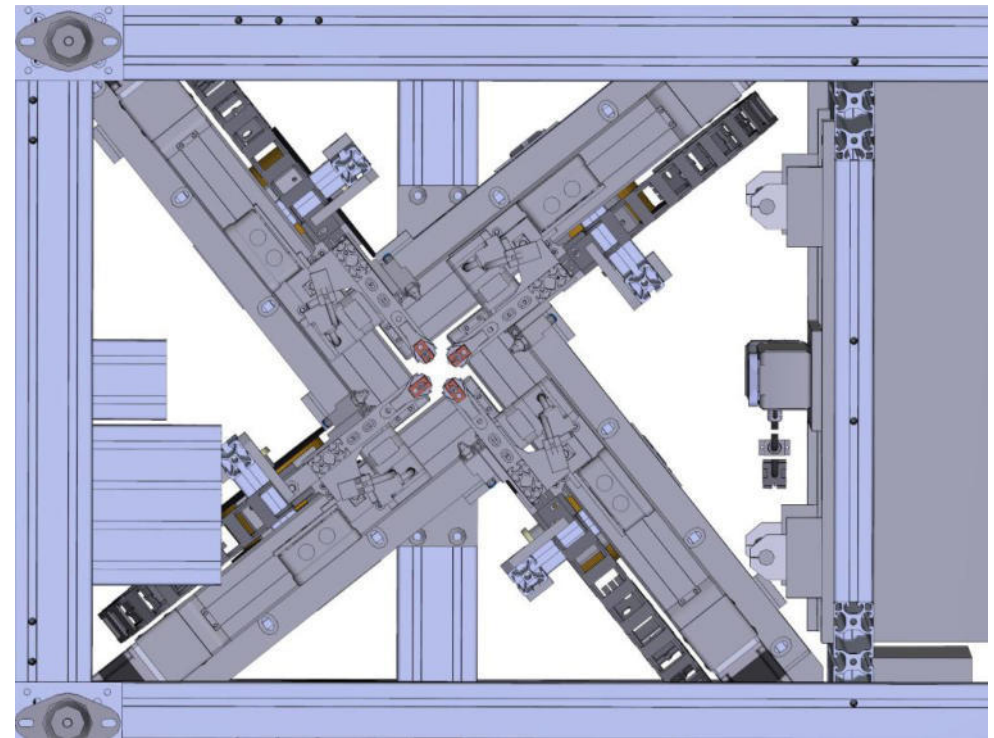
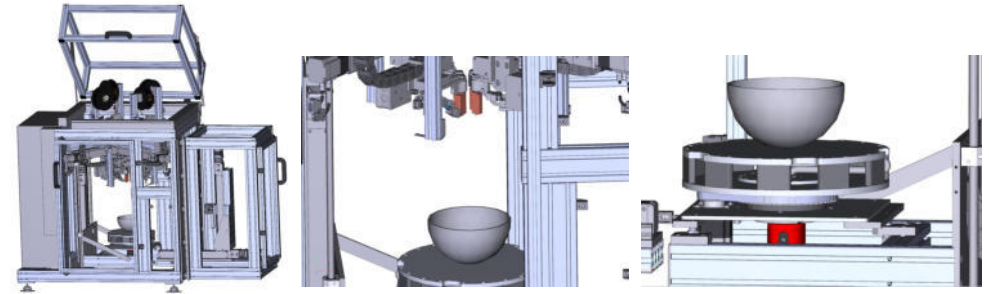
- FLM-Prinzip (50 mm langes Hot End)
- Rotationsbauplattform



2. 3D-HRD im Detail

Aufbau und Funktionen des 3D-HRD

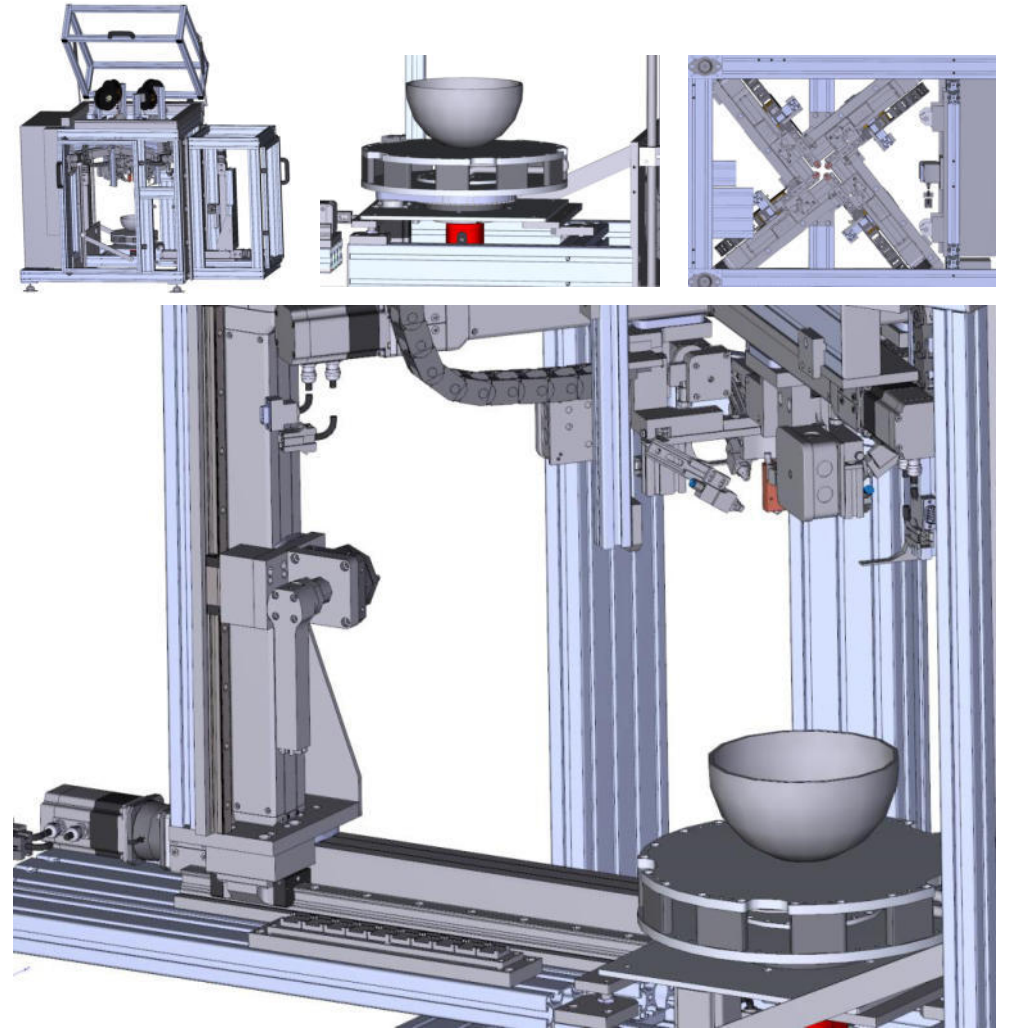
- FLM-Prinzip (50 mm langes Hot End)
- Rotationsbauplattform
- Vier Extruder 90° versetzt zueinander angebracht



2. 3D-HRD im Detail

Aufbau und Funktionen des 3D-HRD

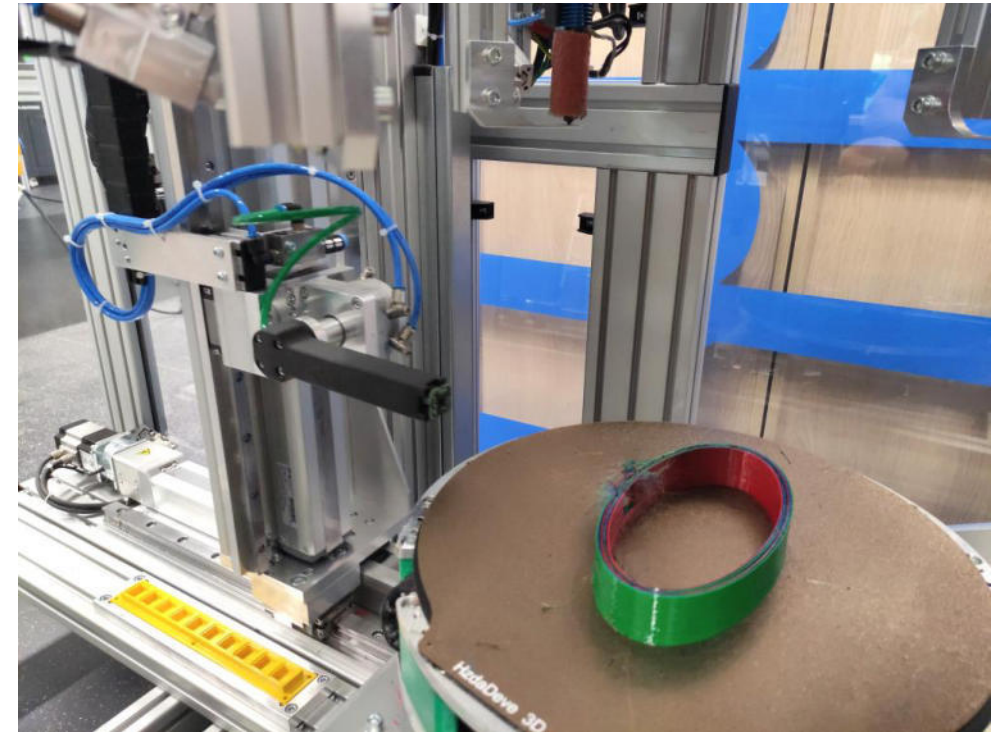
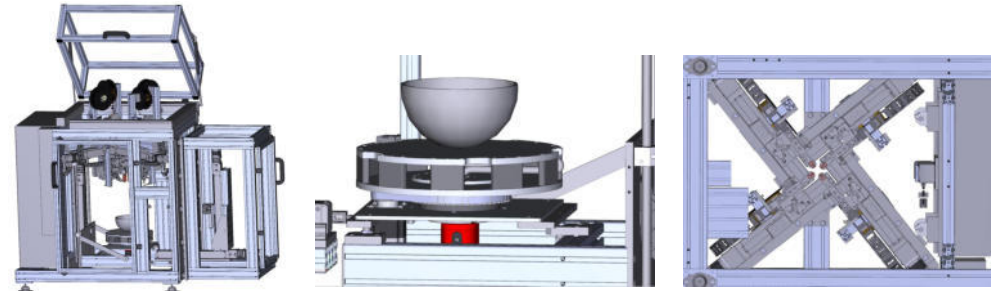
- FLM-Prinzip (50 mm langes Hot End)
- Rotationsbauplattform
- Vier Extruder 90° versetzt zueinander angebracht
- Automatisierte Zuführung von Sensorik mithilfe eines Greifarms



2. 3D-HRD im Detail

Aufbau und Funktionen des 3D-HRD

- FLM-Prinzip (50 mm langes Hot End)
- Rotationsbauplattform
- Vier Extruder 90° versetzt zueinander angebracht
- Automatisierte Zuführung von Sensorik mithilfe eines Greifarms



Agenda

1. Einführung
2. 3D-HRD im Detail
3. Programmierung Slice-O
4. Ergebnisse
5. Ausblick

3. Programmierung Slice-O

Entwicklung des Slicers für 3D-HRD

- ein Freiheitsgrad je Extruder, vier Extruder gleichzeitig, Syntax, Sensorik
- Programmierung in C++
- Herangehensweise
 1. CAD-Geometrien für Orthese und Sensoren erstellen
 2. STLs einlesen
 3. Schnittebenen bilden und Konturpunkte generieren
 4. Füllung erzeugen
 5. Stützstruktur erzeugen
 6. G-Code für 3D-Druck und Greifer generieren

3. Programmierung Slice-O

- CAD-Geometrien für Orthese und Sensoren erstellen



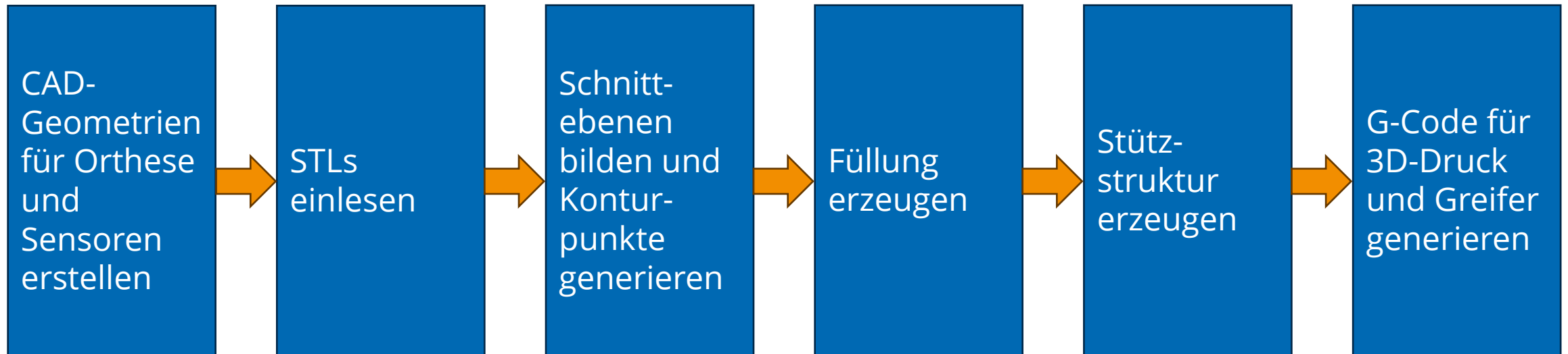
3. Programmierung Slice-0

- CAD-Geometrien für Orthese und Sensoren erstellen



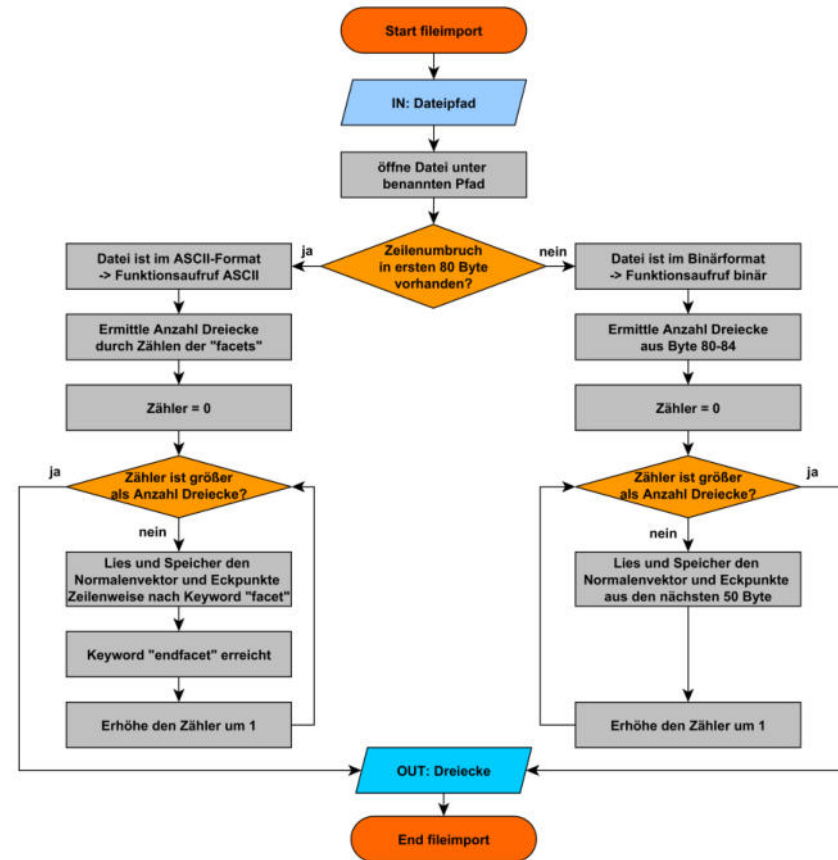
3. Programmierung Slice-0

Entwicklung des Slicers für 3D-HRD



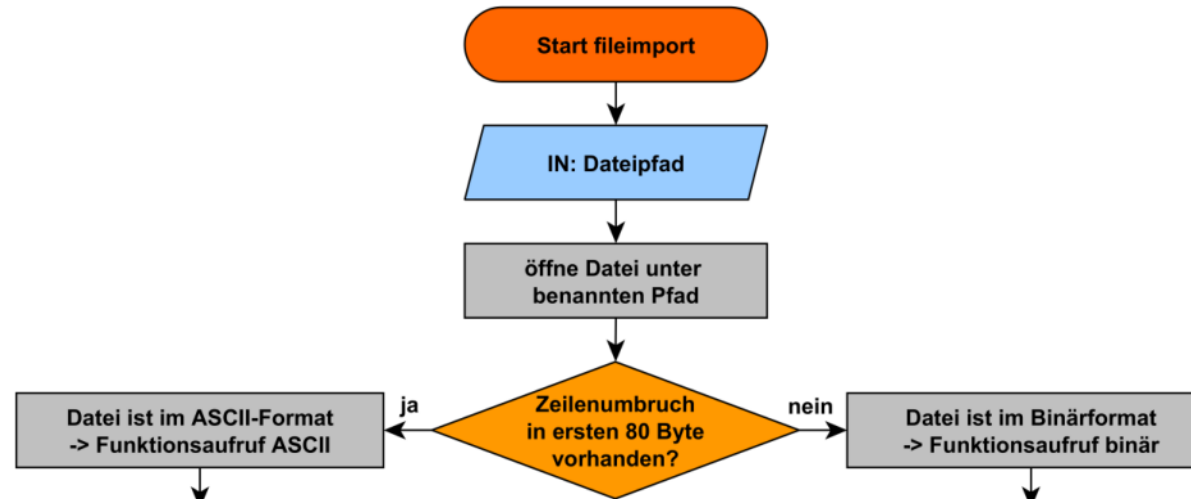
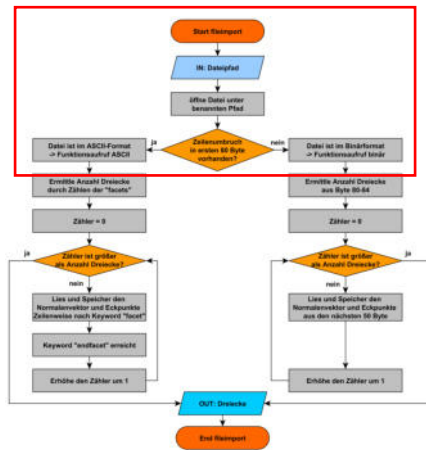
3. Programmierung Slice-0

➤ STLs einlesen



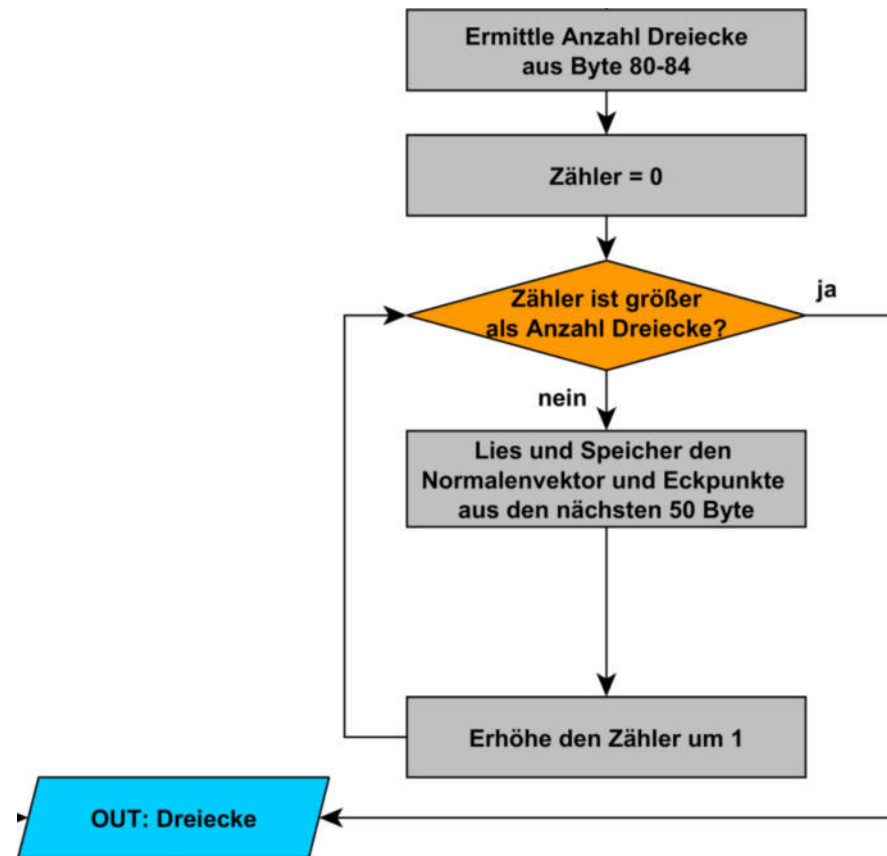
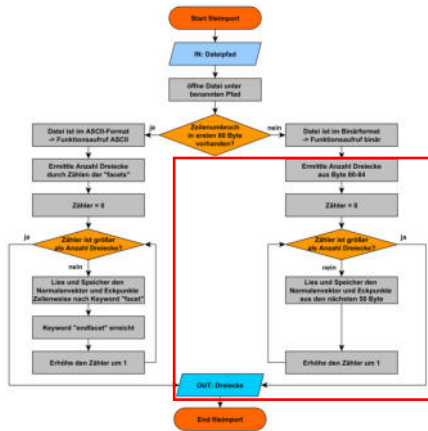
3. Programmierung Slice-0

➤ STLs einlesen



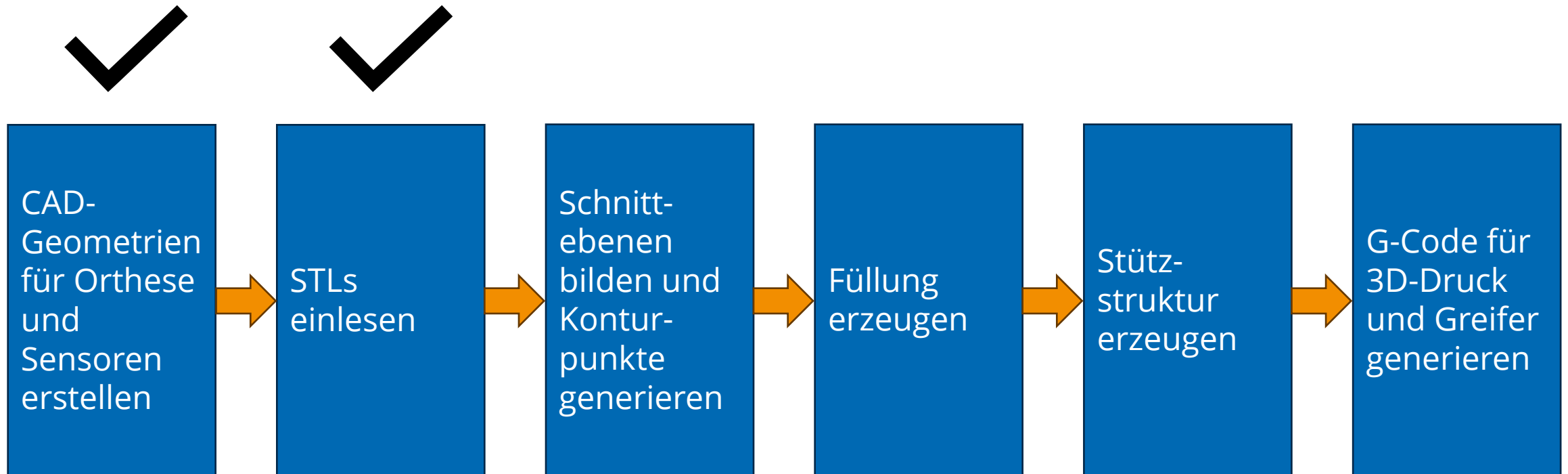
3. Programmierung Slice-0

➤ STLs einlesen



3. Programmierung Slice-0

Entwicklung des Slicers für 3D-HRD



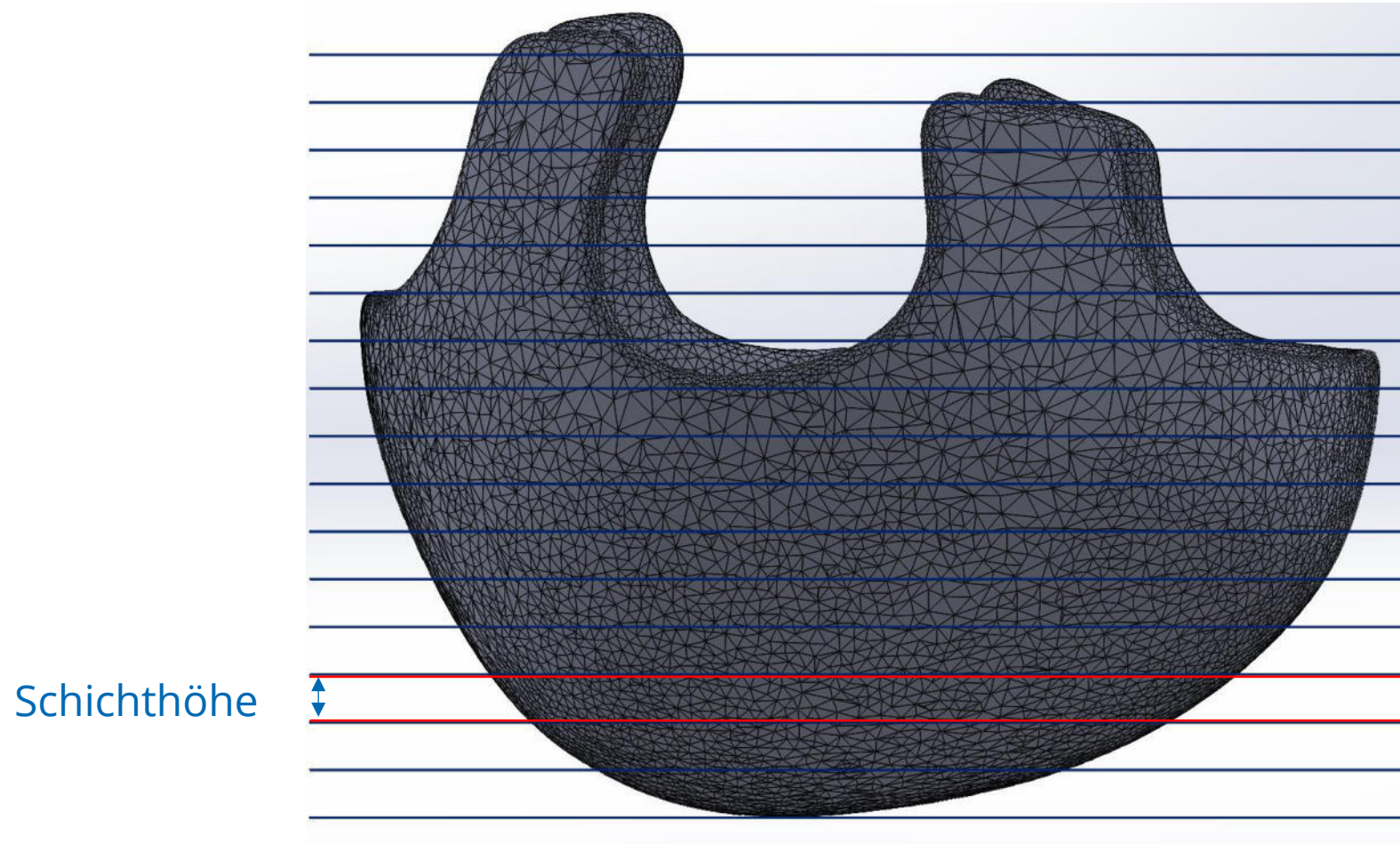
3. Programmierung Slice-0

- Schnittebenen bilden und Konturpunkte generieren



3. Programmierung Slice-0

- Schnittebenen bilden und Konturpunkte generieren



3. Programmierung Slice-0

- Schnittebenen bilden und Konturpunkte generieren



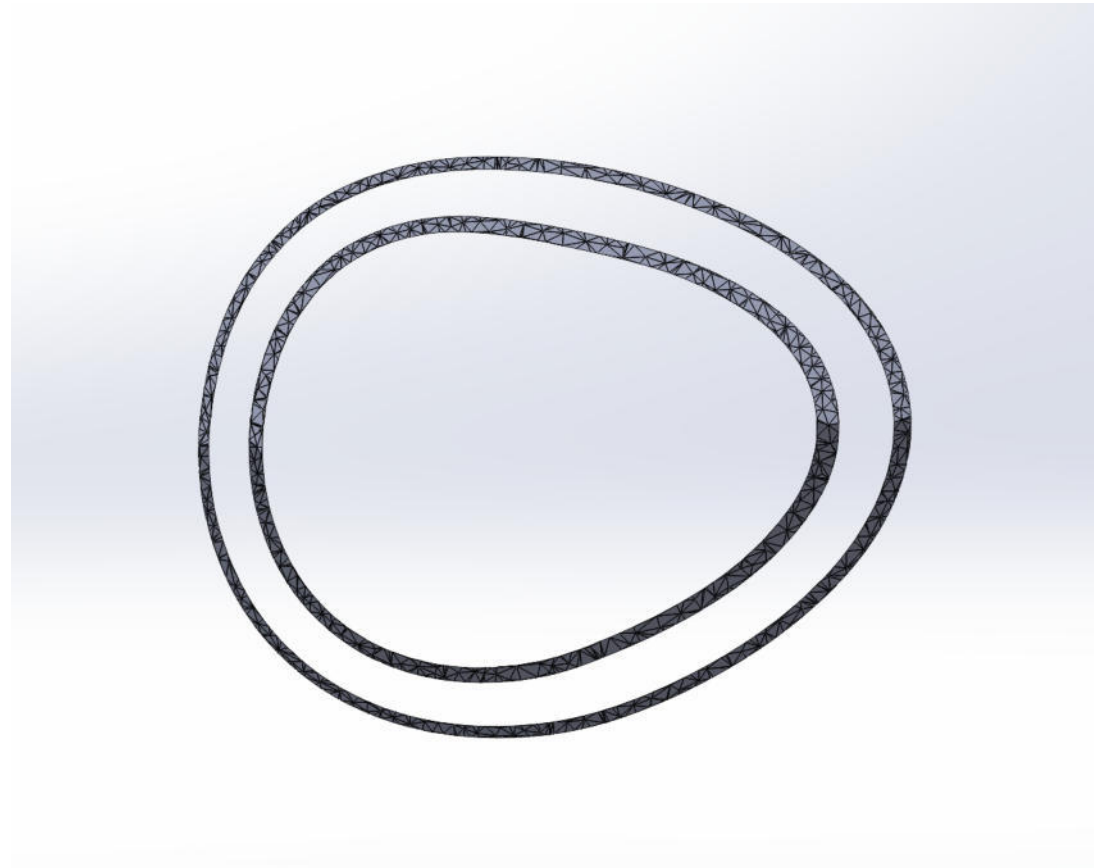
3. Programmierung Slice-0

- Schnittebenen bilden und Konturpunkte generieren



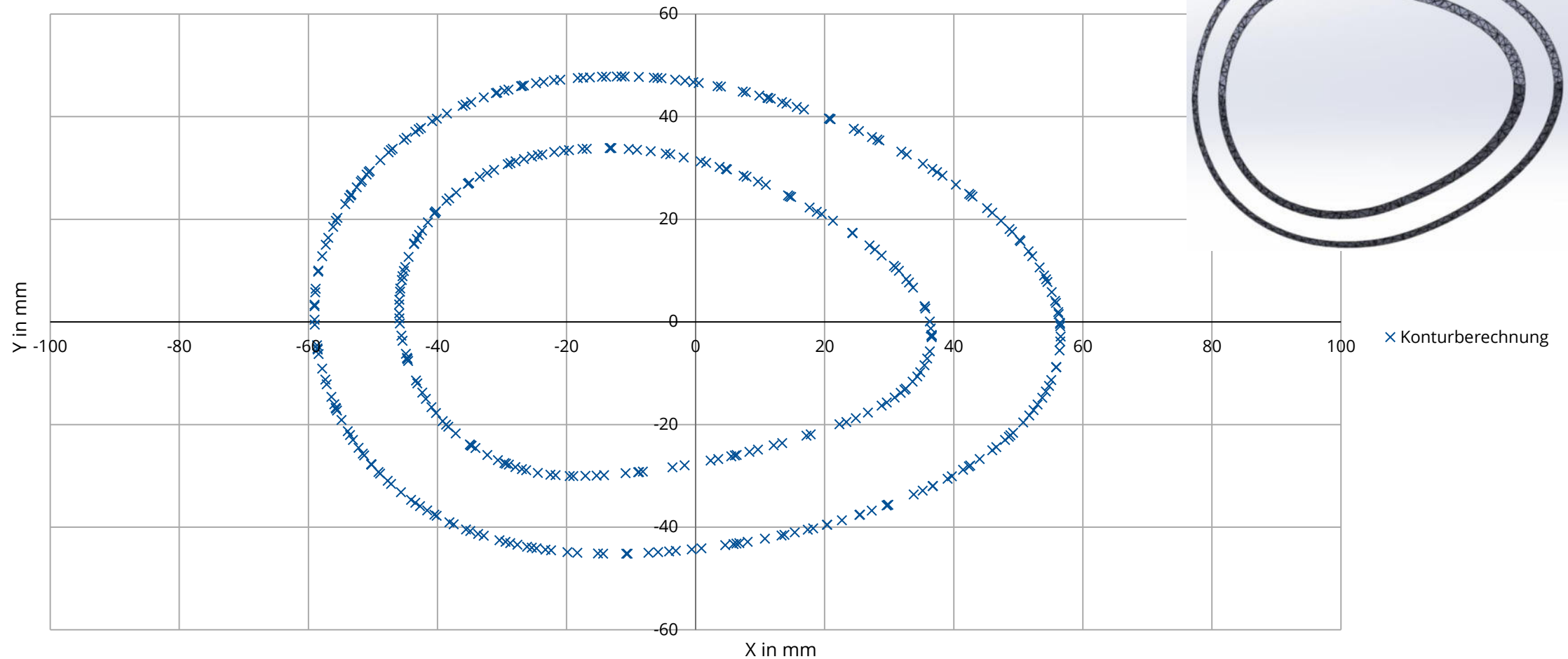
3. Programmierung Slice-0

- Schnittebenen bilden und Konturpunkte generieren



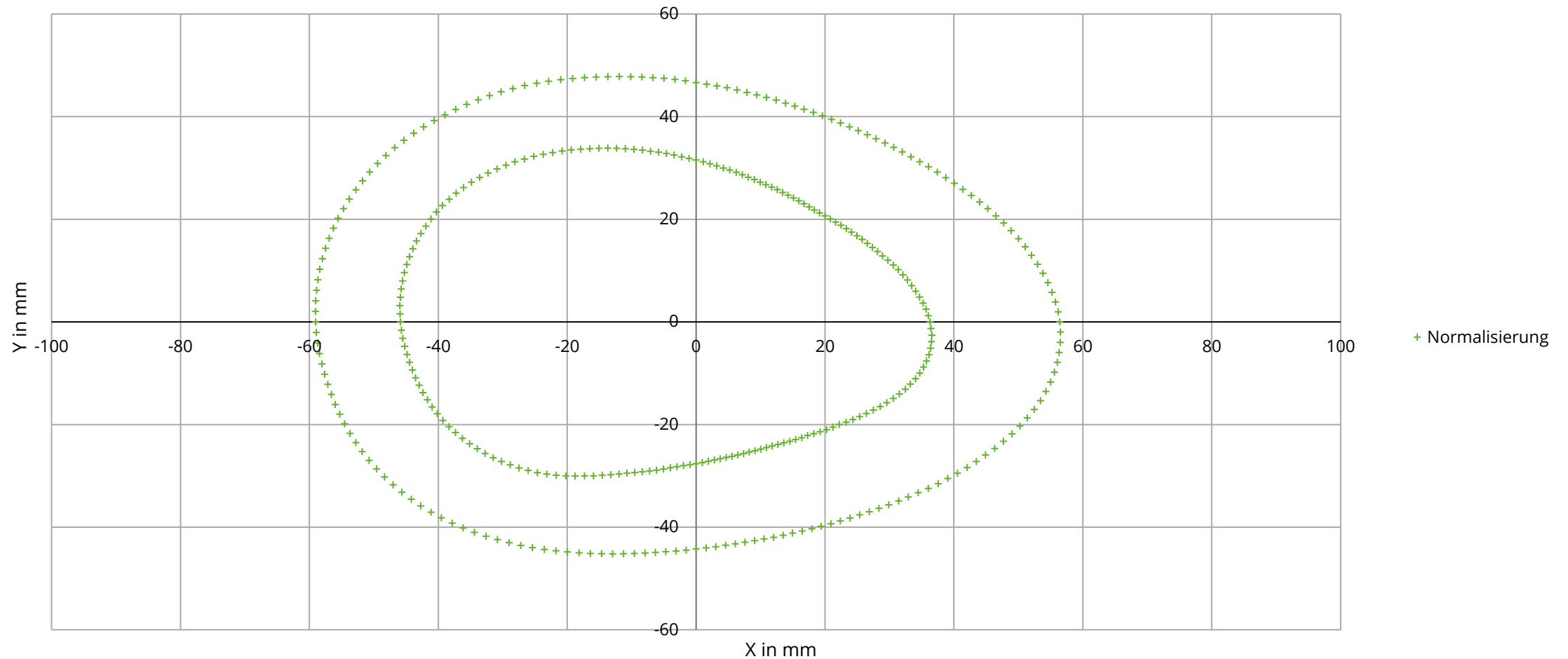
3. Programmierung Slice-0

Generierung Konturpunkte - Kartesisch



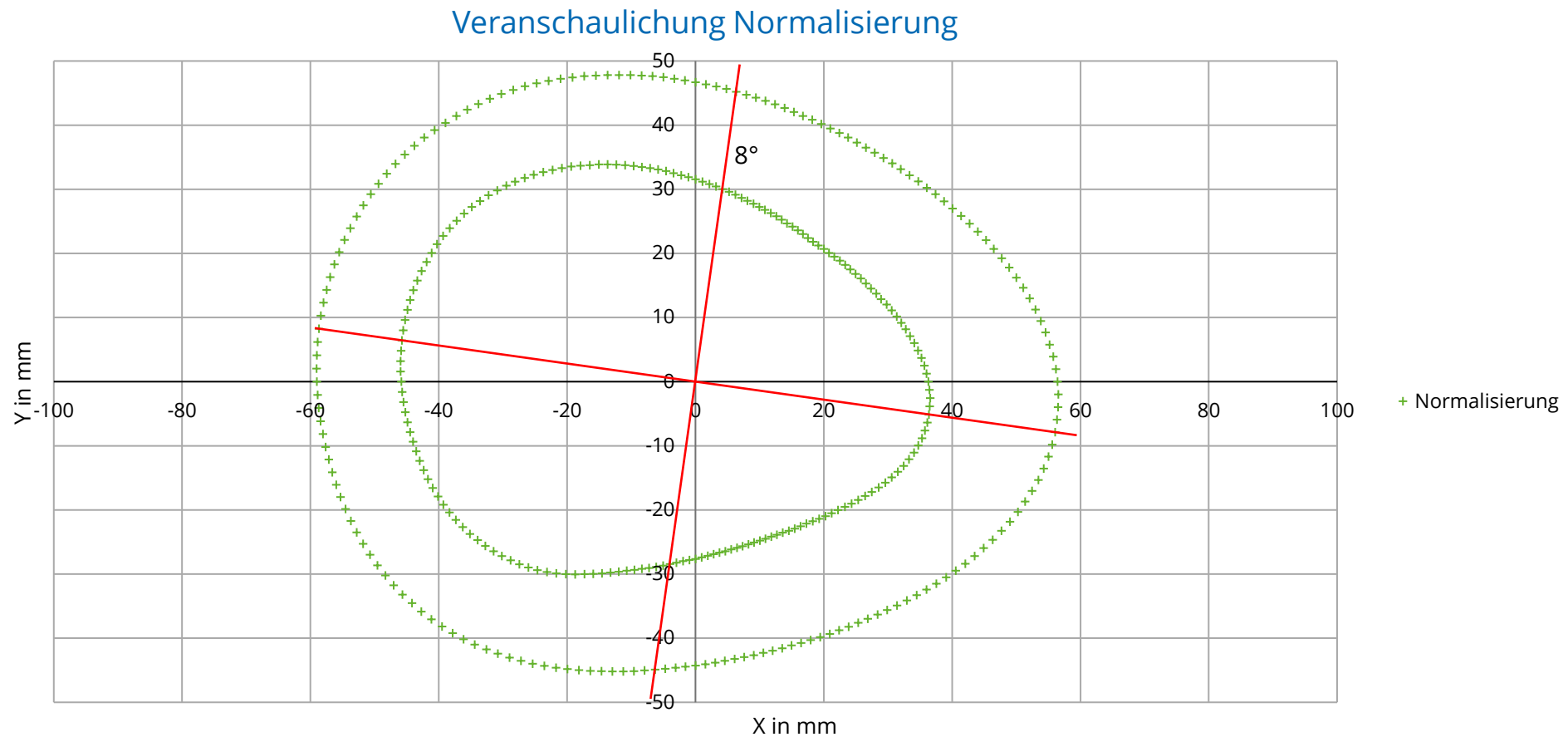
3. Programmierung Slice-0

Generierung Konturpunkte - Kartesisch



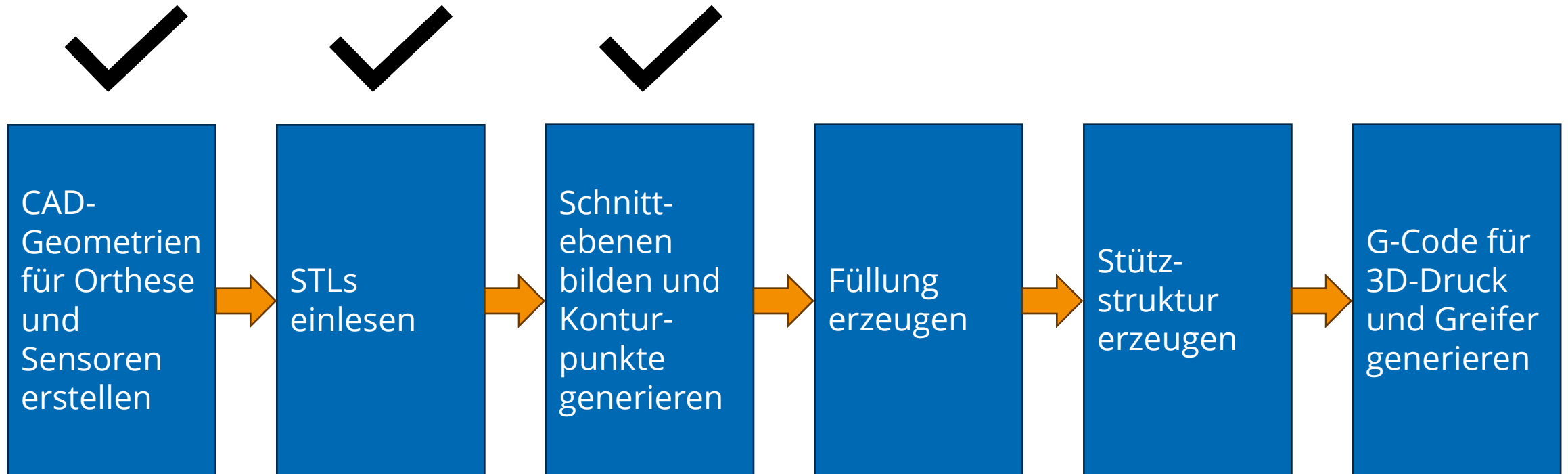
3. Programmierung Slice-0

Wozu Normalisieren? → Nur so 4 Extruder gleichzeitig möglich



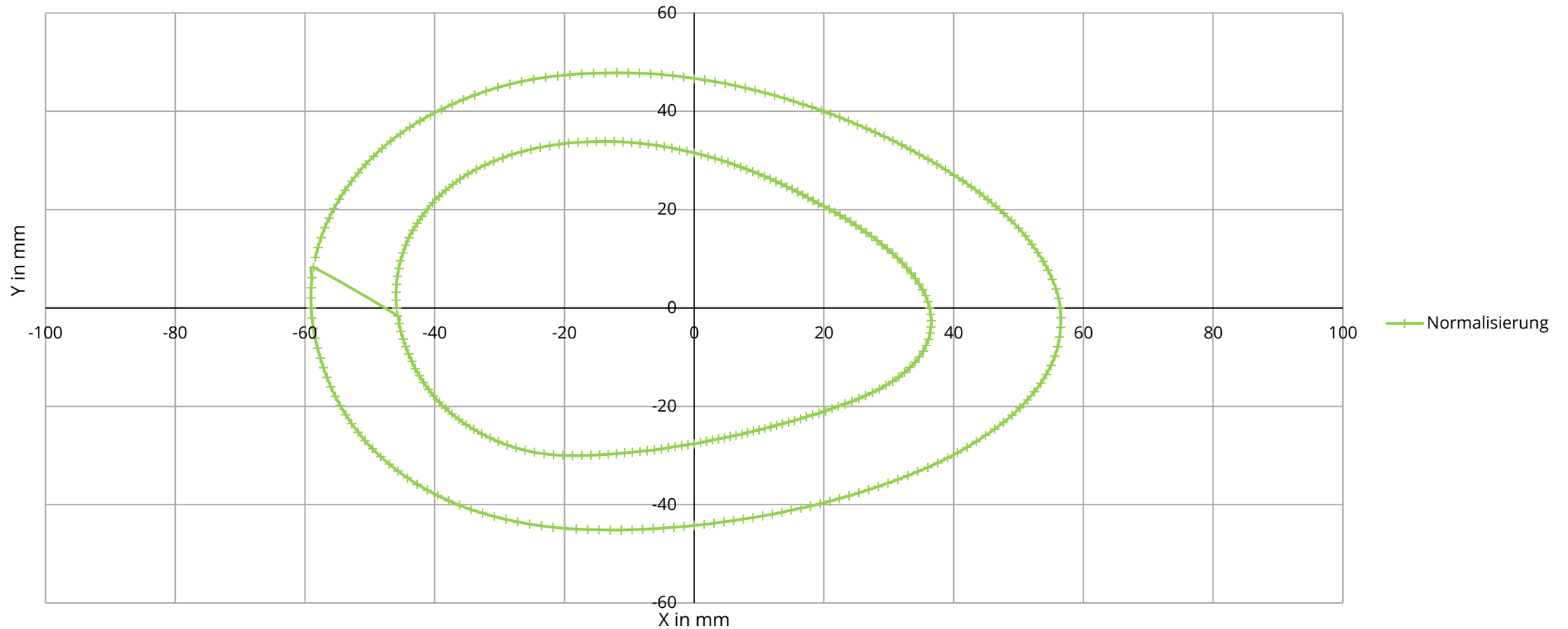
3. Programmierung Slice-0

Entwicklung des Slicers für 3D-HRD



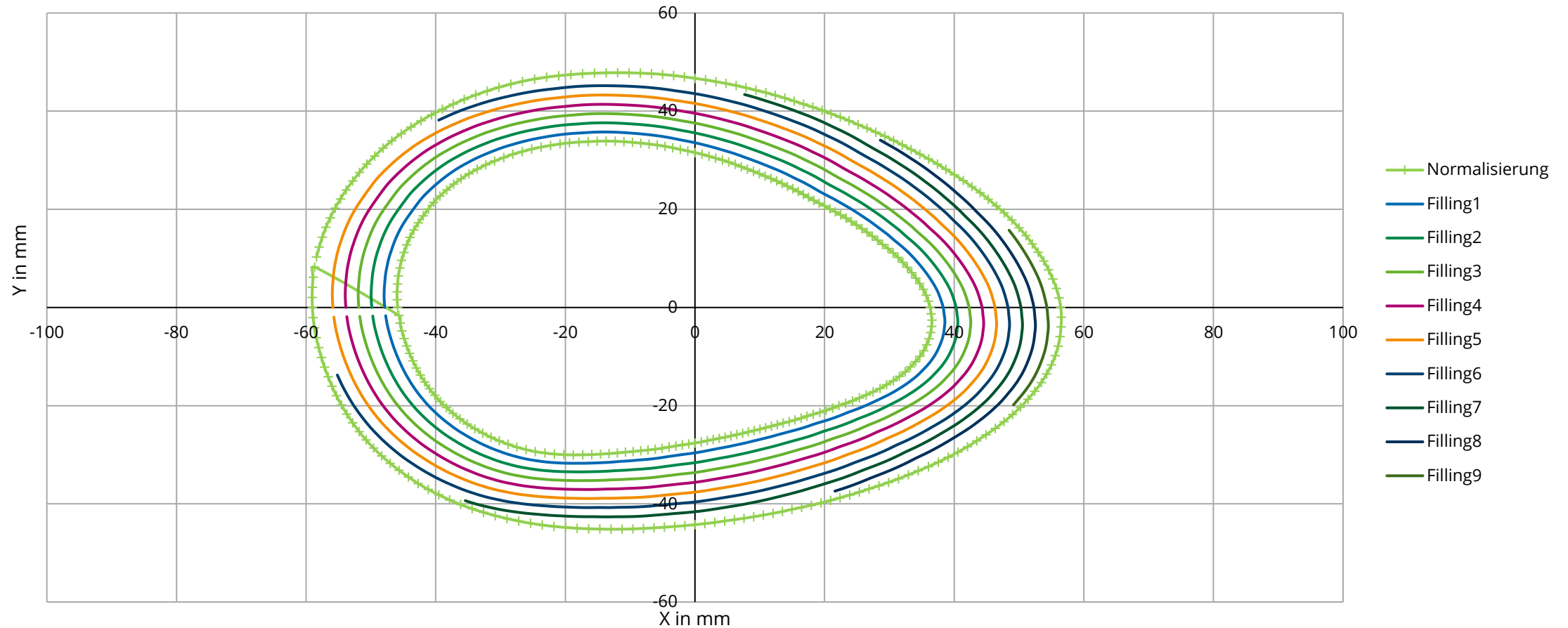
3. Programmierung Slice-0

Erzeugung einer Füllung



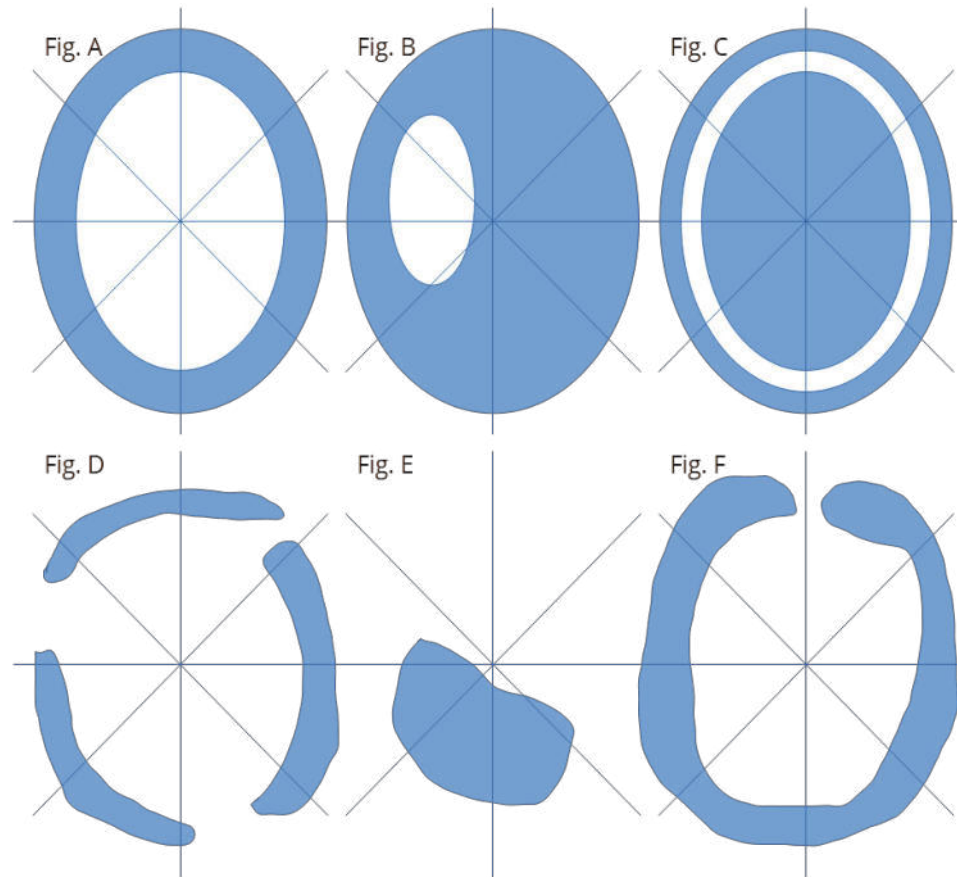
3. Programmierung Slice-0

Erzeugung einer Füllung



3. Programmierung Slice-O

Unterschiedliche Konturverläufe möglich



3. Programmierung Slice-0

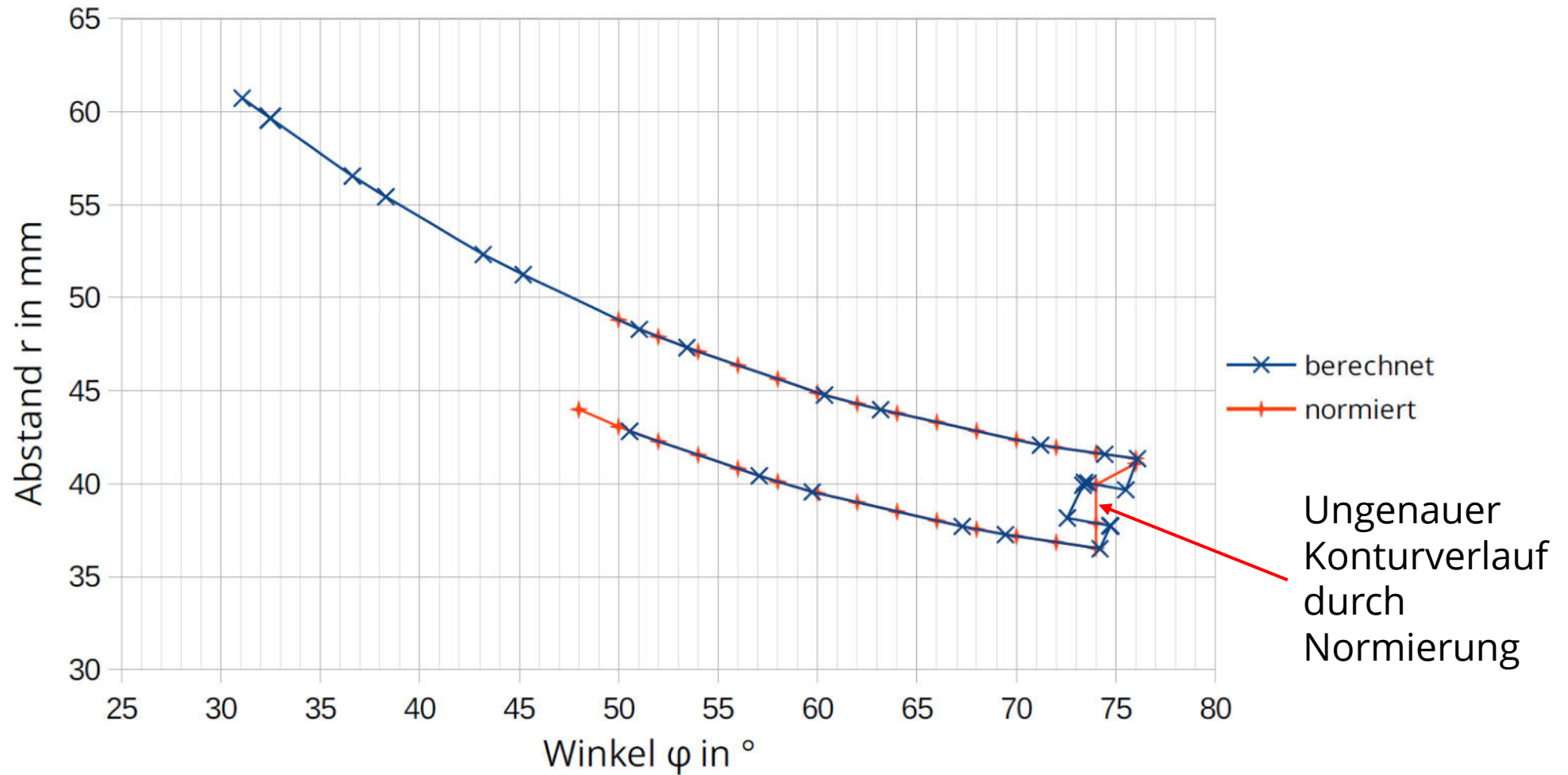
Herausforderungen bei der Umsetzung der Füllung

- Konturverläufe erkennen und charakterisieren
- Einzel stehende Punkte / Sonderfälle herausfiltern
- Konturen sinnvoll füllen (Grenzen)

Herausforderung

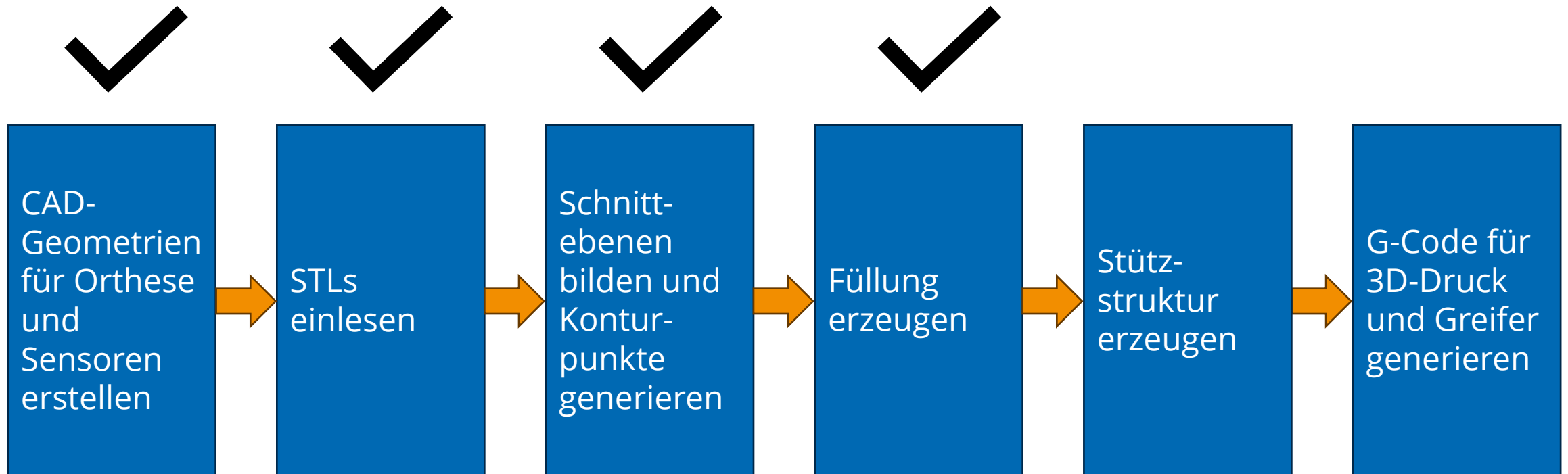
- Normalisierung mit Auflösung sorgt im Detail für ungenaue Konturverläufe (nicht änderbar)

3. Programmierung Slice-0



3. Programmierung Slice-0

Entwicklung des Slicers für 3D-HRD



3. Programmierung Slice-0

Stützstruktur erzeugen

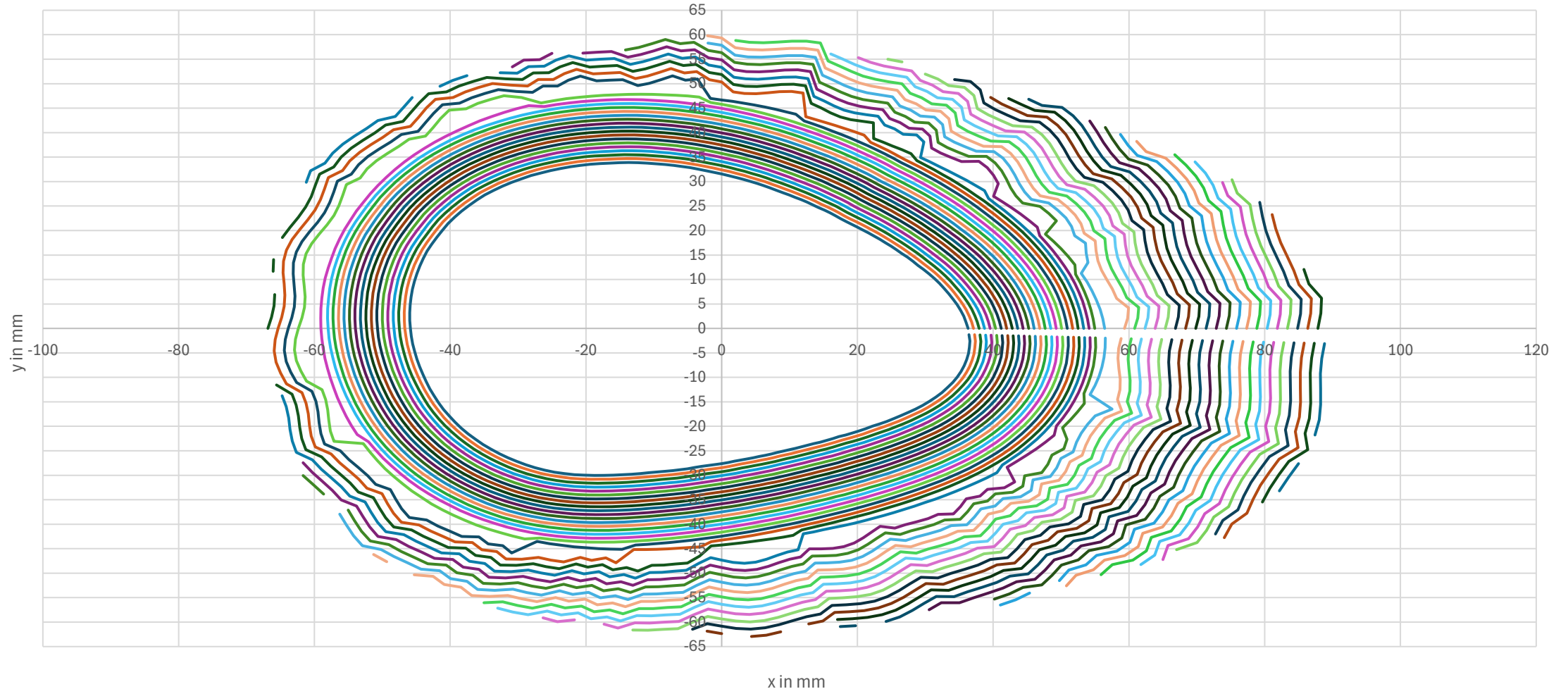
- Stützstruktur nur außen notwendig – Modelle von Helmen haben keine inneren Überhänge
- Maximaler Überhangwinkel ist Nutzereingabe

Algorithmus

1. Prüfung übereinanderliegender Punkte auf Überhang
2. Hinzufügen zu Datenstruktur
3. Maxima in Datenstruktur zu Winkel finden
4. Bei den darunterliegenden Ebenen Stützpunkte bilden

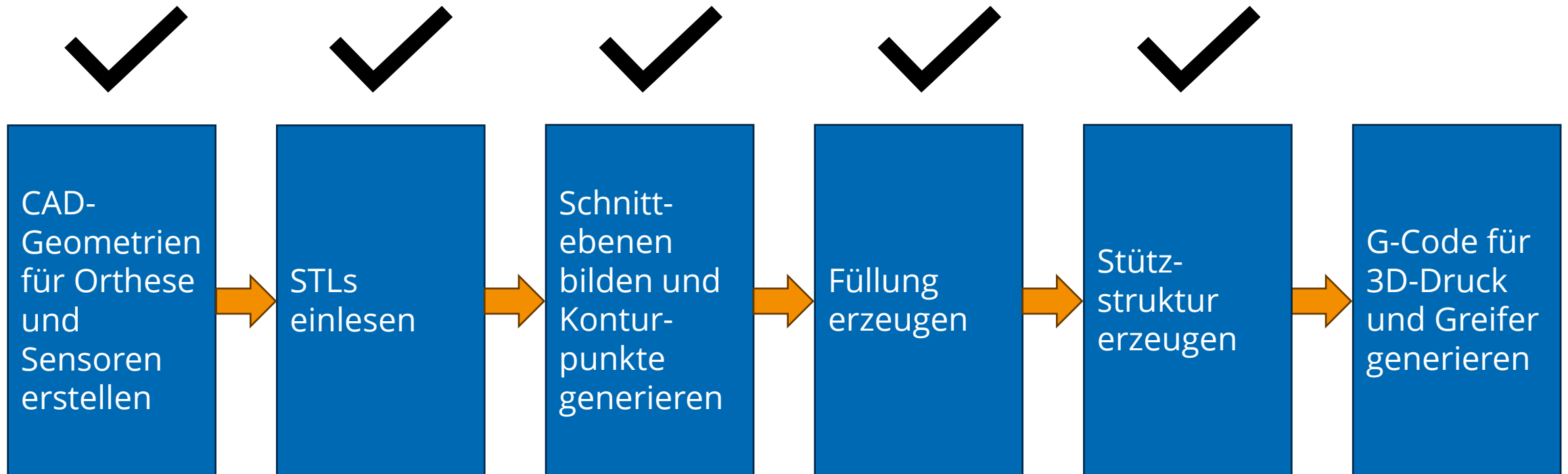
3. Programmierung Slice-0

vollständig gefüllte und gestützte Kontur bei $z = 14 \text{ mm}$



3. Programmierung Slice-0

Entwicklung des Slicers für 3D-HRD



3. Programmierung Slice-O

G-Code für 3D-Druck und Greifer generieren

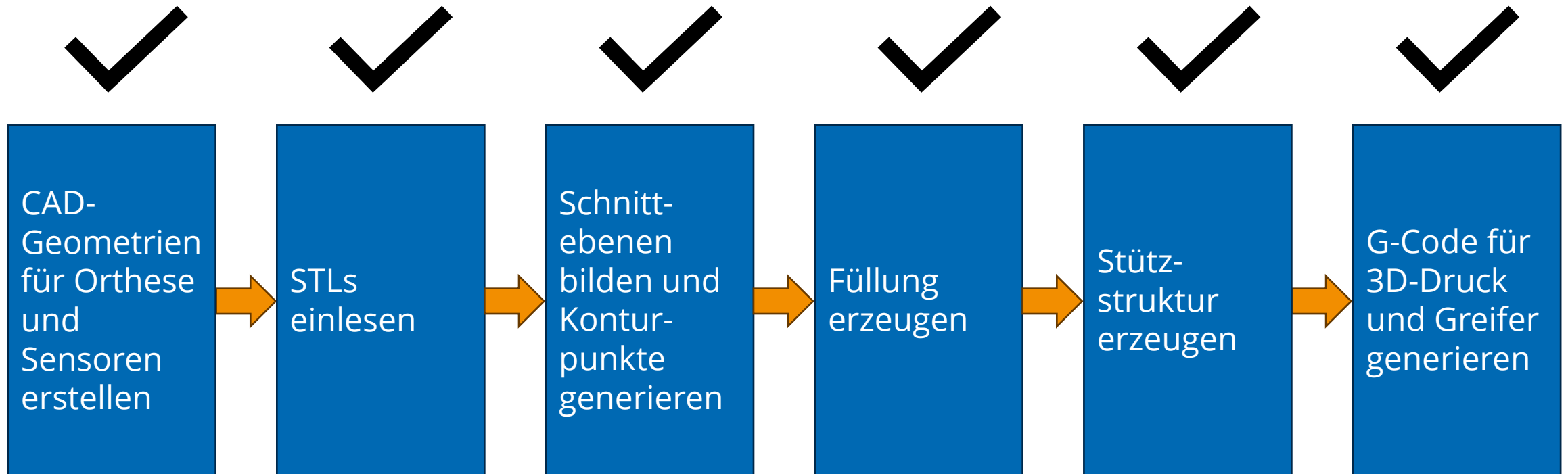
- Sinnvolle Zuordnung der Punkte zu Extrudern
- Schreiben der Daten in eine externe Datei im Dateisystem
- Sensormittelpunkte werden mit z-Koordinate abgeglichen
- wenn entsprechende Höhe erreicht, schreibe Platzierungsalgorithmus

Beispiel für angepassten G-Code

```
Z0.7  
R0 XA1.2 XB36 XC37.2 XD38.4 EA0.0692237 EB1.1768 EC1.21603 ED1.25526  
R5 XA1.2 XB36 XC37.2 XD38.4 EA0.0692237 EB1.1768 EC1.21603 ED1.25526  
R10 XA1.2 XB36 XC37.2 XD38.4 EA0.0692237 EB1.1768 EC1.21603 ED1.25526
```


3. Programmierung Slice-0

Entwicklung des Slicers für 3D-HRD



Agenda

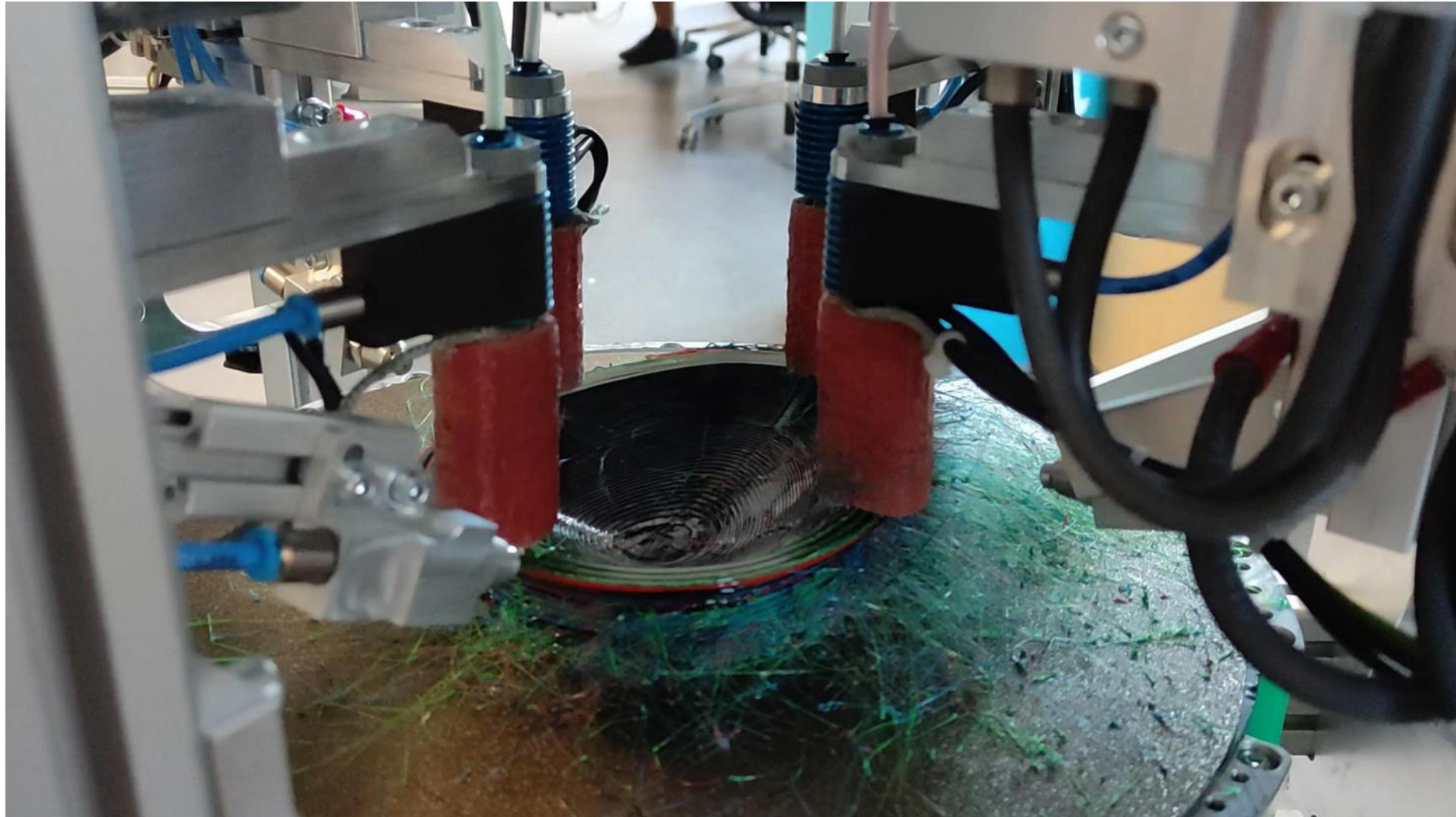
1. Einführung
2. 3D-HRD im Detail
3. Programmierung Slice-O
4. Ergebnisse
5. Ausblick

4. Ergebnisse

Allgemein

- Slicer-Programm ist bedienerfreundlich (UI, Windows Dialoge)
- Algorithmus erzeugt benutzerdefinierten G-Code
- Drucker kann G-Code verarbeiten
- Druckbahnen sind sinnvoll angeordnet und den Extrudern zugewiesen
- Druckqualität der Schichten zufriedenstellend
- Abfolge zur Platzierung eines Sensors funktioniert
- Slicing Prozess des Helms (35.890 Dreiecke) dauert mit Speichern 22 s

4. Ergebnisse



Agenda

1. Einführung
2. 3D-HRD im Detail
3. Programmierung Slice-O
4. Ergebnisse
5. Ausblick

5. Ausblick

Limitierung

Tropfende Düse (Oozing)

- Lange Schmelzzone bedeutet viel aufgeschmolzenes Material
 - Retraction wirkungslos
 - Düse bei Untätigkeit auf Abstreifer
- Herausgelaufenes Material bleibt am Modell hängen (Stringing beim Heraus- und Hereinfahren)
 - Nacharbeit notwendig
 - Sensor einsetzen wird nahezu unmöglich



5. Ausblick

Weitere Einsatzszenarien des Druckers

- Herstellung weiterer Orthesen und anderen medizinischen Hilfsmitteln
- Herstellung von Rohren und Rohrverbindern mit komplexer Geometrie
- Integration von Sensorik in weitere medizinische oder technische additiv gefertigte Komponenten

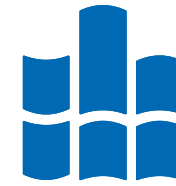
Vielen Dank

Axel Wolf
Projektmitarbeiter

Hochschule Mittweida | University of Applied Sciences
Technikumplatz 17 | 09648 Mittweida
Fakultät Ingenieurwissenschaften

T +49 (0) 3727 58-1873
wolf10@hs-mittweida.de
<https://www.inw.hs-mittweida.de/webs/ims/>

Haus 5 | Gerhard-Neumann-Bau | Raum 5-307A
Technikumplatz 17 | 09648 Mittweida



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

[hs-mittweida.de](https://www.hs-mittweida.de)

Session 7:

Medizintechnik

Digitale Orthetik

Niklas Hamann,
Bauhaus Universität Weimar



Digitale Orthetik

11. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck
in der Anwendung (16.10.2024)

Betreuende Prof. Dr. Jan Willmann, Prof. Andreas Mühlenberend

Kooperationspartner Sanitätshaus Rosenkranz Scherer GmbH

Gefördert durch Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und
Digitale Gesellschaft (Förderprogramm: Pro Digital)





- 01** _ State of the Art
- 02** _ Forschungsgegenstand und Setup
- 03** _ Design- und Entwicklungsprozess
- 04** _ Cyber-physikalische Prozesskette
- 05** _ Patiententests und Ergebnisse
- 06** _ Zusammenfassung und Ausblick



Niklas Hamann

Studium Produktdesign an der HTW-Dresden

Auslandspraktikum in Aarhus, Dänemark

Masterarbeit 3D-gedruckte Handorthese

Künstl. Mitarbeiter an der Bauhaus-Universität Weimar

Promotion zum Thema „Digitale Orthetik“

Digitale Orthetik:

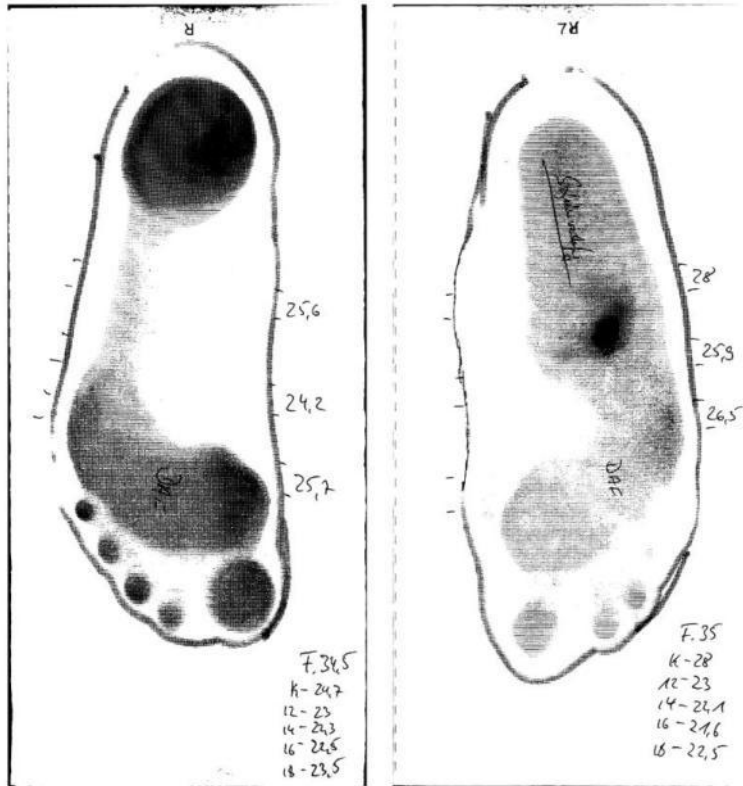
Entwurf einer cyber-physikalischen Prozesskette zur Individualisierung 3D-gedruckter Fußorthesen unter besonderer Gewichtung patient*innenzentrierter Ansätze und Anforderungen.

Fragestellung:

Wie leistungsfähig ist eine 3D-gedruckte (Charcot-Fuß)-Orthese?

Welche Potenziale und Vorteile (insbesondere für Patient*innen)
hat die digitale Anpassung, Gestaltung und Fertigung einer Orthese?

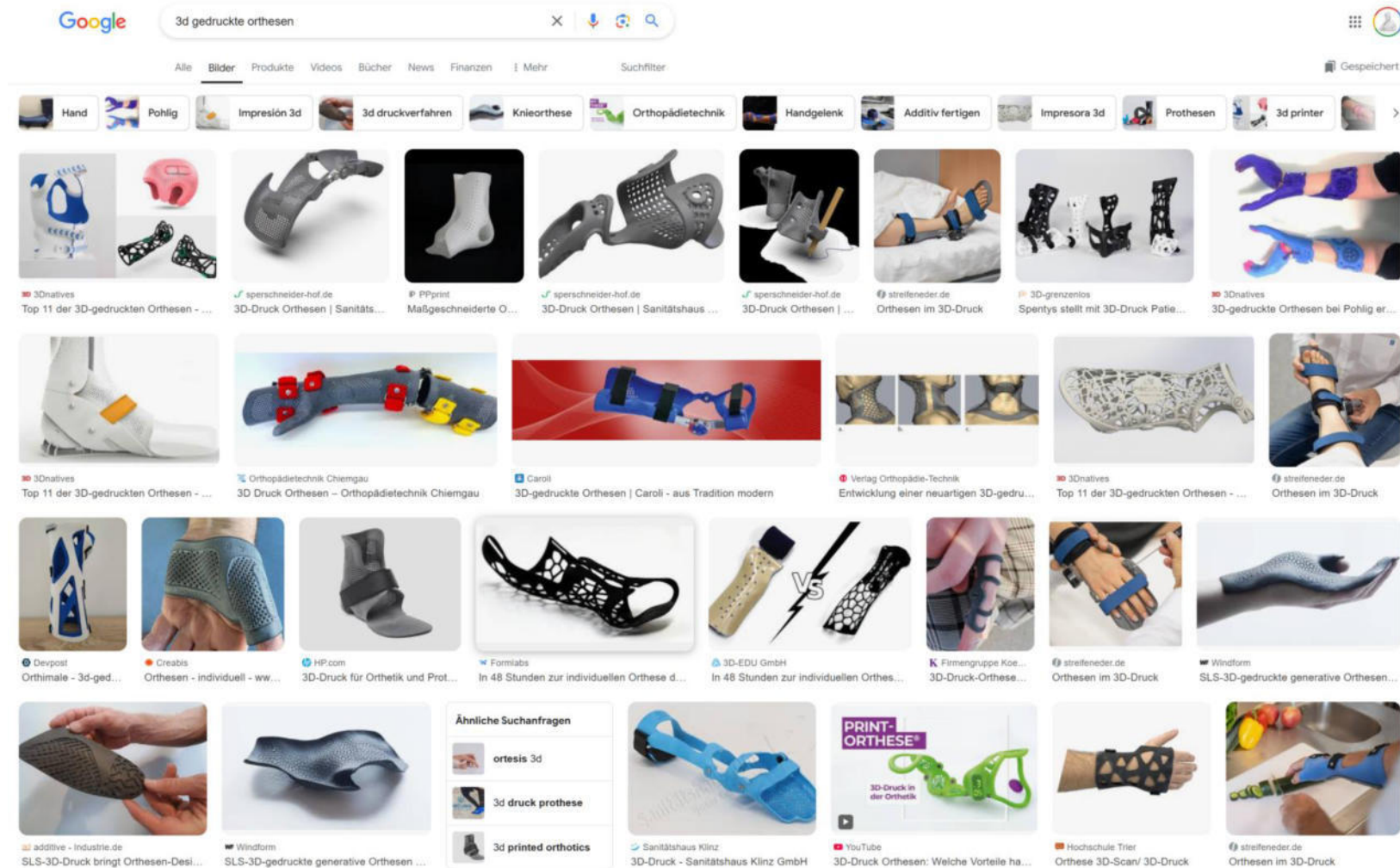
01 _ State of the Art



Charcot Fuß: Links: Trittspur des Charcot-Fuß-Patienten.
Rechts: Charcot-Fuß nach dem akuten Stadium.



Konventionelle Herstellung: Links: Gipsabformung des Unterschenkel-Fuß-Bereiches. Mitte: Schleifen eines Orthesenteils. Rechts: Konventionelle, maßgefertigte Zwei-Schalen-Orthese.



Recherche: Screenshot
Google Bilder Suche
„3D gedruckte Orthesen“
(aufgerufen am: 08.10.2024)



Zwei-Schalen-Orthese von Leder Brinkmann im FDM-3D-Druckverfahren.

Quelle: <https://shop.lebri-online.de/de/3d-construction/3d-gedruckte-orthesen/> (zuletzt aufgerufen: 08.10.2024)



Piro: 3D-gedruckte AFO / SMO.

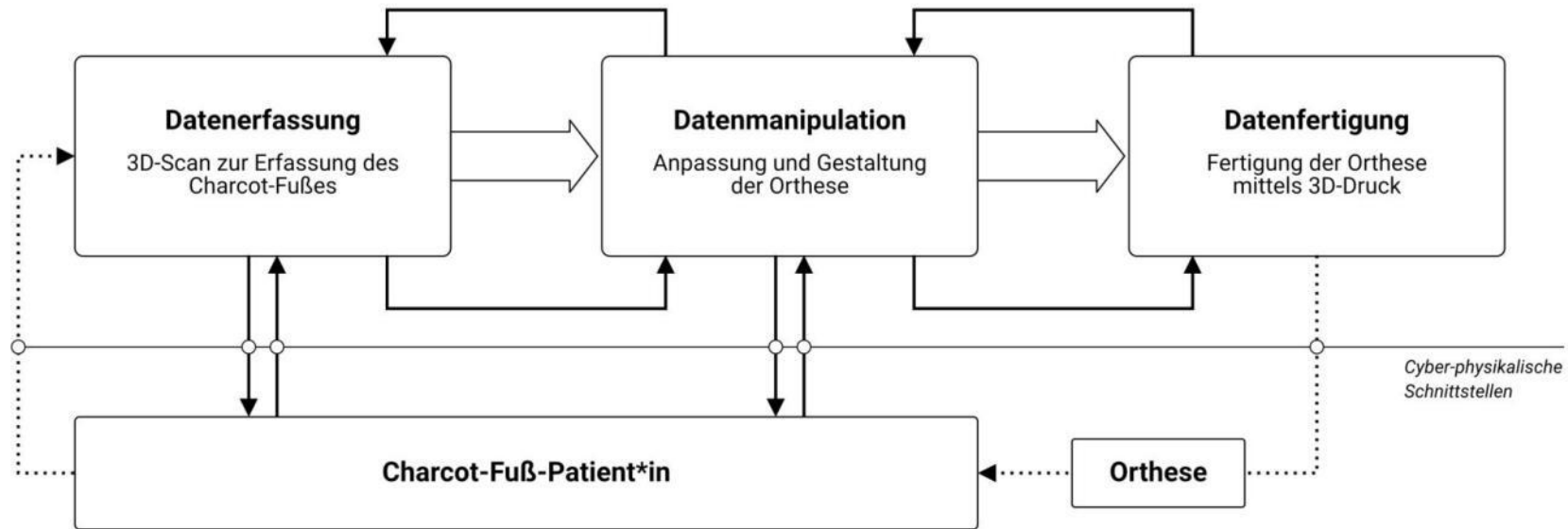
Quelle: <https://piroafo.com/dach/> (zuletzt aufgerufen: 08.10.2024)



MHOX: generative orthoses

Quelle: http://mhoxdesign.com/generative_orthoses-en.html (zuletzt aufgerufen: 08.10.2024)

02 _ Forschungsgegenstand und Setup

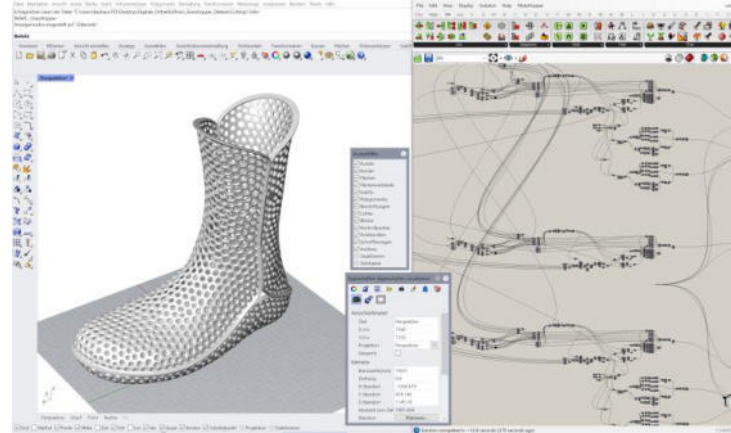


Cyber-physikalische Prozesskette: Die grundlegende Struktur der Prozesskette zur Herstellung und Individualisierung der 3D-gedruckten Orthese.



M4D-Scan von Rodin

Handgeführter Weißlichtscanner speziell für orthopädische Anwendungen.



Rhinoceros 3D / Grasshopper

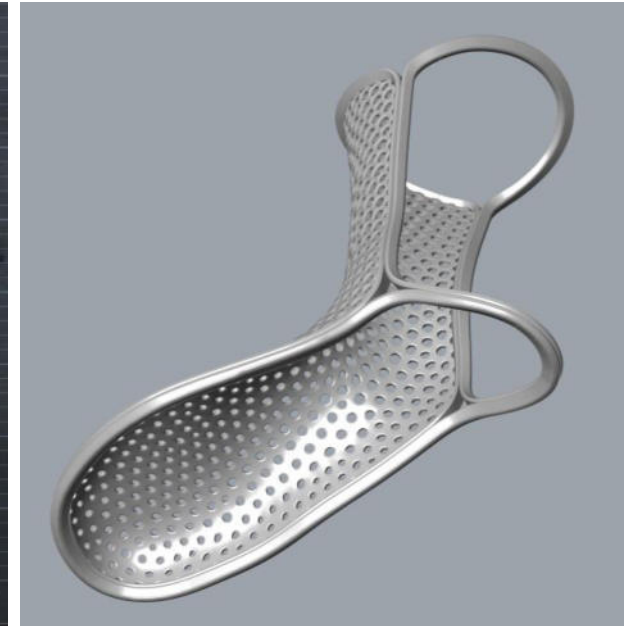
Etablierte CAD-Software im Bereich Produktdesign. Parametrische Modellierung in Grasshopper.



HP Multi-Jet-Fusion 3D Printing

Hochfeste, homogene Bauteile in *HP 3D High Reusability CB PA 12*. Flexible Bauteile in *BASF Ultrasint TPU 01*.

03 _ Design- und Entwicklungsprozess



Entwicklungsprozess: Eindrücke aus dem Design- und Entwicklungsprozess gemeinsam mit dem Praxispartner Sanitätshaus Rosenkranz Scherer GmbH.



Inkrementelle Prototypenentwicklung: Links: früher Prototyp in einem zweischaligen Design. Mitte: erster Prototyp mit 3D-gedruckten Scharnieren. Rechts: Prototyp mit provisorischen Verschlüssen.



Dreiteilung: Ermöglicht es, die Orthese deutlich effizienter im Bauraum des 3D-Druckers zu platzieren. Erleichtert gleichzeitig das An- und Ausziehen. Scharniere erzeugen die notwendige Stabilisierung.

Kriterium	Erklärung	Anforderungen	Gewichtung
1. Individualisierung	Anpassung der Orthese an den Fuß, um eine optimale Heilung zu gewährleisten.	Exakte Erfassung des Fußes lokale Korrekturen	++++
2. Polsterung	Polsterung ist essentiell, um eine Druckentlastung zu erzeugen.	individuelle Polsterung Hautverträglichkeit lokale Anpassung	+++
3. Verschlüsse	Die Orthese muss leicht aber sicher verschließbar sein.	intuitive Bedienung stabil und zuverlässig	+++
4. Laufsohle	Die Laufsohle unterstützt die Bewegung und den sicheren Stand in der Orthese.	an Gangbild angepasst Dämpfung und Federung guter Grip auch bei Nässe	++
5. Durchlüftung	Durchlüftung beugt der Schweiß- und Geruchsbildung vor.	gezielte Öffnungen Fenster-Ödeme vermeiden	++
6. Gewicht	Ein geringeres Gewicht steigert den Tragekomfort.	Leichtbaustrukturen Materialreduktion Topologieoptimierung	+

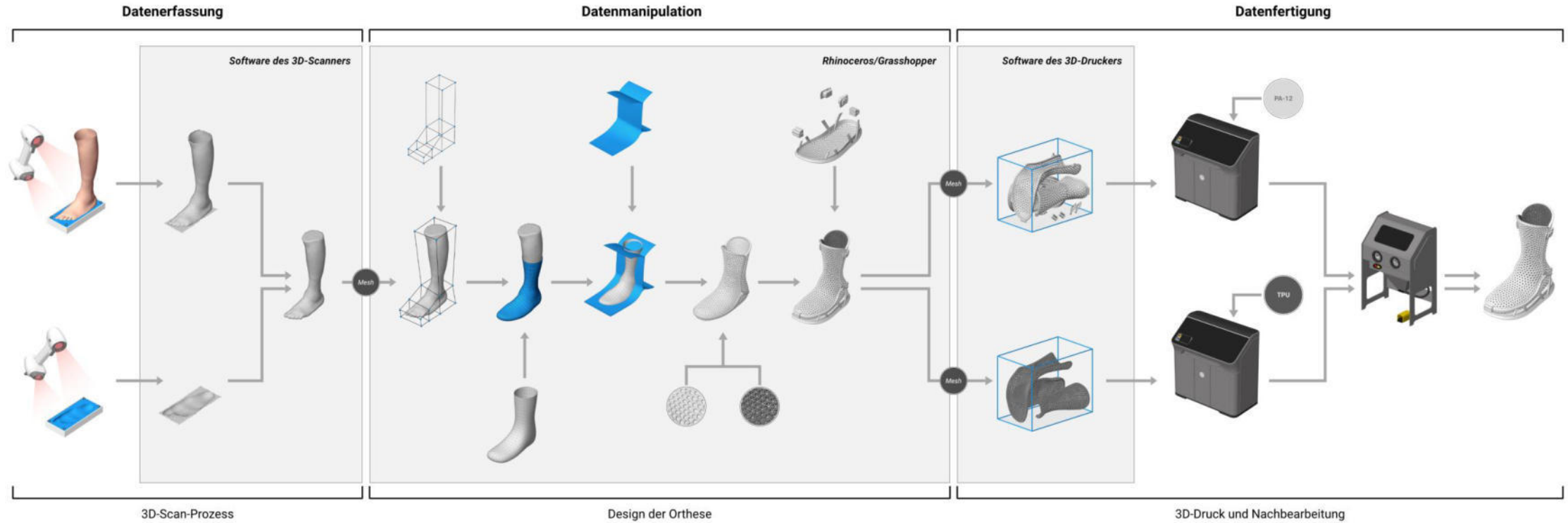
Patient*innenzentrierte Anforderungen:

Aus dem Entwicklungsprozess heraus wurde ein Kriterienkatalog erstellt, der die wichtigsten patient*innenzentrierten Anforderungen an eine individuelle Charcot-Fuß-Orthese zusammenfasst.



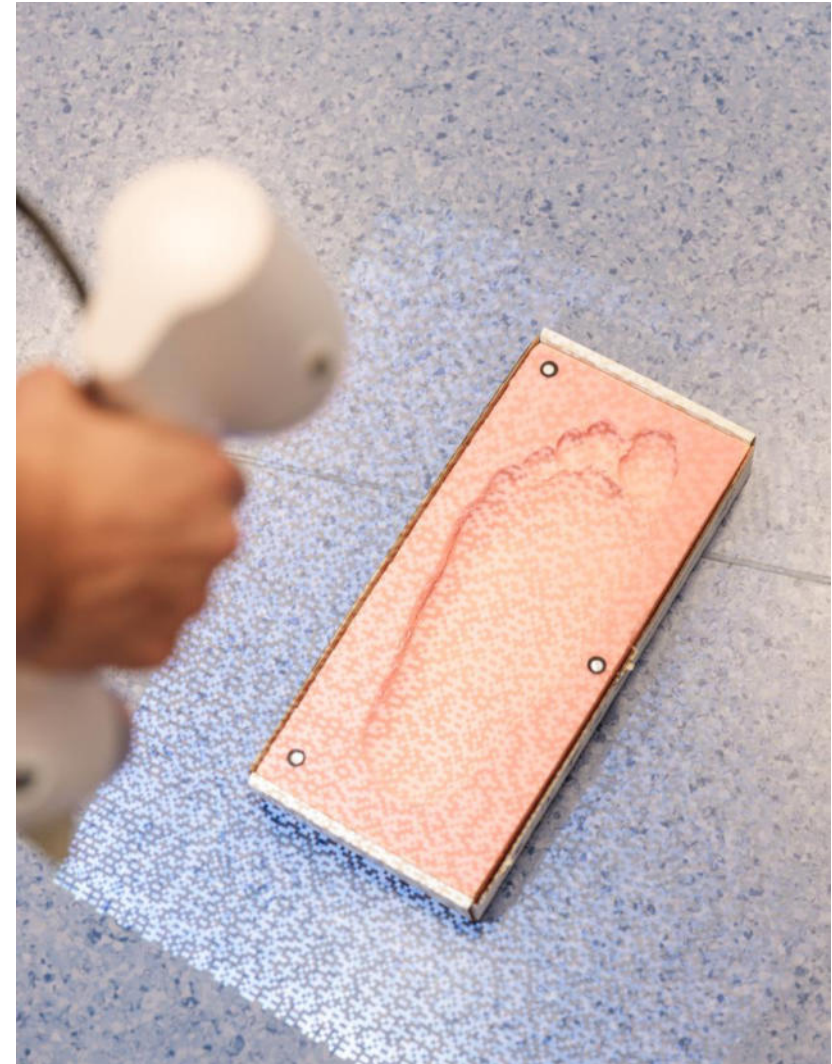
Finale Orthese: Links: Finaler, 3D-gedruckter Prototyp der Orthese. Oben rechts: Die Orthese in ihre Einzelteile zerlegt. Unten rechts: Einsetzen der Polsterung in die Außenschale.

04 _ Cyber-physikalische Prozesskette

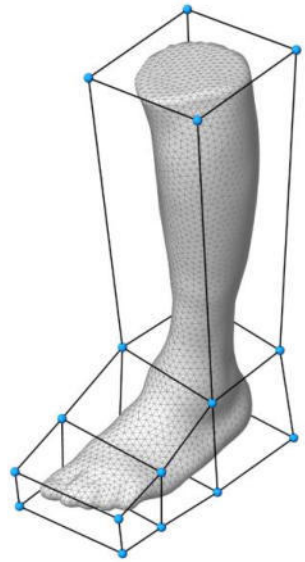


Cyber-physikalische Prozesskette: Schematische Darstellung des gesamten, prozessualen Ablaufs von der Erfassung über die Verarbeitung der Daten hin zur Fertigung der Orthese.

3D-Scan: Links: Scannen der Oberseite des Fußes im Trittschaum. Rechts: Scannen des Fußabdrucks im Trittschaum.



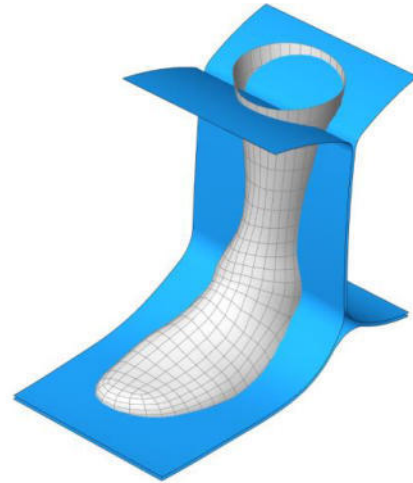




(1)



(2)



(3)

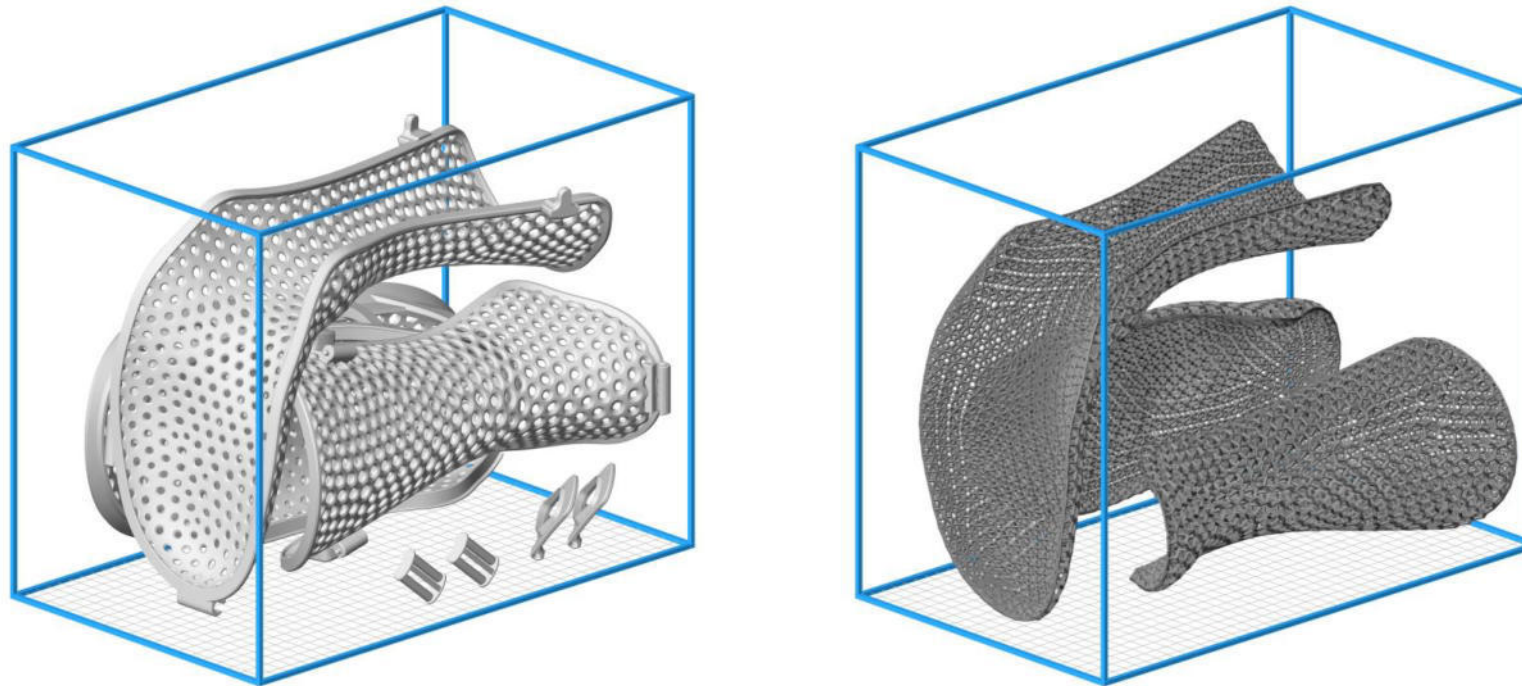


(4)



(5)

Modellierung: Digitale Gestaltung der individuellen Orthese. Viele Teilschritte sind automatisiert:
(1) Ausrichten des 3D-Scans, (2) Anpassen des SubD-Leisten, (3) Erstellen der Schnittkanten,
(4) Generieren der Schalen, (5) Hinzufügen der funktionalen Komponenten.



3D-Druck: Platzieren der Einzelteile der Orthese im Bauraum des Multi-Jet-Fusion 3D-Druckers.
Links: Außenschalen, Laufsohle, Verschlüsse und Scharniere werden in *HP 3D High Reusability CB PA 12* gedruckt. Rechts: Polster-elemente werden in flexiblem *BASF Ultrasint TPU 01* gedruckt.



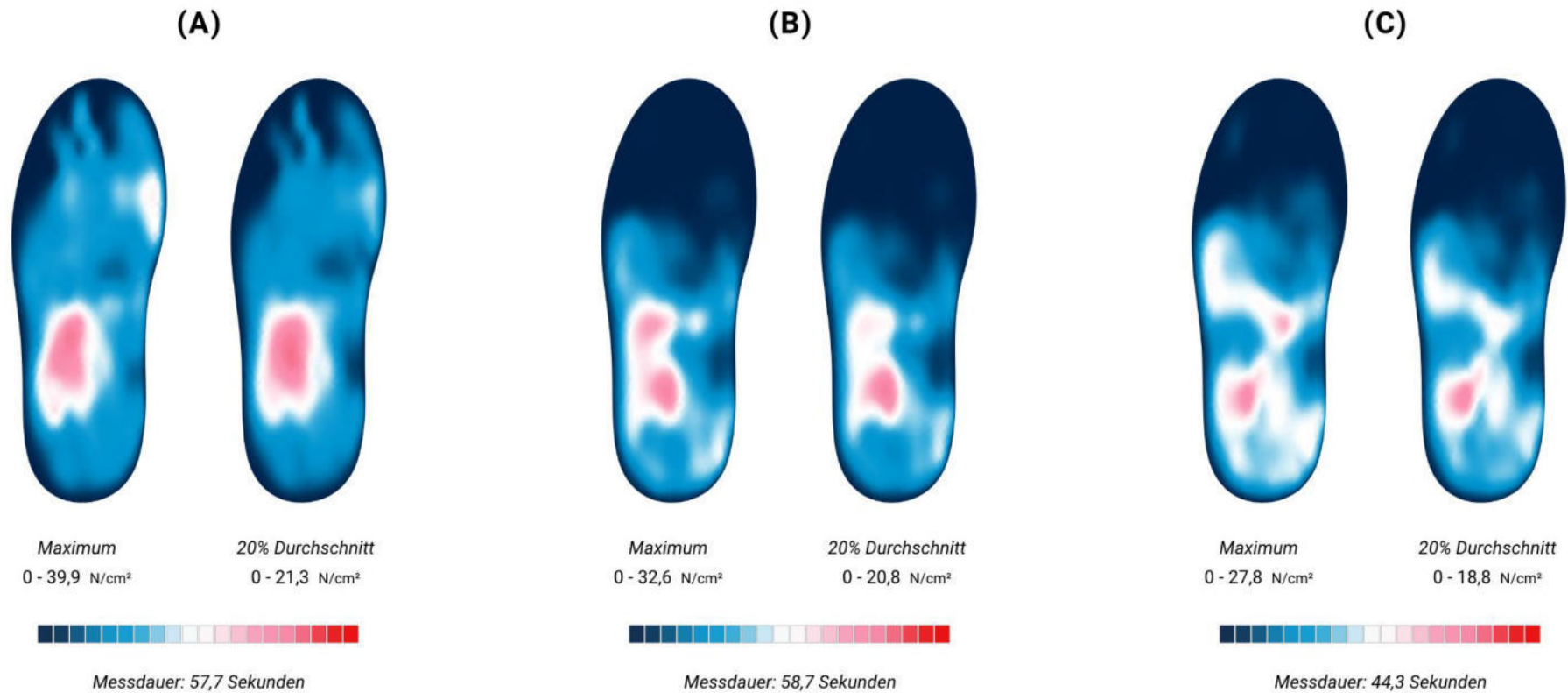
05 _ Patiententests und Ergebnisse



Patiententest: Anprobe der Orthese unter fachlicher Aufsicht und Gehversuche mit Messsohle.







Messdaten: Messung (A): Im eigenen, orthopädischen Schuh des Patienten. Messung (B): 3D-gedruckte Orthese ohne Veränderungen. Messung (C): Orthese nach spontanem Abschleifen der Polsterung.

06 _ Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

3D-Druck ist geeignet, um hochindividuelle Versorgungslösungen zu fertigen.

Die digitale Fabrikation bietet das Potenzial Orthesen neu zu denken (siehe Dreiteilung).

Durch digitale Prozesse können die Akteur*innen besser eingebunden werden (z.B. Patient*innen).

Es braucht weitere Forschung, um oben genannte Potenziale zu verstetigen und zu etablieren.





Ausblick

Optimierung der Polsterung und der Topologie mit Erkenntnissen aus dem ersten Test.

Tests der Orthese über längere Zeiträume und vertiefte Begleitforschung.

Schrittweise Integration der cyber-physikalischen Prozesskette in die Praxis.

Vielen Dank!

Kontakt und weitere Informationen:

niklas.hamann@uni-weimar.de



Session 7:

Medizintechnik

**Wichtigkeit der Qualitätssicherung von
Medizinprodukten und patientenspezifischen
Produkten aus Medizinprodukten**

Dr. Dennis Wachtel,
BURMS- 3D Druck Jena GmbH & Co. KG

ABSTRACT

Wichtigkeit der Qualitätssicherung von Medizinprodukten und patientenspezifischen Produkten aus Medizinprodukten

Zur Herstellung von Medizinprodukten werden mittlerweile in der gesamten Medizintechnikbranche modernste Herstellungsmethoden wie die Additive Fertigung, besser auch bekannt als 3D-Druck, eingesetzt. 3D-Druckverfahren eignen sich nicht nur für die Serienfertigung von kleinen und großen Losgrößen einheitlicher Produkte, sondern auch für die Herstellung von individuellen, patientenspezifischen Medizinprodukten (den sog. „Sonderanfertigungen“).

Mit der Verabschiedung der Europäischen Verordnung über Medizinprodukte (Medical Device Regulation, EU 2017/745 - MDR) am 05. April 2017 wurde im Gesetzestext zusätzlich und erstmals auf industrielle Verfahren zur Herstellung von „Sonderanfertigungen“ und auf serienmäßig hergestellte Medizinprodukte Bezug genommen. Der Art. 2, Nr. 3 Satz 1 MDR definiert dabei den Begriff „Sonderanfertigung“. Ein Medizinprodukt wird demnach stets dann zu einer Sonderanfertigung, wenn es aufgrund einer schriftlichen Verordnung für einen einzigen Patienten hergestellt wird und ausschließlich spezifischen Auslegungsmerkmalen genügt, die nur bei diesem einen Patienten den angestrebten therapeutischen Nutzen entfalten. Weiterhin definiert der Gesetzgeber, dass Produkte, die gemäß schriftlichen Verordnungen serienmäßig in industriellen Verfahren hergestellt werden, nicht als Sonderanfertigungen gelten.

Um eine gleichbleibend hohe Qualität der mittels CAD/CAM wie auch 3D-Druck hergestellten Medizinprodukte und Sonderanfertigungen zu gewährleisten, müssen alle eingesetzten Materialien, Maschinen und die eigens dafür entwickelten Prozesse so aufeinander abgestimmt sein, dass die hergestellten Produkte die vorab definierten und notwendigen chemischen und physikalischen Eigenschaften aufweisen. Die Begründung dieser umfassenden Maßnahmen ist ebenfalls gesetzlich geregelt. Zusammenfassend muss ein Medizinprodukt trotz eines Eingriffs in den Körper des Patienten, z.B. invasiv und im Rahmen einer Operation, stets mehr medizinische bzw. therapeutische Vorteile wie etwa den voraussichtlichen Behandlungserfolg aufweisen als ein Patient ohne einen solchen Eingriff.

Die Verantwortung und Verpflichtung zur Erfüllung aller o.g. Voraussetzungen müssen grundsätzlich die Hersteller von Medizinprodukten übernehmen. Denn, diese Hersteller unterliegen bestimmten regulatorischen Vorgaben. Diese regeln u.a., dass bereit ab der Planung der Produktentwicklung gewünschte Eigenschaften für eine bestimmte Zweckbestimmung festzulegen sind, um eine sichere Anwendung zu gewährleisten. Diese müssen dokumentiert und im Entwicklungsprozess im Rahmen einer sog. Verifizierung nachgewiesen werden. Die Nachweise müssen hierbei mittels (Norm-)Testungen erfolgen, um die gesetzten Anforderungen an ein Medizinprodukt zu belegen. Die anschließende sog. Validierung muss durch Fachleute (z.B. durch Ärzte) und auf Basis der Verifizierungsinformationen erfolgen. Die zertifizierten Hersteller müssen zudem in gesetzlich vorgegebenen Abständen auditiert werden, um die Nachhaltigkeit und Aktualität der Qualitätssicherungsmaßnahmen nachzuweisen.

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass nur durch ein solches, gesetzlich definiertes Zusammenspiel der Normung, der Verifizierung und der Validierung von Medizinprodukten Medizinproduktehersteller der zentralen Anforderung gerecht werden können, sichere Medizinprodukte zu entwickeln, herzustellen und in Verkehr bringen.

Session 7:

Medizintechnik

**Entwicklung eines 3d-gedruckten
patientenspezifischen biooptischen
Stereotaxie-Systems**

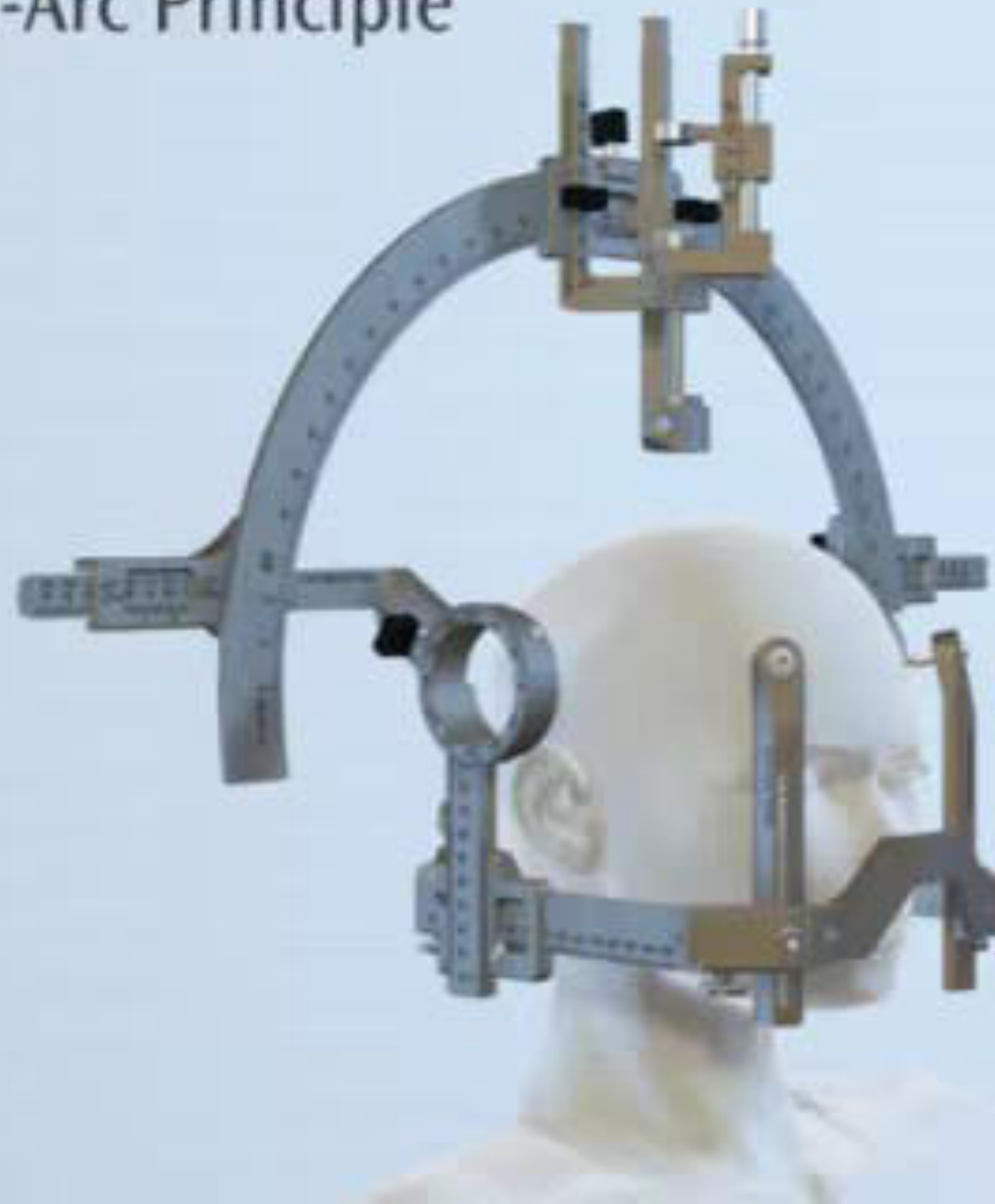
Dr. Fabian Kropla,
Universität Leipzig

ARISE – Leipziger Biopsie System





Center-of-Arc Principle



Stand der Technik



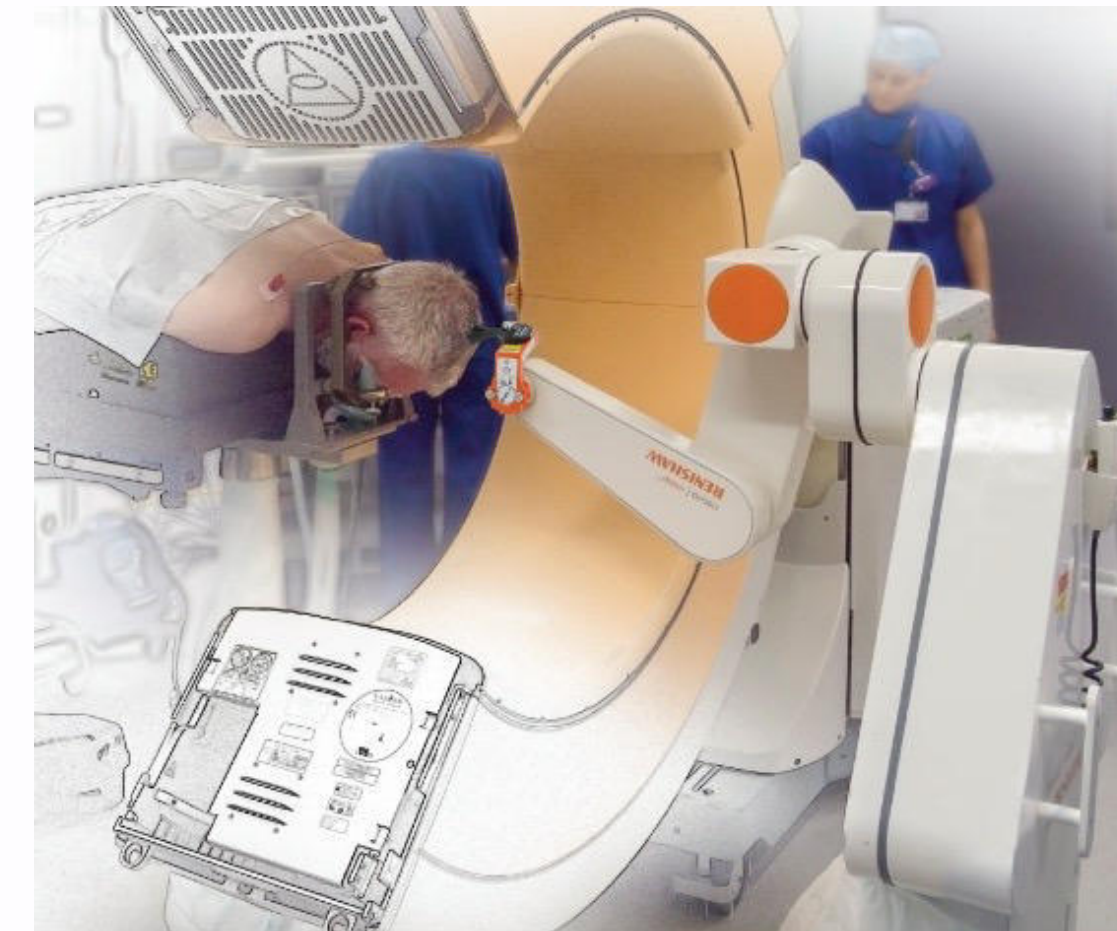
Stereotaktische
Rahmen

1960



Navigationssysteme

2000



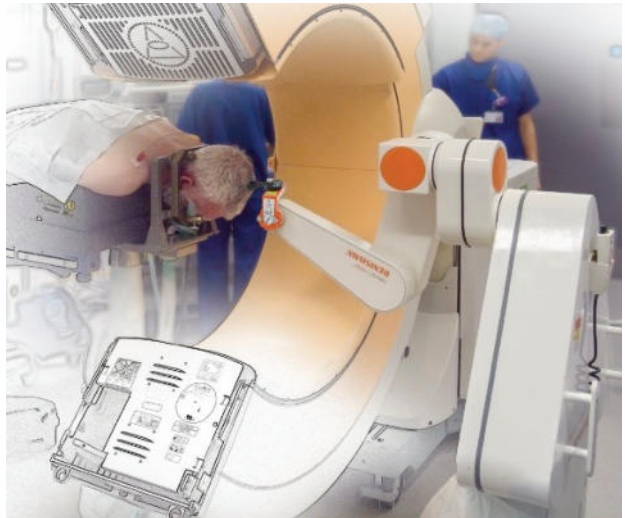
Robotik

2001

ARISE

2023

Alleinstellungsmerkmale - klinisch

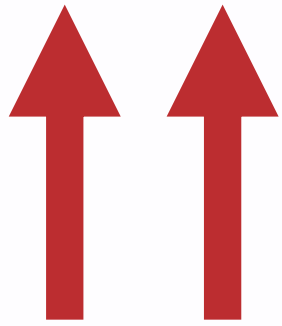


Leipziger
Biopsie
System

Infektionsrisiko



Störanfälligkeit



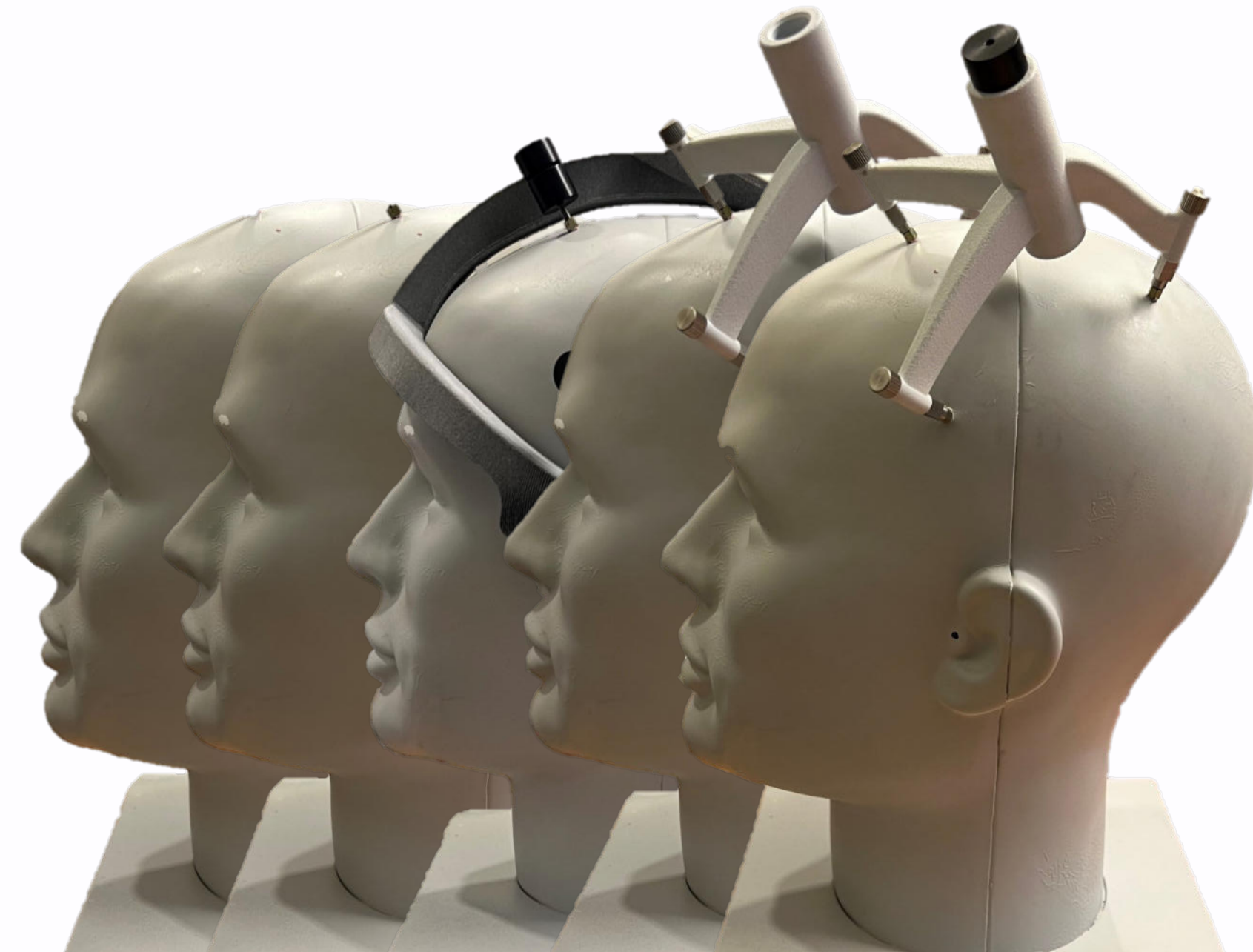
Genauigkeit

2 mm

3 mm

< 2 mm

Workflow in praxi



Workflow in praxi



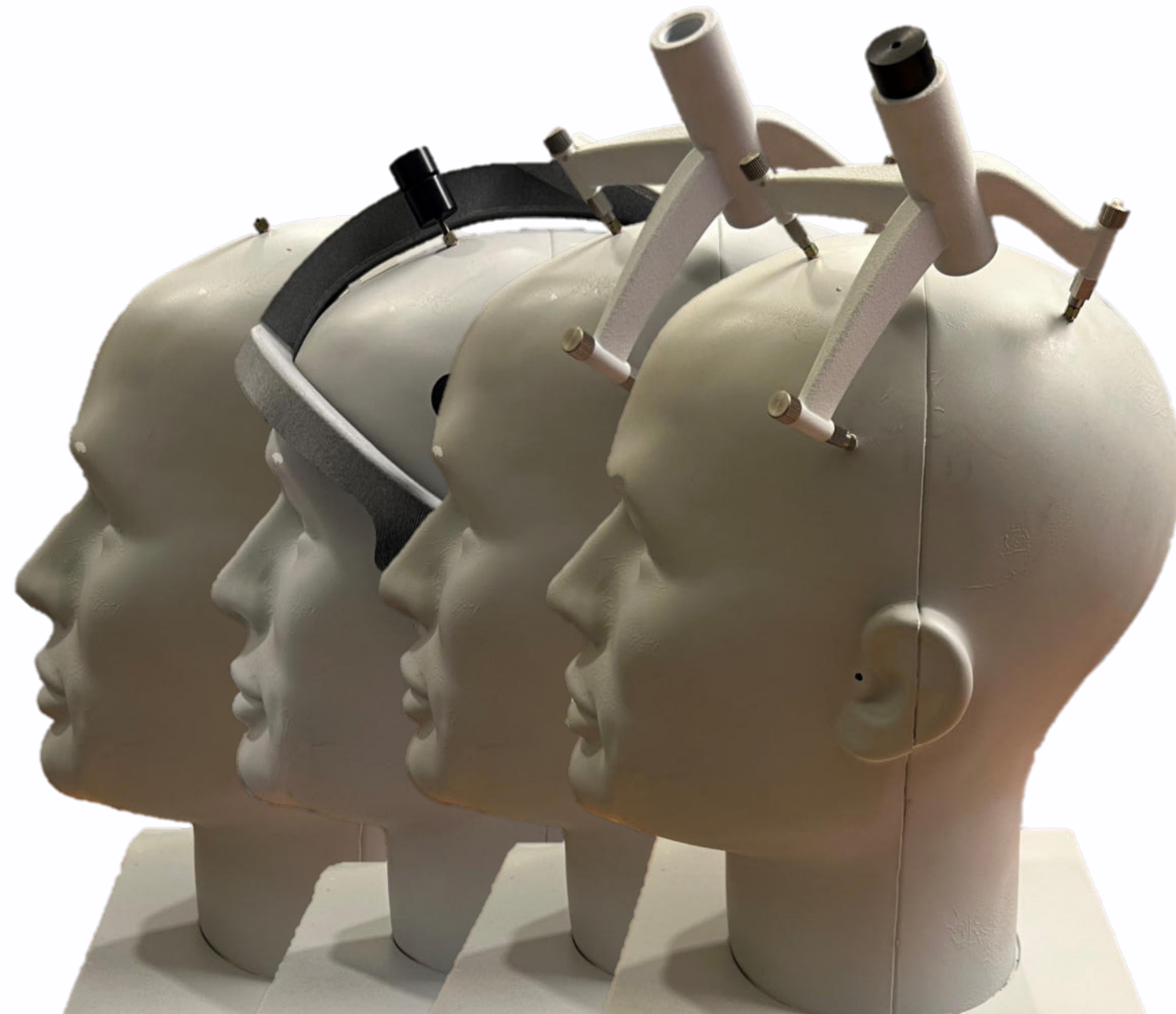
Workflow in praxi



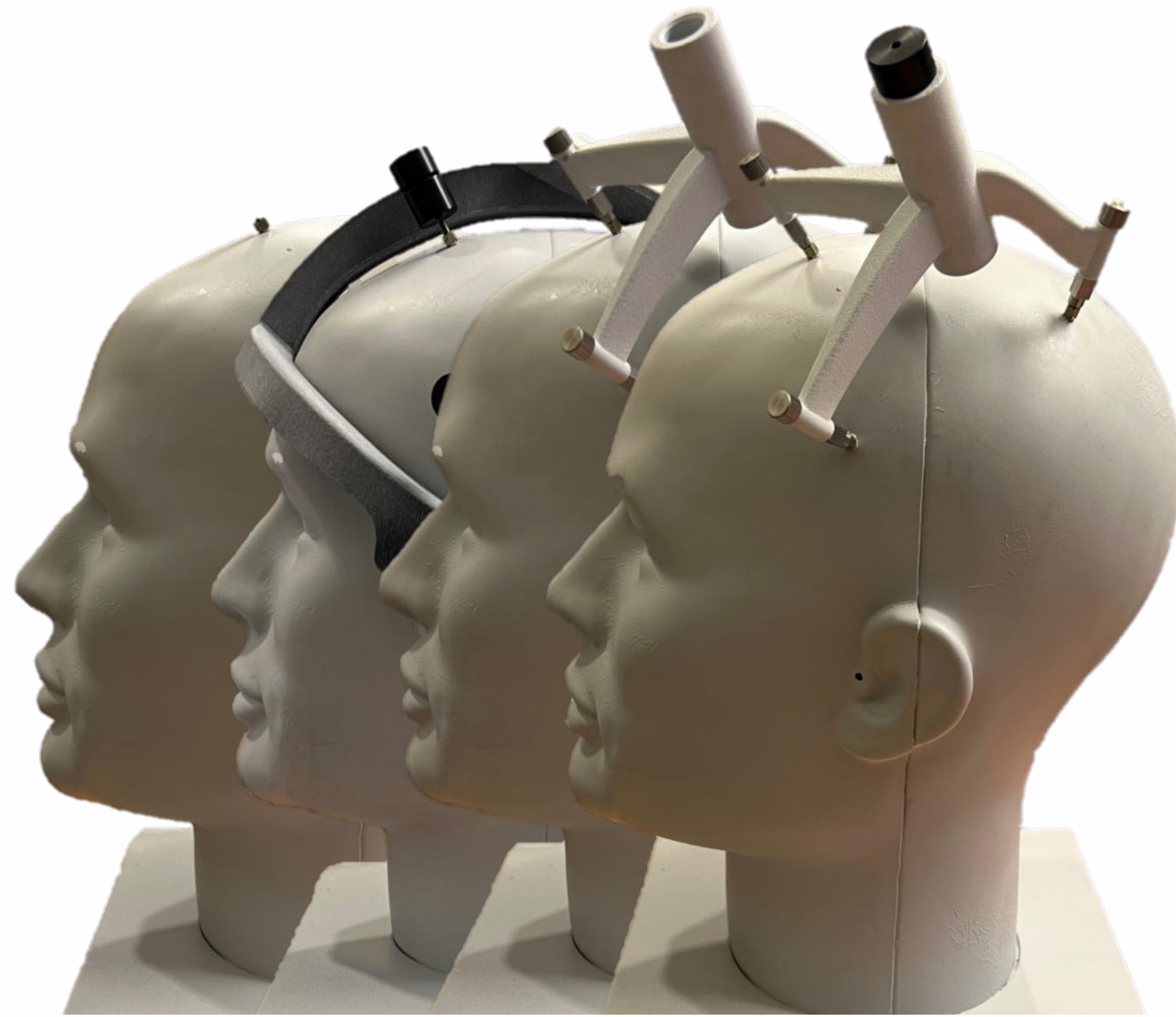
Workflow in praxi



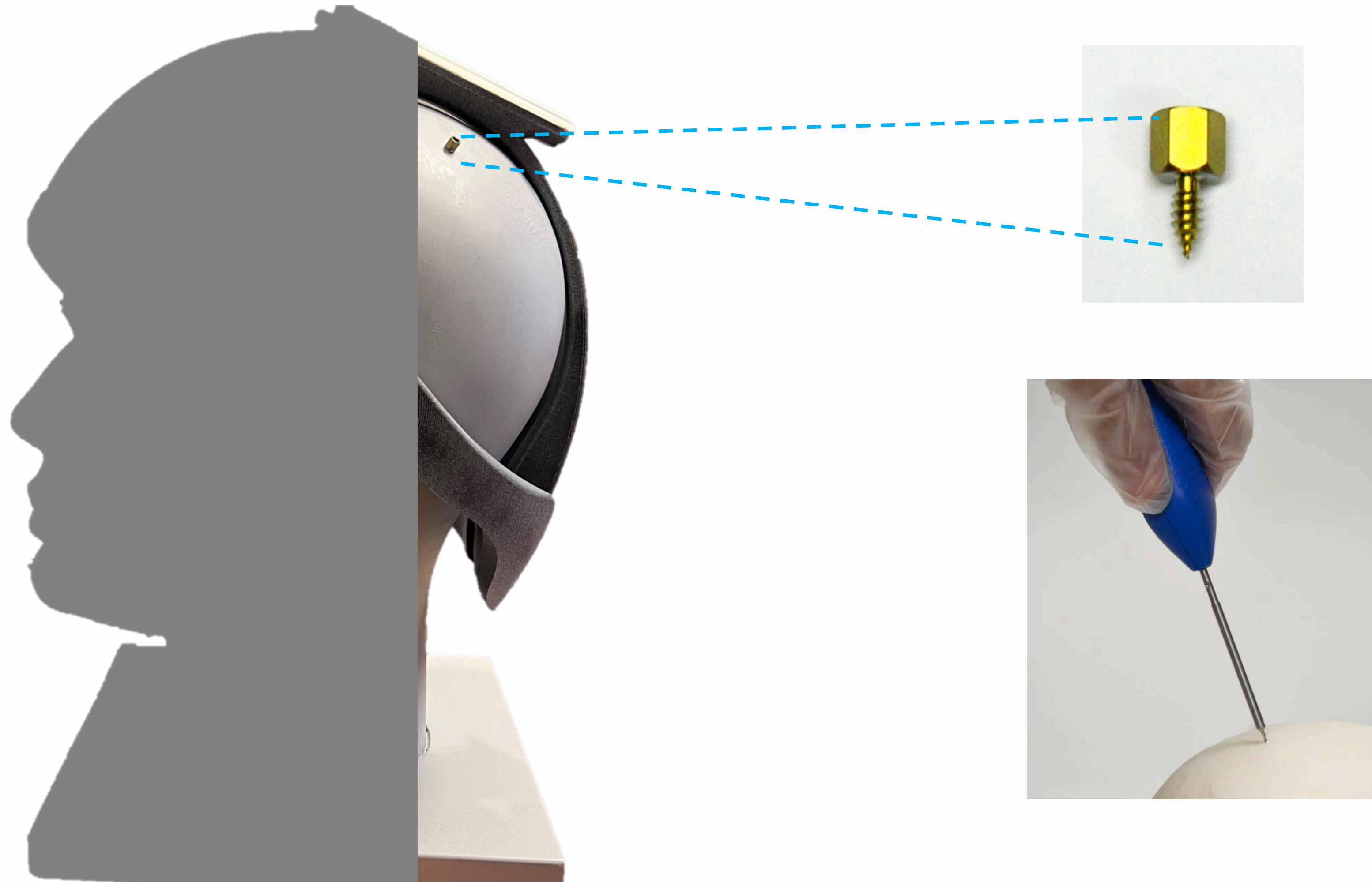
Workflow in praxi



Workflow in praxi



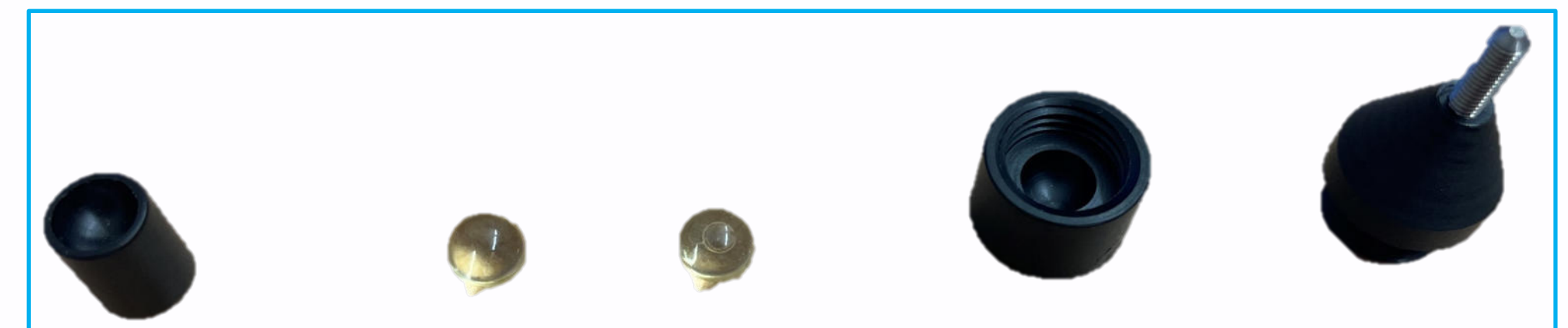
Platzierung der Knochenanker entsprechend der erwarteten Lokalisation der Pathologie



Montage MRT / CT kompatible Marker

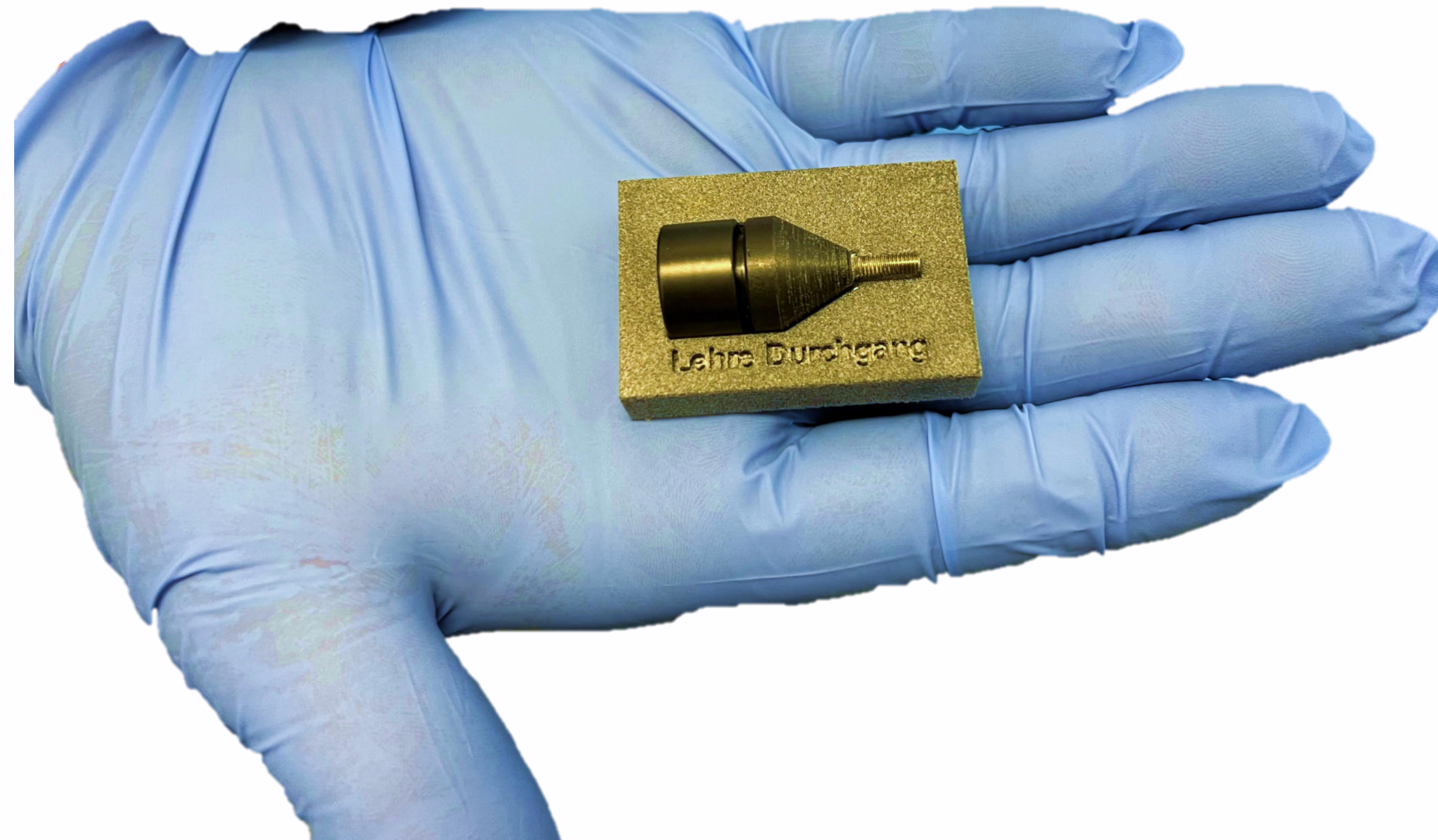
Hinweis:

- 3 sterile MR-Marker erübrigen CT-Diagnostik und Datenfusion
- pro MR-Marker werden 2 Kapseln (Dekristol-) zur Definition des Richtungsvektors eingebracht



Montage MRT / CT kompatible Marker

Qualitätsprüfung auf Maßhaltigkeit mit Schablone

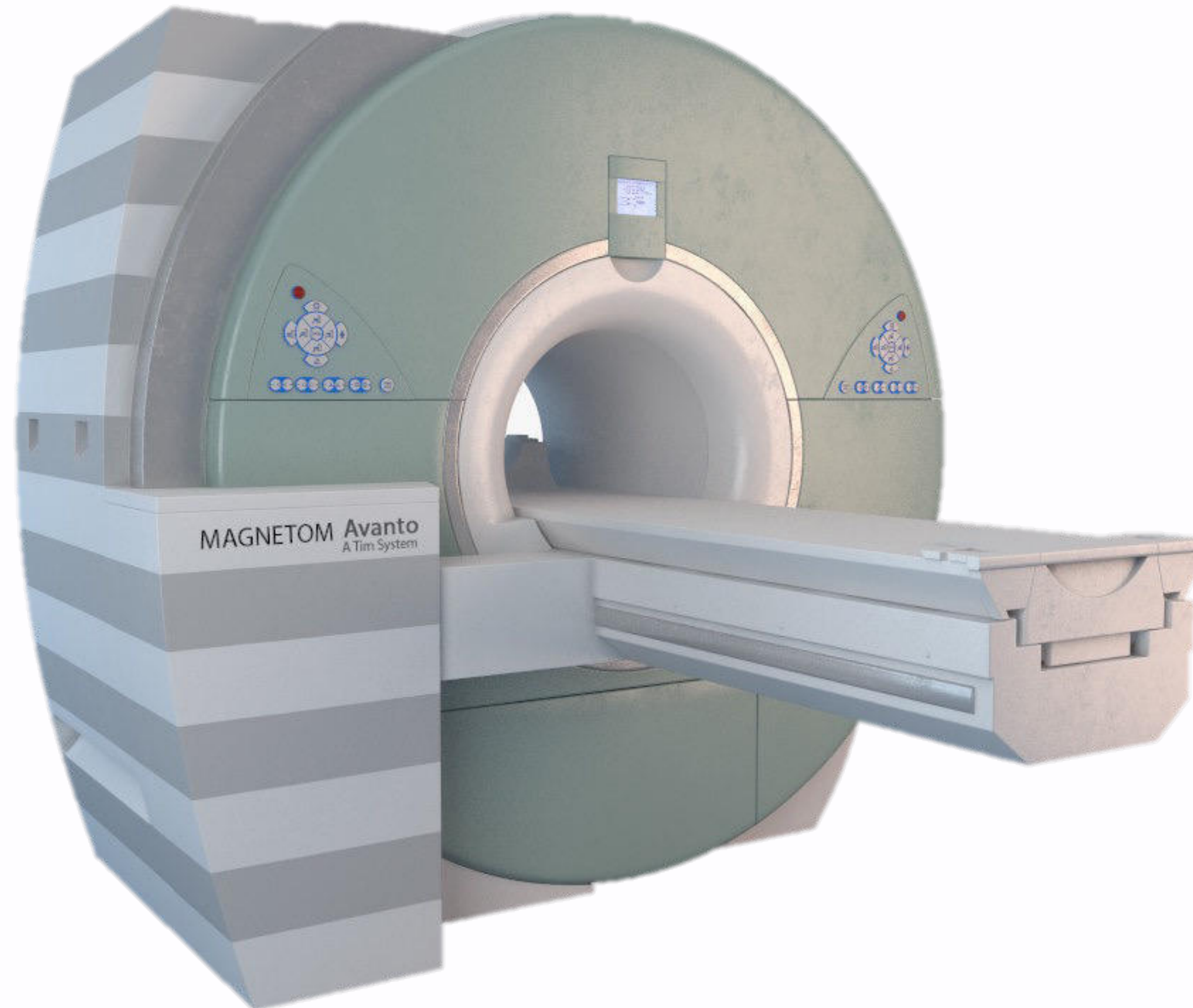


Montage MRT / CT kompatible Marker

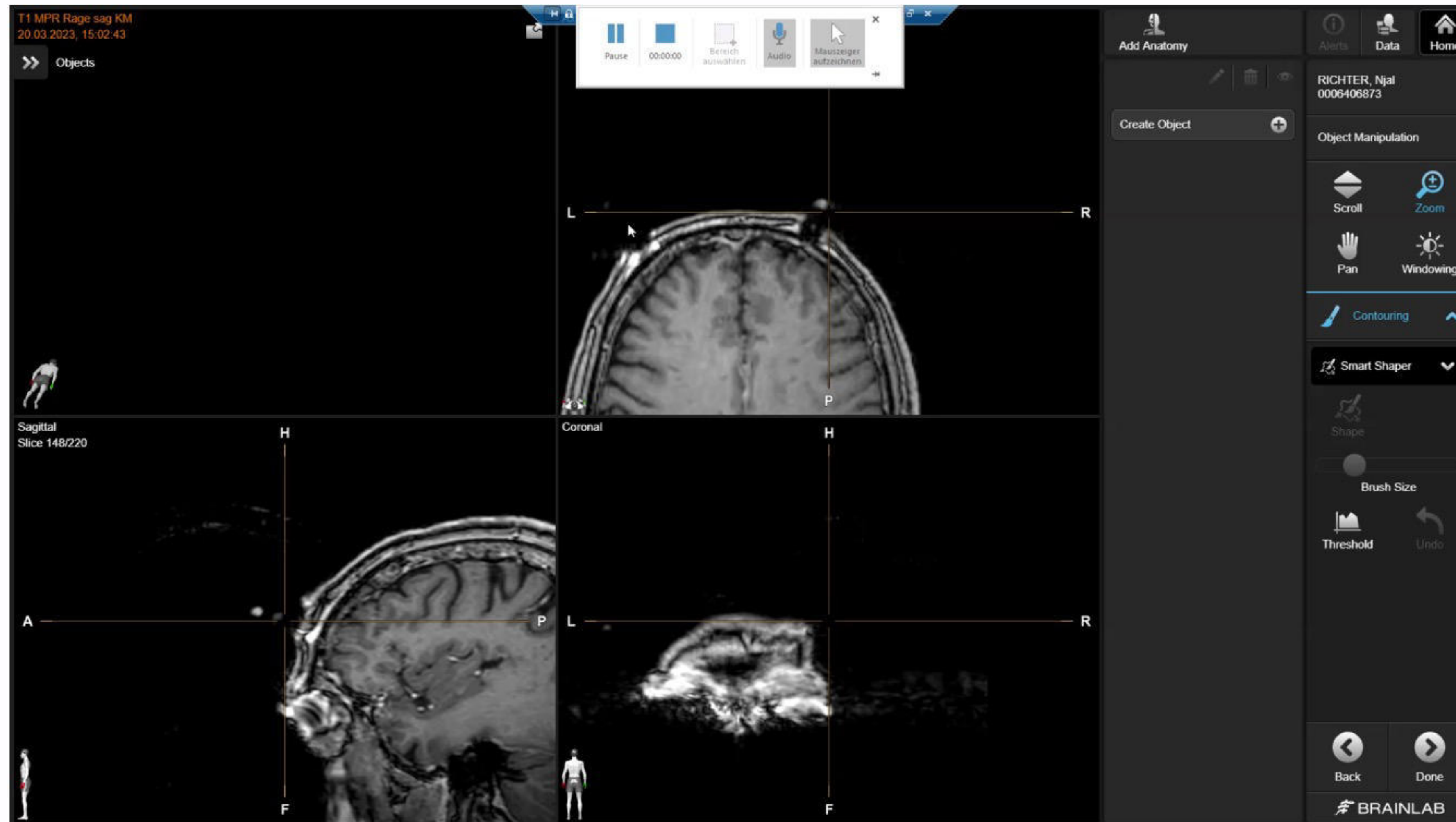
Platzierte 3 MRT/CT-Marker



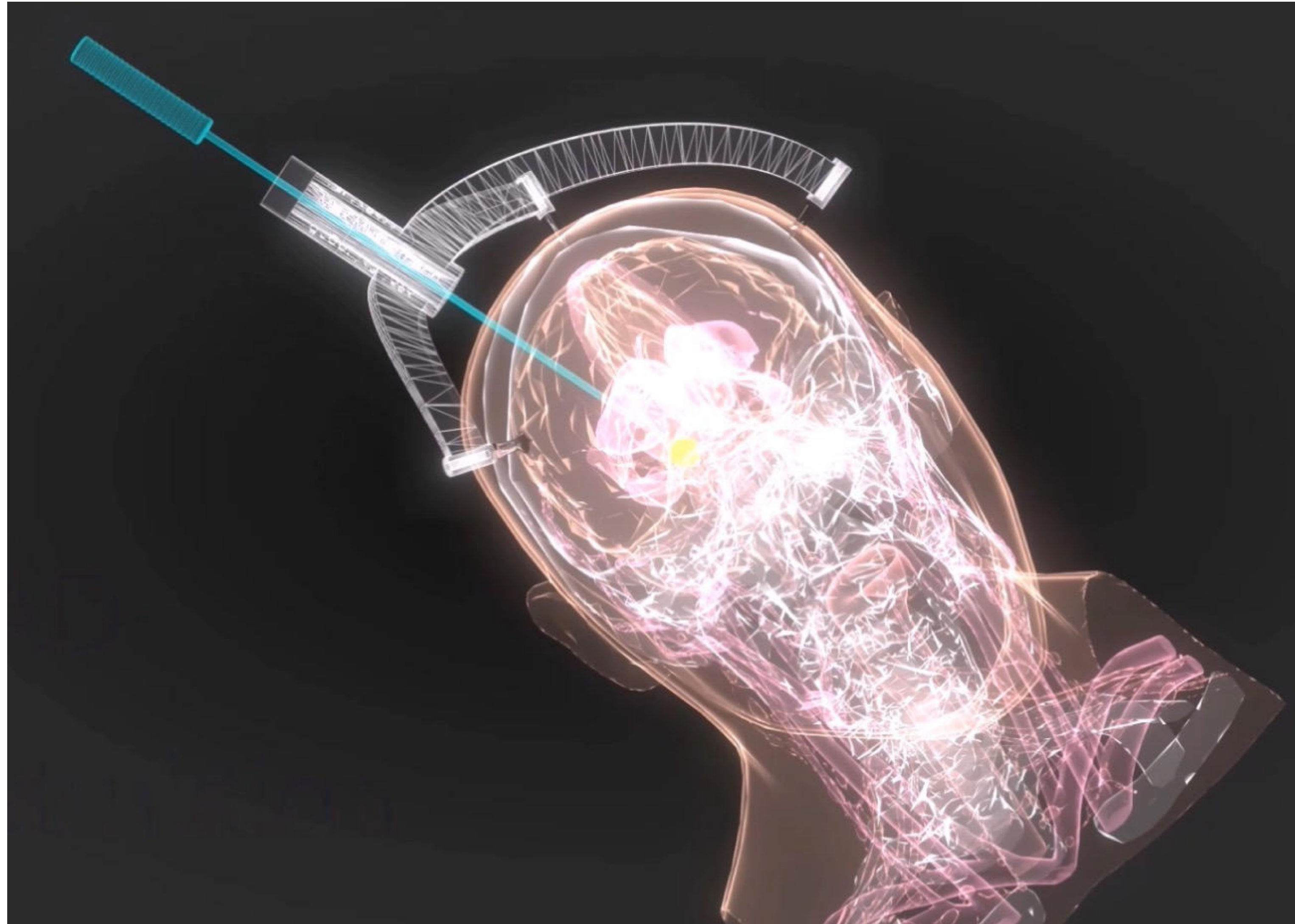
MRT oder CT



Markierung Ziel- und Eintrittspunkt (Brainlab-Software)



CAD-Konstruktion



3D-Druck mit HP Multi Jet Fusion



Tiefeneinstellung der Biopsienadel

Stopper für
Tiefeneinstellung

Metall-Grundplatte

Biopsie-Nadel

Patientenspezifische
3D-Druck-Platte
für Tiefeneinstellung



Einführung der Biopsienadel bis zum Stopper



Stopper

Genauigkeit Inhouse-Stereotaxie

Studie (Körperspender)

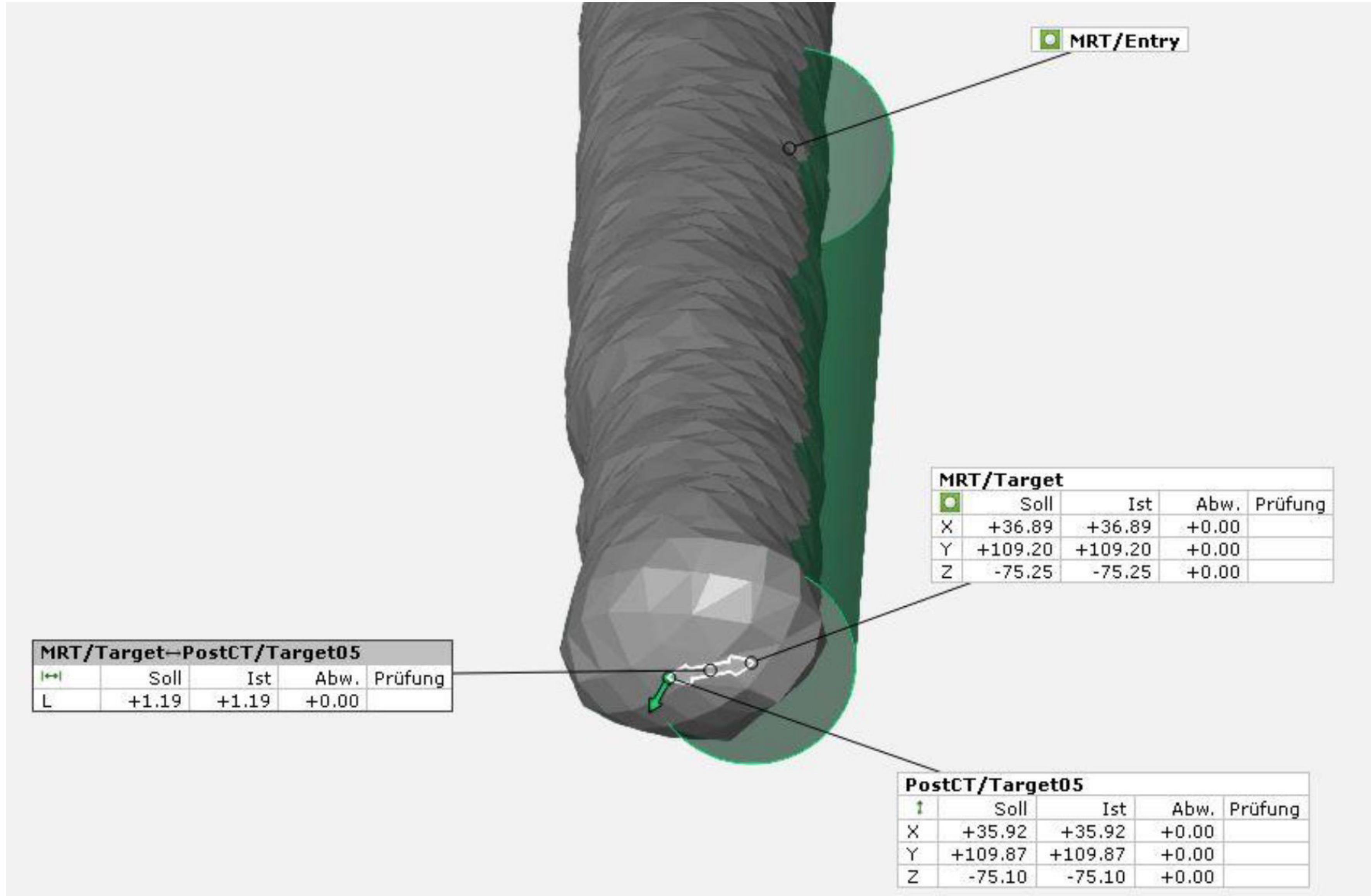
- Pre-operatives Planungs-MRT (T1, Schichtdicke: 1mm)
- 10 x stereotaktische Nadelbiopsie $\varnothing 2,5\text{mm}$ (intrakraniell)
- Intra-operatives Kontroll-CT (Schichtdicke: 0,67mm)

Methode

- Planung via *D2P*[®] (3D Systems)
- Koordinatenexport via *GOMInspect 2019* (GOM)
- Konstruktion mit *SolidWorks 2019* (Dassault Systemes)
- Druckauftragsplanung mit *HP BuildManager 2.0*
- 3D-Druck/Fertigung mit *HP MJF 580 color*



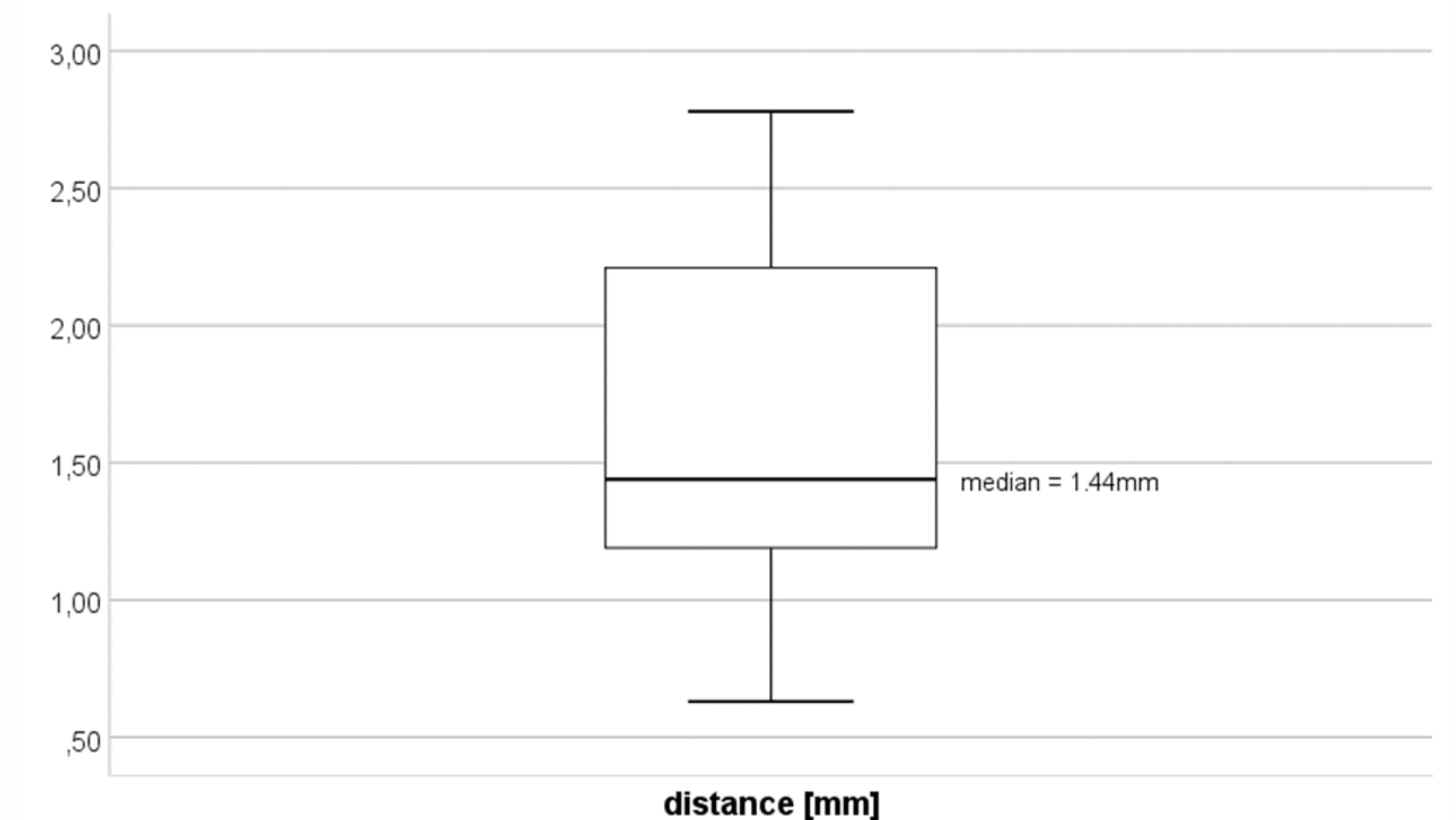
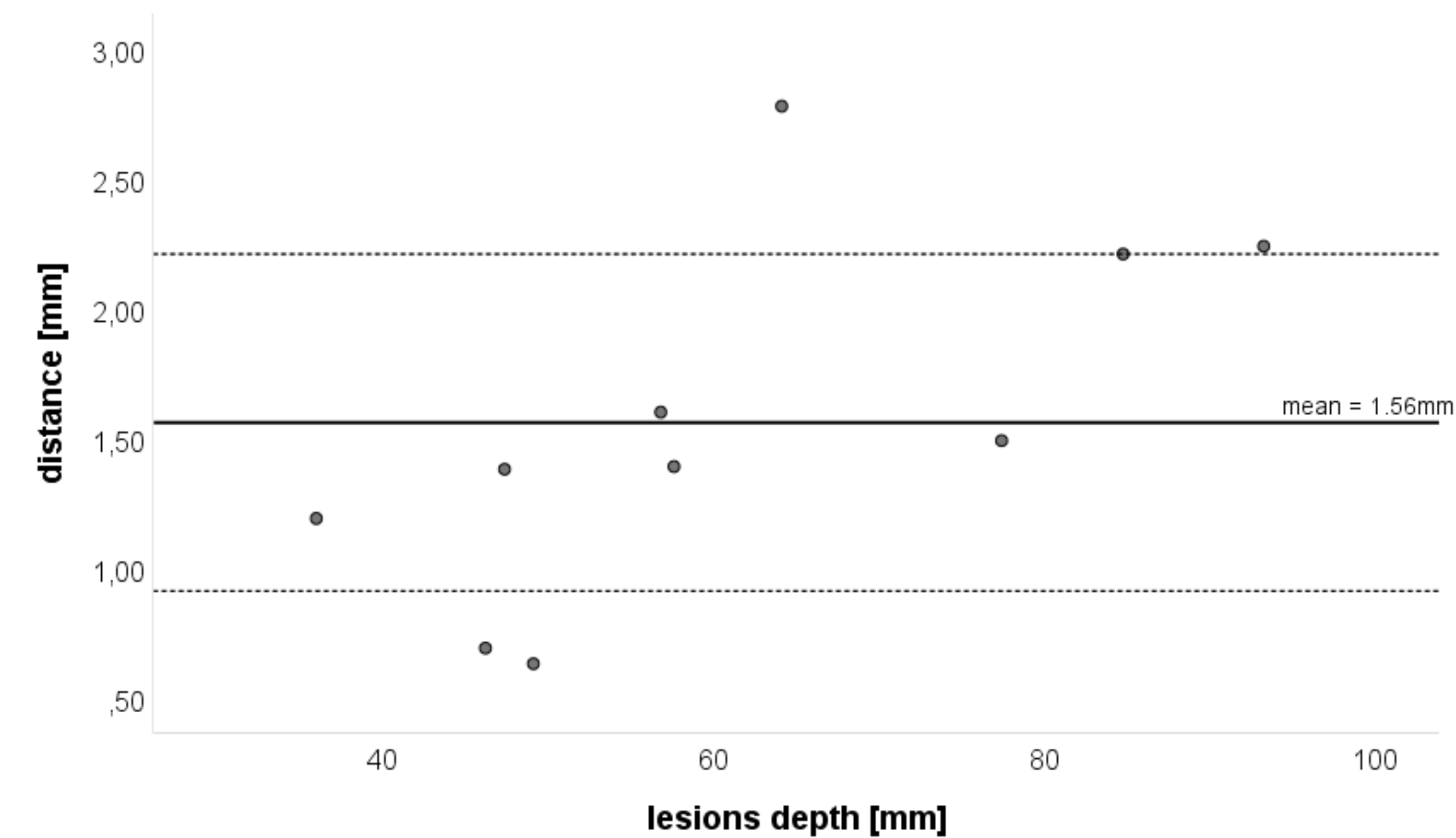
Messung Abstand Soll – Ist - Zielpunkt



Ergebnisse Genauigkeitsstudie

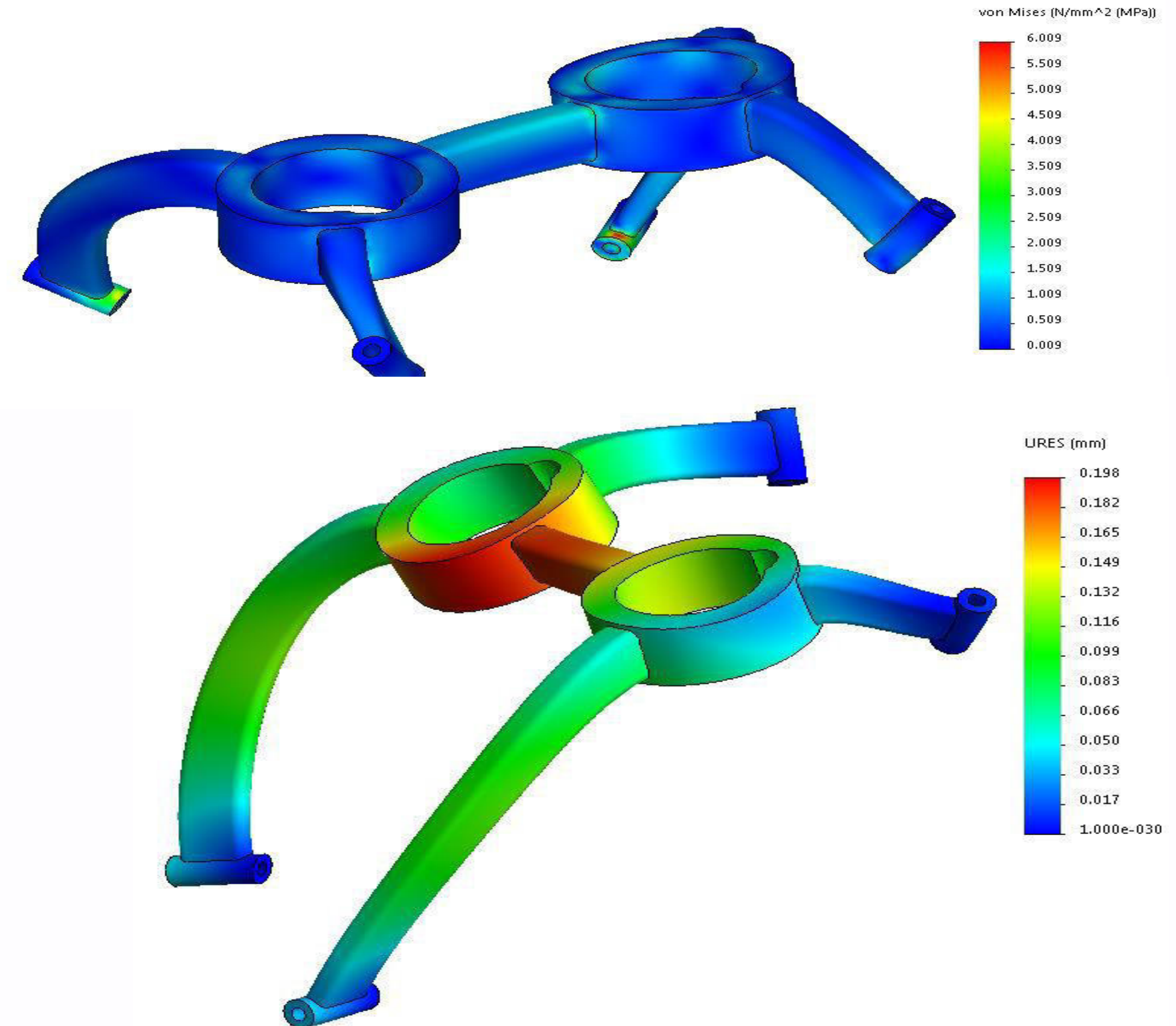
Target	distance total [mm]	distance z [mm]	distance y [mm]	distance x [mm]	lesion depth [mm]	fitting diameter [mm]
1	2,24	0,08	-2,22	0,34	93,24	3,30
2	2,78	0,02	2,68	0,77	64,11	3,16
3	2,21	1,96	-0,91	-0,45	84,74	2,80
4	1,38	-1,11	-0,03	-0,82	47,36	3,08
5	1,60	-1,03	-0,73	-1,00	56,80	3,14
6	1,39	-0,19	1,24	0,60	57,60	3,13
7	1,49	-0,10	-1,46	-0,28	77,40	3,01
8	0,69	0,42	-0,12	-0,54	46,20	3,08
9	1,19	-0,15	-0,67	0,97	35,98	3,05
10	0,63	0,40	0,10	0,47	49,10	3,06
mean	1,56				61,25	3,08
SD	0,65				17,56	0,12

Ergebnisse Genauigkeitsstudie

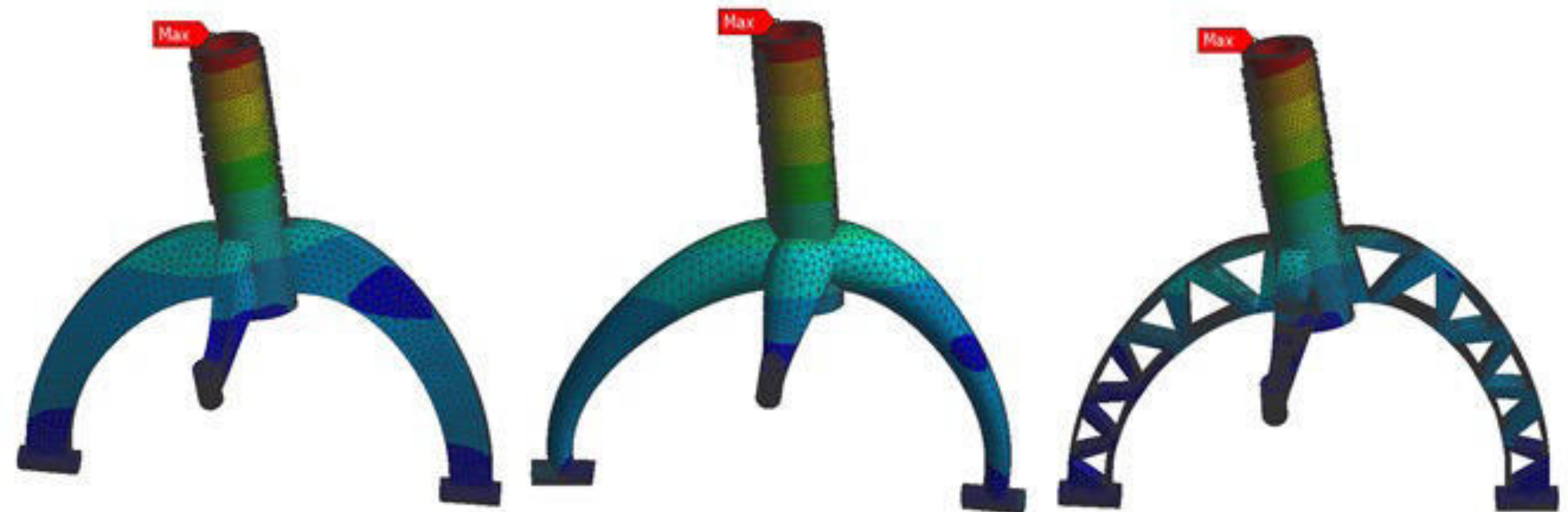


Stabilitätsbetrachtung und Topologieanalyse an repräsentativen Stereotaxierahmen

- Ermittlung der Spannungswerte an anhand bewußt größer gewählter Prüfkörper
- Analyse der Verformungen
 - Maximum 0,2 mm

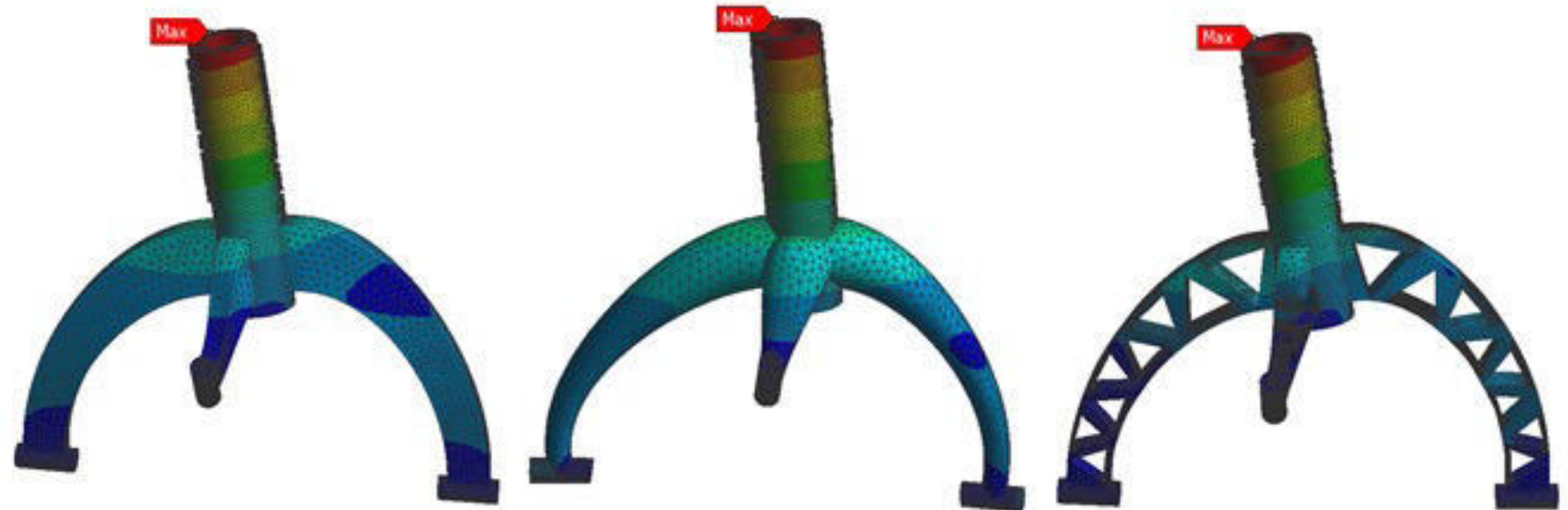


Stabilitätsbetrachtung und Topologieanalyse



	Rechteckig gefüllt	Rund	trabekulär
Gesamtverformung [mm]	0,723	0,626	1,499
Volumen [cm ³]	21,786	38,901	12,467

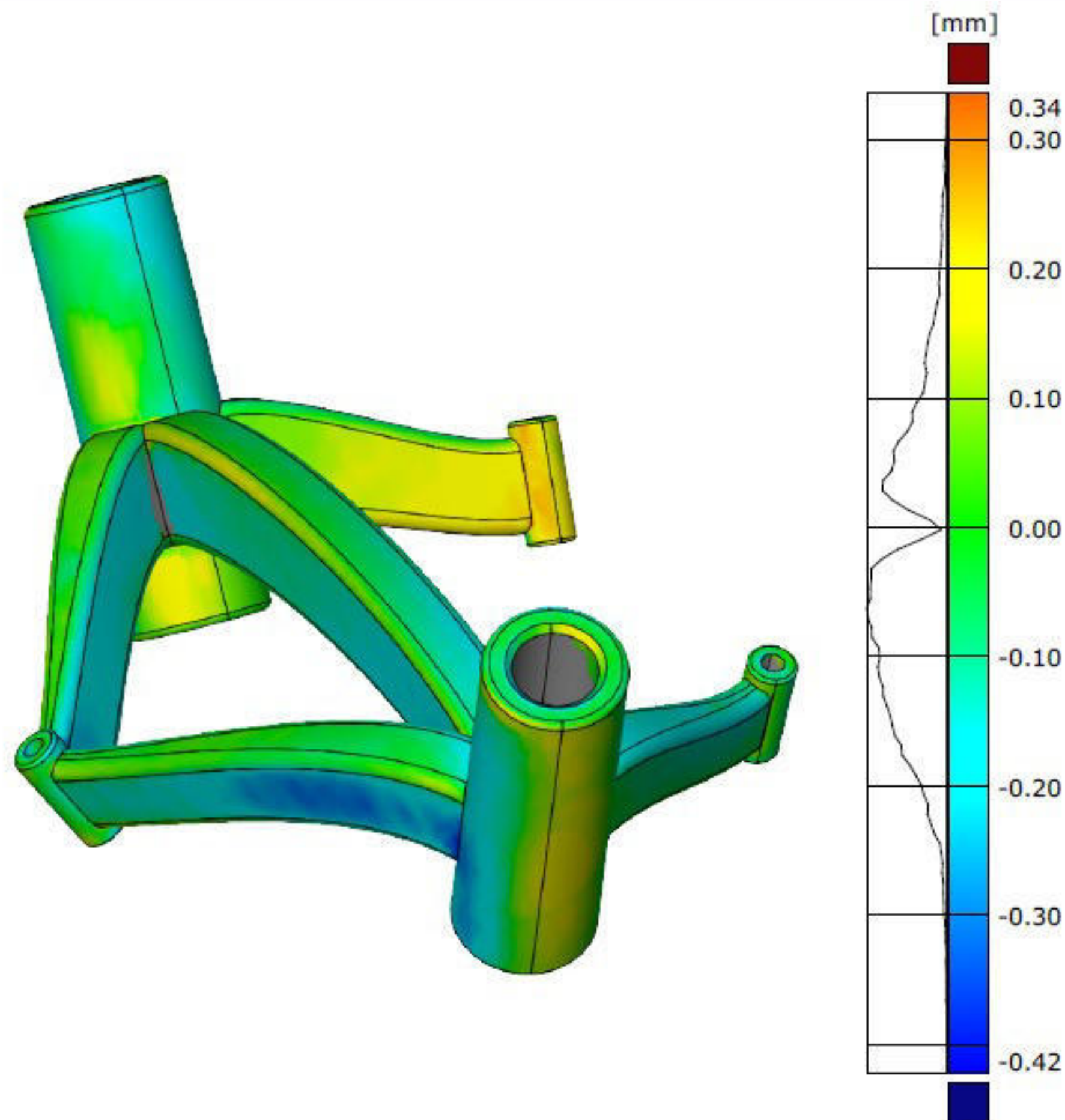
Stabilitätsbetrachtung und Topologieanalyse



	Rechteckig gefüllt	Rund	trabekulär
Gesamtverformung [mm]	0,723	0,626	1,499
Volumen [cm ³]	21,786	38,901	12,467

Analyse Einfluss Dampfsterilisation

Genauigkeit CAD-Modell vs. Post-Sterilisation



Mittel: 0.5 mm

Stdabw: 0.3 mm

Max: 1.1 mm

Min: 0.1 mm

Entwickelt nach Medizintechnik-Norm ISO13485



CERTIFICATE



Registrierungsnummer	18605 - M	Gültig ab	2020-05-19
Erstausgabe	2020-05-19	Letzte Änderung	2020-05-19
Gültig bis	2023-05-18		

Qualitätsmanagementsystem Zertifikat
ISO 13485:2016

Hiermit wird bestätigt, dass das Qualitätsmanagementsystem der Firma:

UNIVERSITÄT LEIPZIG

KLINIK UND POLIKLINIK FÜR NEUROCHIRURGIE

der Norm ISO 13485:2016 für die folgenden Produkte/Dienstleistungen entspricht:

Entwicklung, Herstellung und Vertrieb von Sonderanfertigungen patientenspezifischer
3D-gedruckter Modelle und Instrumente

Chief Operating Officer
Giampiero Belcredi

Die Aufrechterhaltung der Zertifizierung unterliegt einer jährlichen Überwachung sowie der Einhaltung der vertraglichen Anforderungen von Kiwa Cermet Italia.

Details über Ausschlüsse, hinsichtlich der Anforderungen der ISO 13485:2016, befinden sich im Qualitätshandbuch.

Das vorliegende Zertifikat besteht aus 1 Seite.

Vorteile 3D-gedrucktes Leipzig System

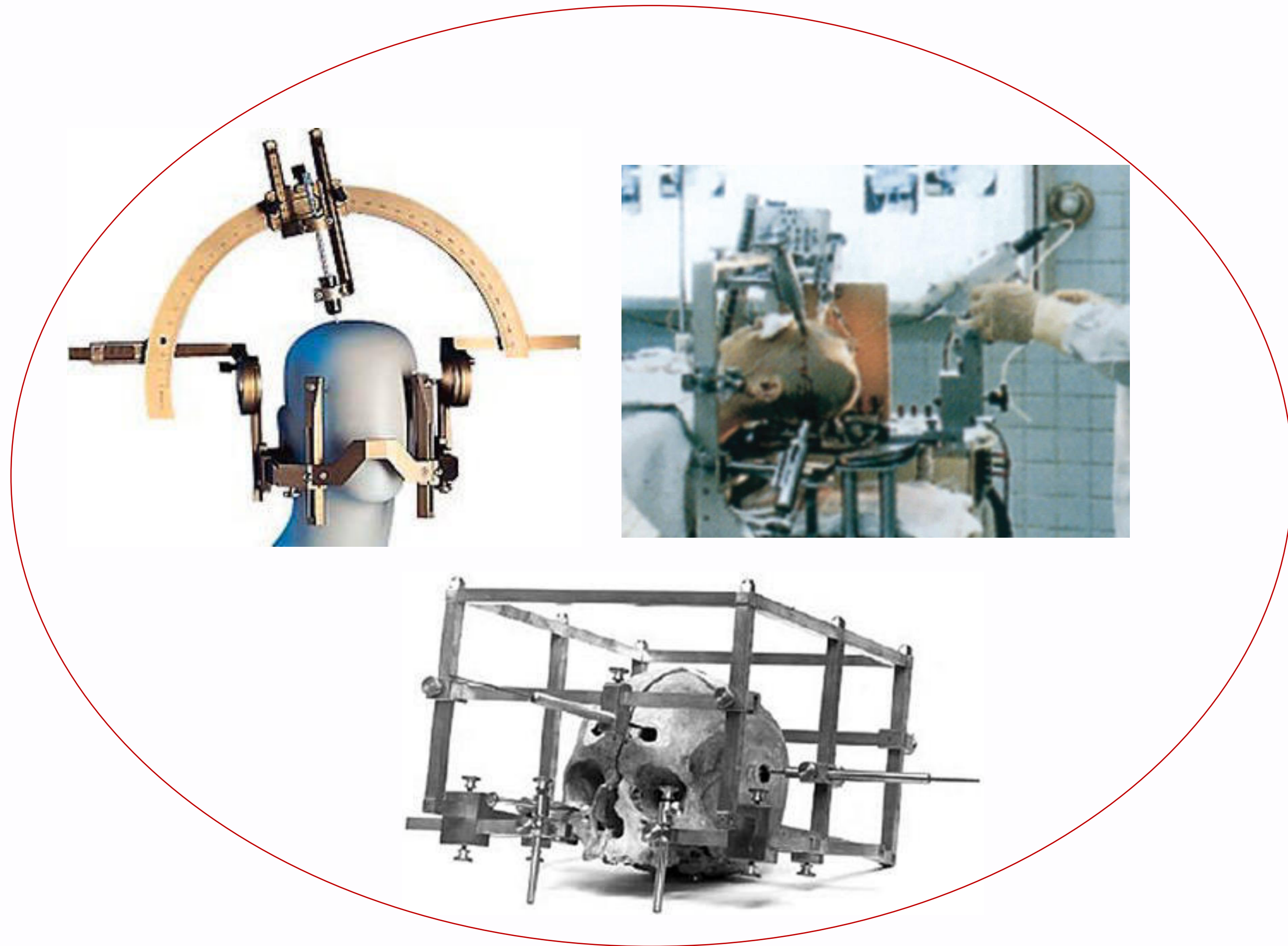
- **Einzelanfertigung** für jeden Patienten
- Extreme **Vereinfachung** des Systems
- **Einmalgebrauch**, keine Re-Sterilisation
- Keine Justierungen/"menschlichen" Fehlerquellen
durch Chirurgen

Biopsie-Anwendung: Mehrwert ggü. konventionellem System

Der potenzielle wirtschaftliche Mehrwert vor Systemkosten für die Klinik beträgt derzeit rund € 9.400 je Anwendung.

Euro je Anwendung	Konventionelles System (stereotaktischer Rahmen) Stand 02/2024	NEXT3D Biopsie-System Stand 02/2024	NEXT3D Biopsie-System Vergütungsanpassung worst case Deutschland	Mehr-Erlös (0 - max. 5.197)
Erlöse (DRG)				
- ohne Marker - mit Marker	7.758	12.955	7.758	
Kostenvergleich				
Kosten der Anwendung - Systemkosten pro Fall - kalk. AfA*	-500	Pricing tbd		Ersparnis vor Systemkosten: 4.200
Kostenreduktion - Verringerung OP-Zeit - Handling (Sterilisation etc.)		3.000 700	3.000 700	
Ergebnisvergleich Klinik	7.258	16.655	11.458	

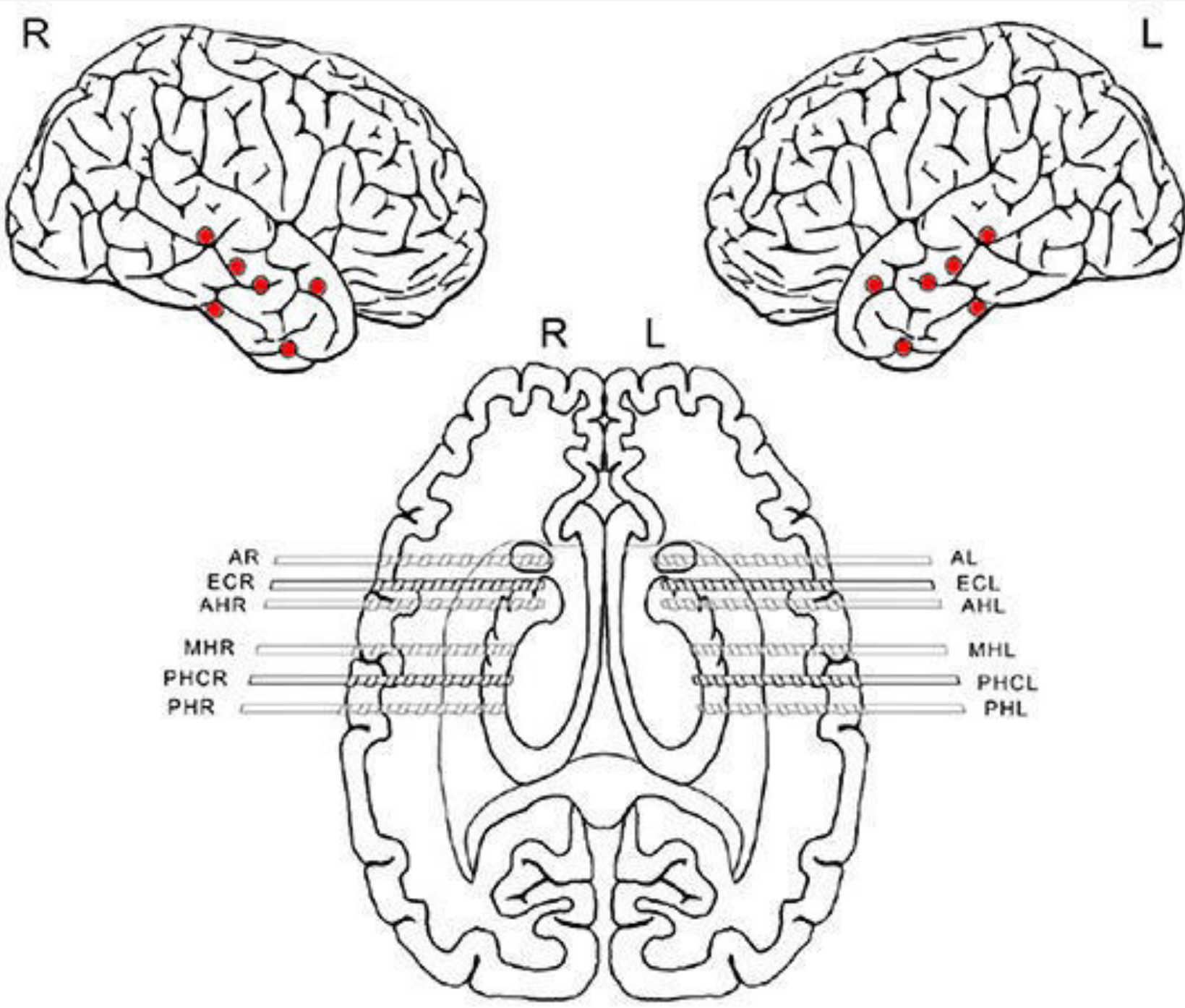
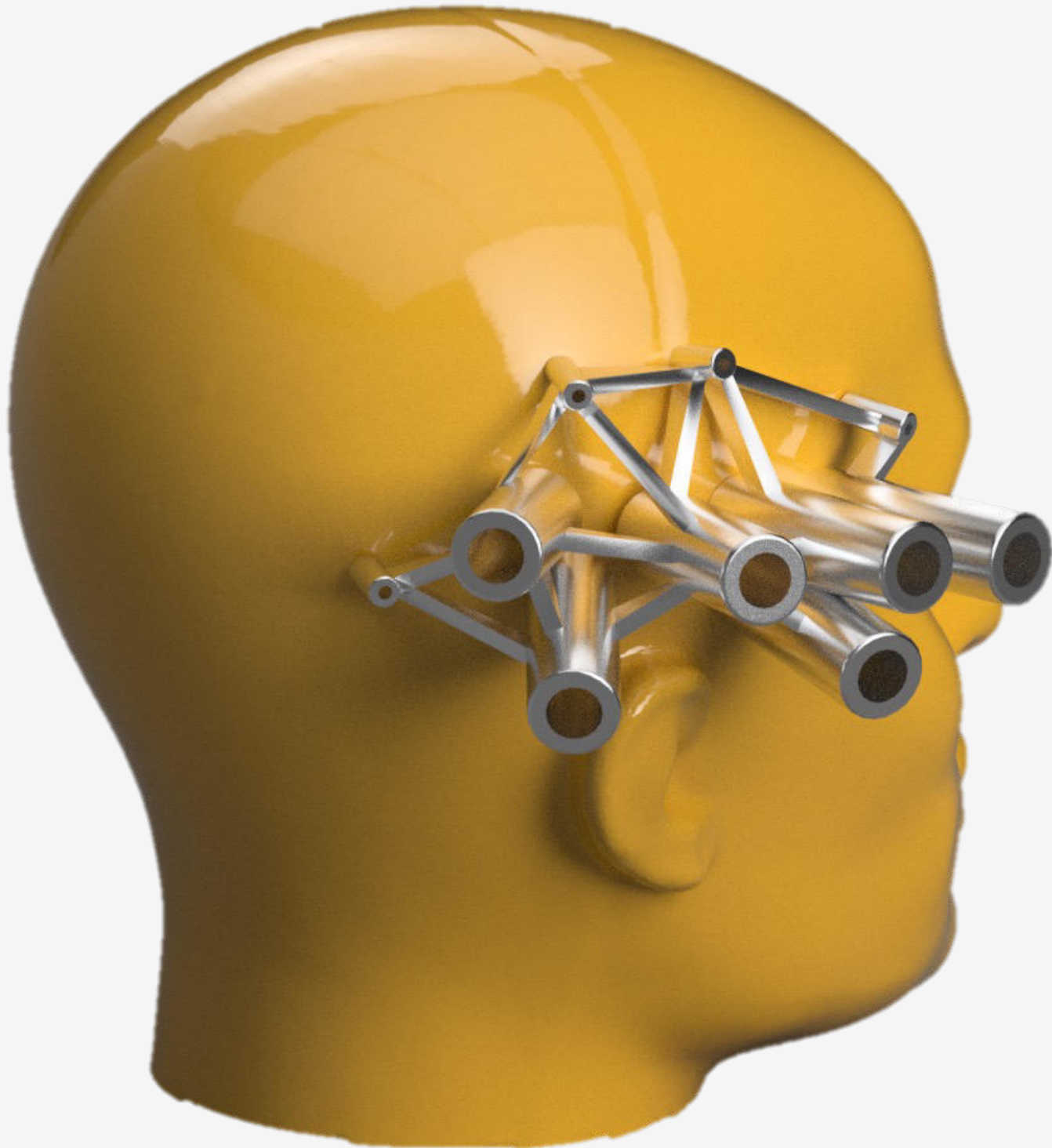
“Demystifikation” Stereotaxie/Hirnstimulation



Multi-Biopsievorrichtung

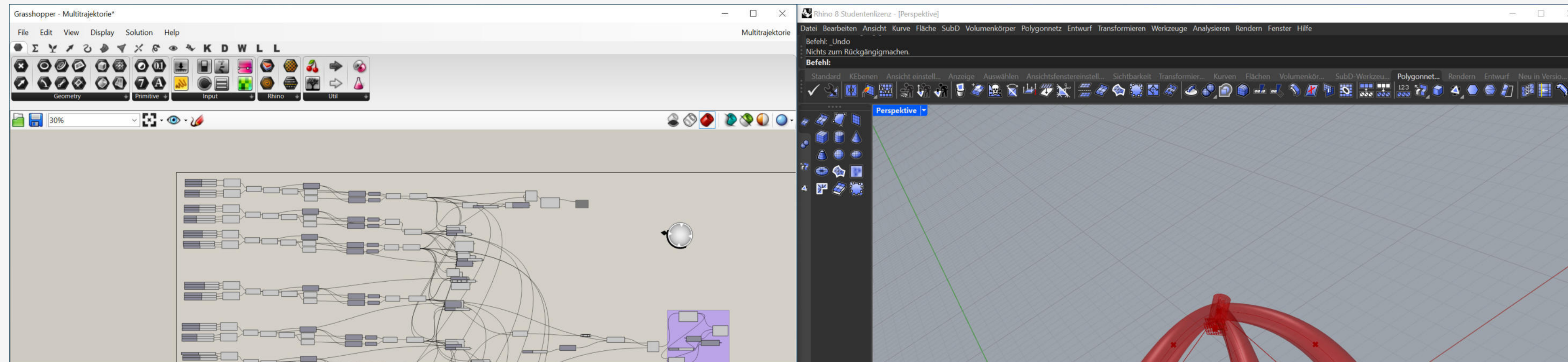
- Stereotaktische Punktion von implantierten Elektroden

Prototyp



Martinez CGS, Niediek J, Mormann F and Andrzejak RG (2020) Seizure Onset Zone Lateralization Using a Non-linear Analysis of Micro vs. Macro Electroencephalographic Recordings During Seizure-Free Stages of the Sleep-Wake Cycle From Epilepsy Patients. *Front. Neurol.* 11:553885. doi: 10.3389/fneur.2020.553885

Parametrische Modellierung



Aktueller Stand

Wir danken für konstruktive Vorschläge
und ein aktives Mitgestalten einer
Leipziger Stereotaxie auf der Basis des
3D-Drucks

Session 8: Qualitätssicherung im 3D-Druck 2

**Hochaufgelöste visuelle In-Situ
Prozessüberwachung im PBF-LB/M**

Jonathan Schmidt,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

16.10.2024

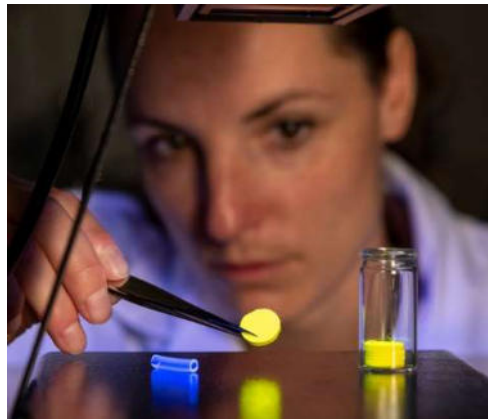
HOCHAUFGELÖSTE VISUELLE IN-SITU PROZESSÜBERWACHUNG IM PBF-LB/M

M.Sc. Jonathan Schmidt, M.Sc. Benjamin Merz

Fachbereich 9.6 Additive Fertigung metallischer Komponenten

11. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

Unsere Mission: Sicherheit in Chemie und Technik



Kompetenzzentrum Additive Fertigung



- Weiterentwicklung additiver Fertigungsprozesse und Prüfkonzepte für den Einsatz von AM-Komponenten in sicherheitsrelevanten Anwendungen
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Fachgruppen
- Fachbereich 9.6 zentraler Akteur für den PBF-LB/M-Prozess



Prozessentwicklung für Metalle, Keramiken & Beton

Digitale Qualitäts-sicherung und Prozessüberwachung



**Werkstoff-
charakterisierung
und -verhalten**

**Bauteilverhalten
und Prüfkonzepte**

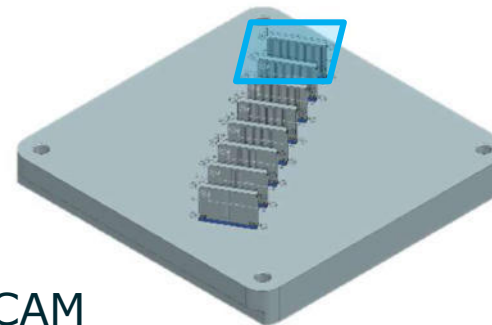
Motivation

Hochaufgelöste visuelle In-Situ Prozessüberwachung

- In-Situ Prozessüberwachung zur automatischen Defekterkennung mittels Schichtbildern
 - OEM-Kamerasystem mit begrenzter Auflösung von $100\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$ bis $400\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$
 - Keine Detektion kritischer Defekte in Schichtbildern aus OEM-Systemen
 - Hohe Falsch-Positiv-Rate hindern Adaption und Wirtschaftlichkeit der Prozessüberwachung
- Visuelle In-Situ Prozessüberwachung anhand von hochaufgelösten Bildern
- Automatische Defekterkennung mittels faltender neuronaler Netzwerke (CNN)



Schichtbilder aus OEM-System mit Auflösung von $293\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$



Visuellen In-Situ Prozessüberwachung

Systemintegration in SLM280HL



Spezifikationen:

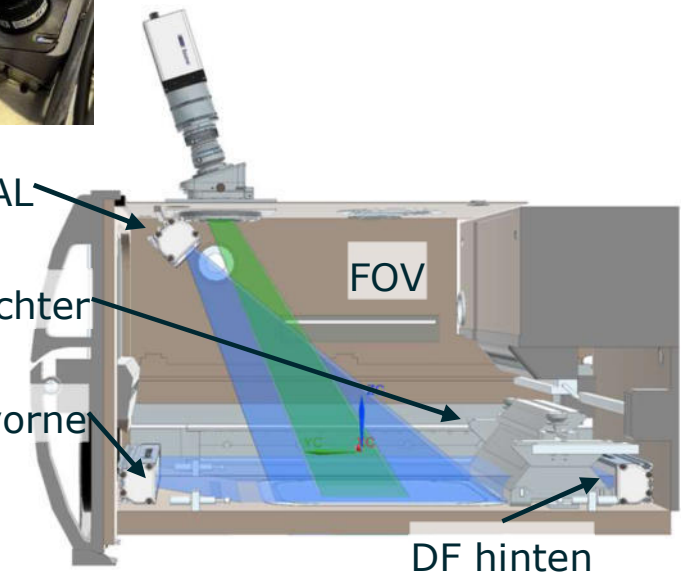
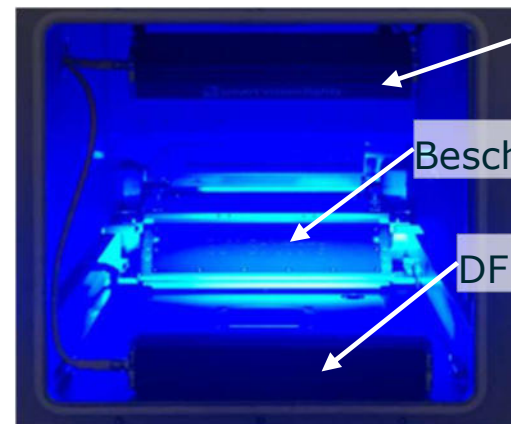
- Kameraauflösung: 65 MPixel
- Sichtfeld (FoV): ca. $\sim 120 \times 160 \text{ mm}^2$
- Räumliche Auflösung: $17.2 \mu\text{m}/\text{Pixel}$
- Beleuchtungssituationen:
 - Auflicht (AL)
 - Dunkelfeld (DF)



Baumer VLXT 650M.I

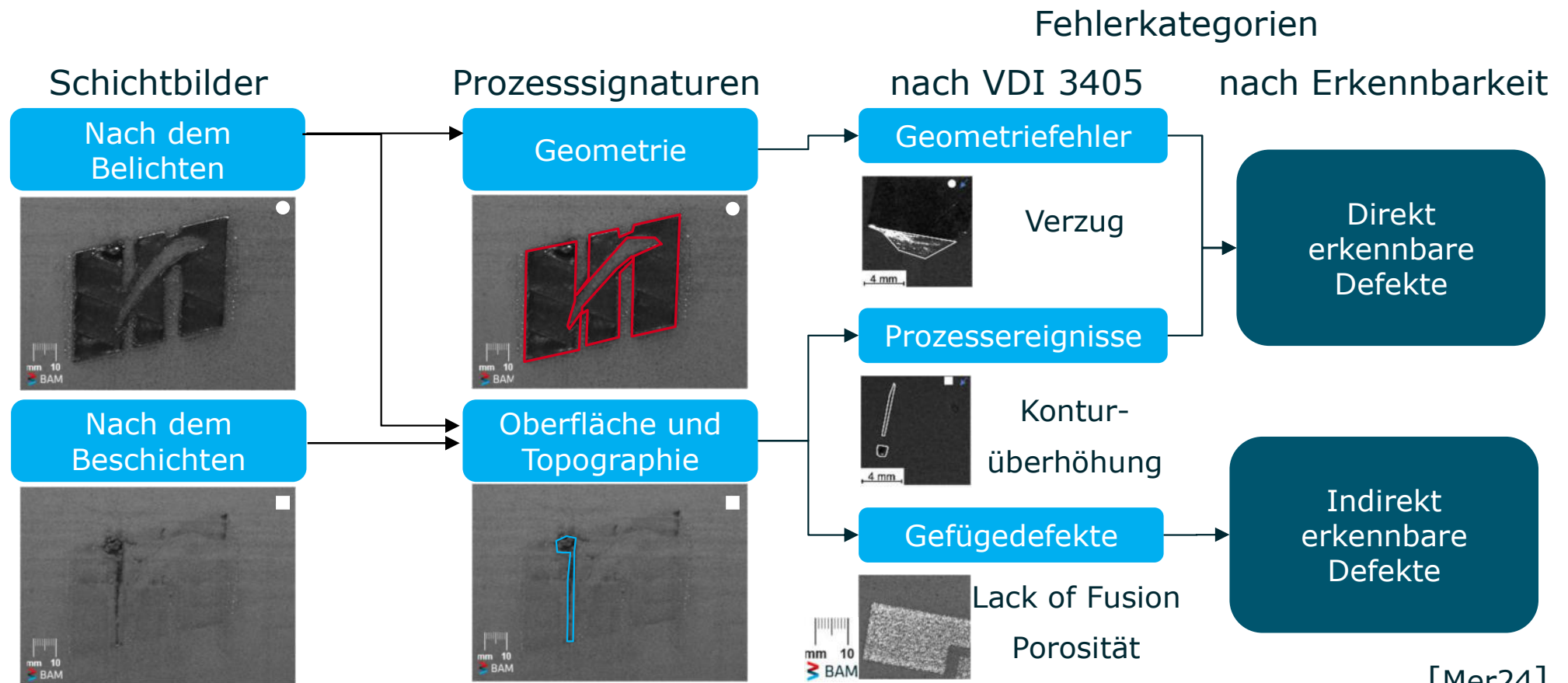
Apo-Componon 4.5/90

Kipp-Schiebe Adapter



Visuellen In-Situ Prozessüberwachung

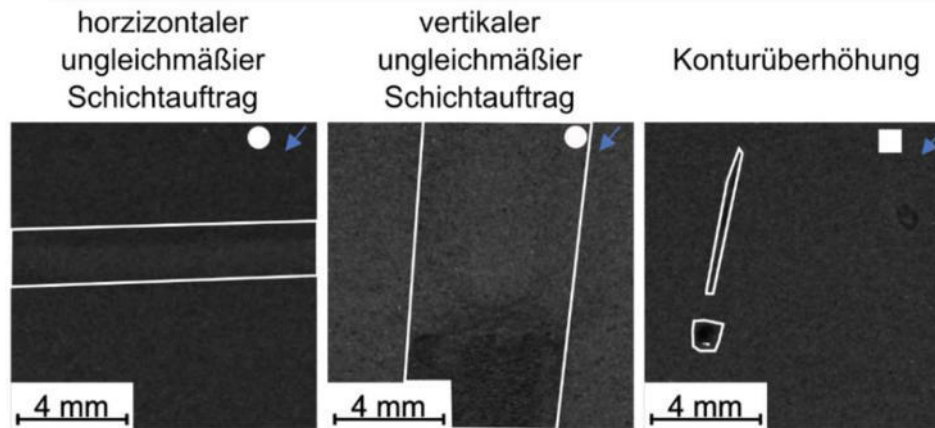
Unterscheidung von Fehlerkategorien



Visuellen In-Situ Prozessüberwachung

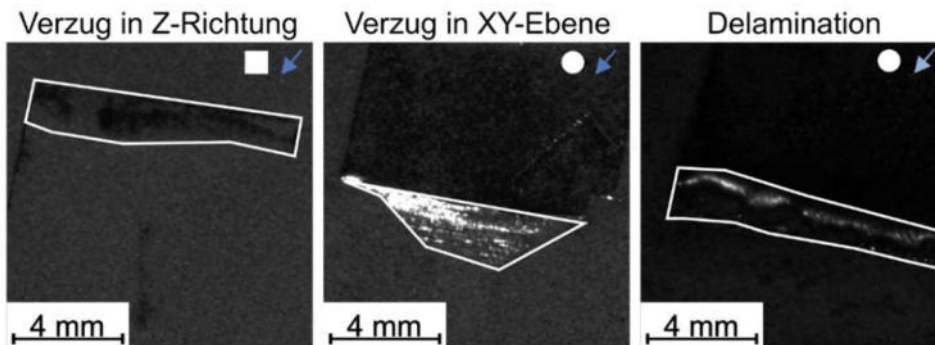
Direkt erkennbare Defekte – makroskopisch

Prozessereignisse



Systematisch provoziert durch Variation der Geometrie

Geometriedefekte

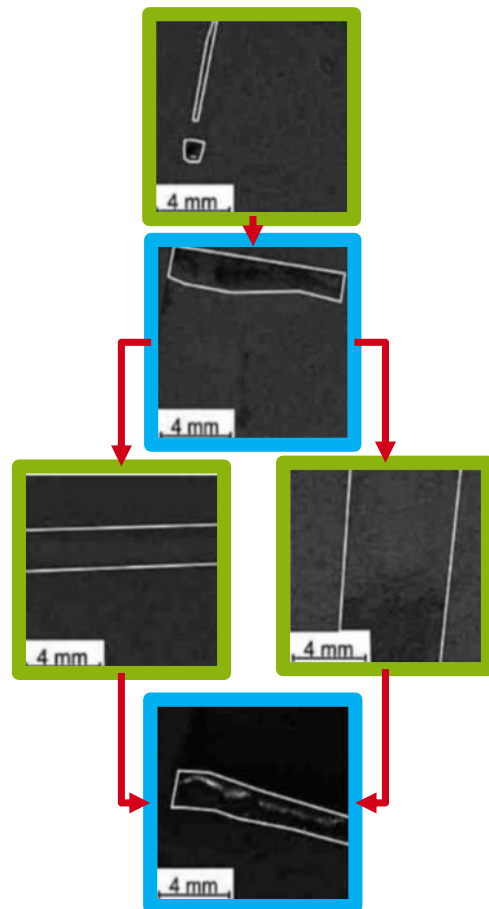


- Nach dem Belichten mit Laser
- Nach dem Beschichten
- ↙ Auflichtbeleuchtung A1 t_{DL} : 600 ms
- ↘ Auflichtbeleuchtung A1 t_{DL} : 300 ms

[Sch23]

Visuellen In-Situ Prozessüberwachung

Direkt erkennbare Defekte – makroskopisch



Defektkaskade

Konturüberhöhung



Verzug in Z-Richtung

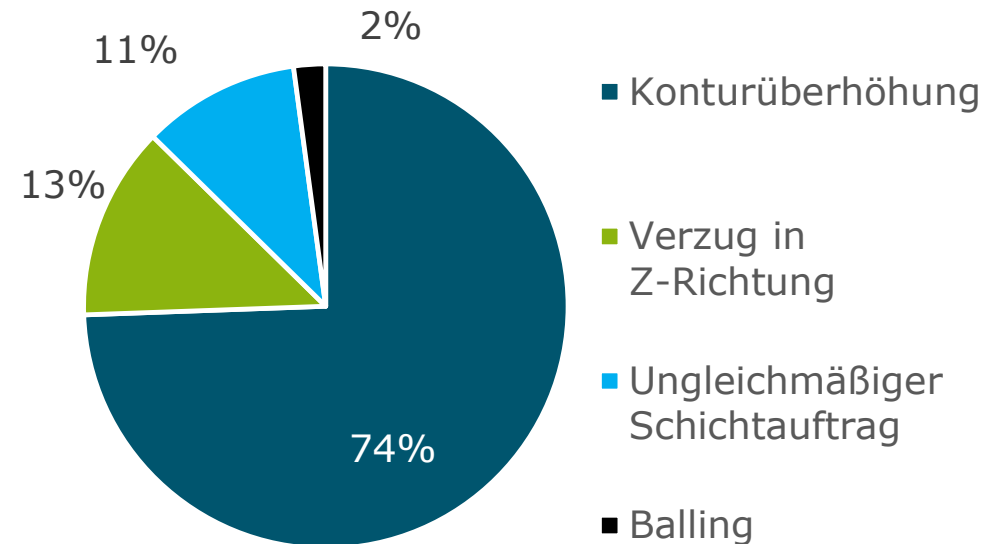


Kontakt mit dem Beschichter
(ungleichmäßiger Schichtauftrag)



Schichtablösung

Verteilung von Trainingsdaten

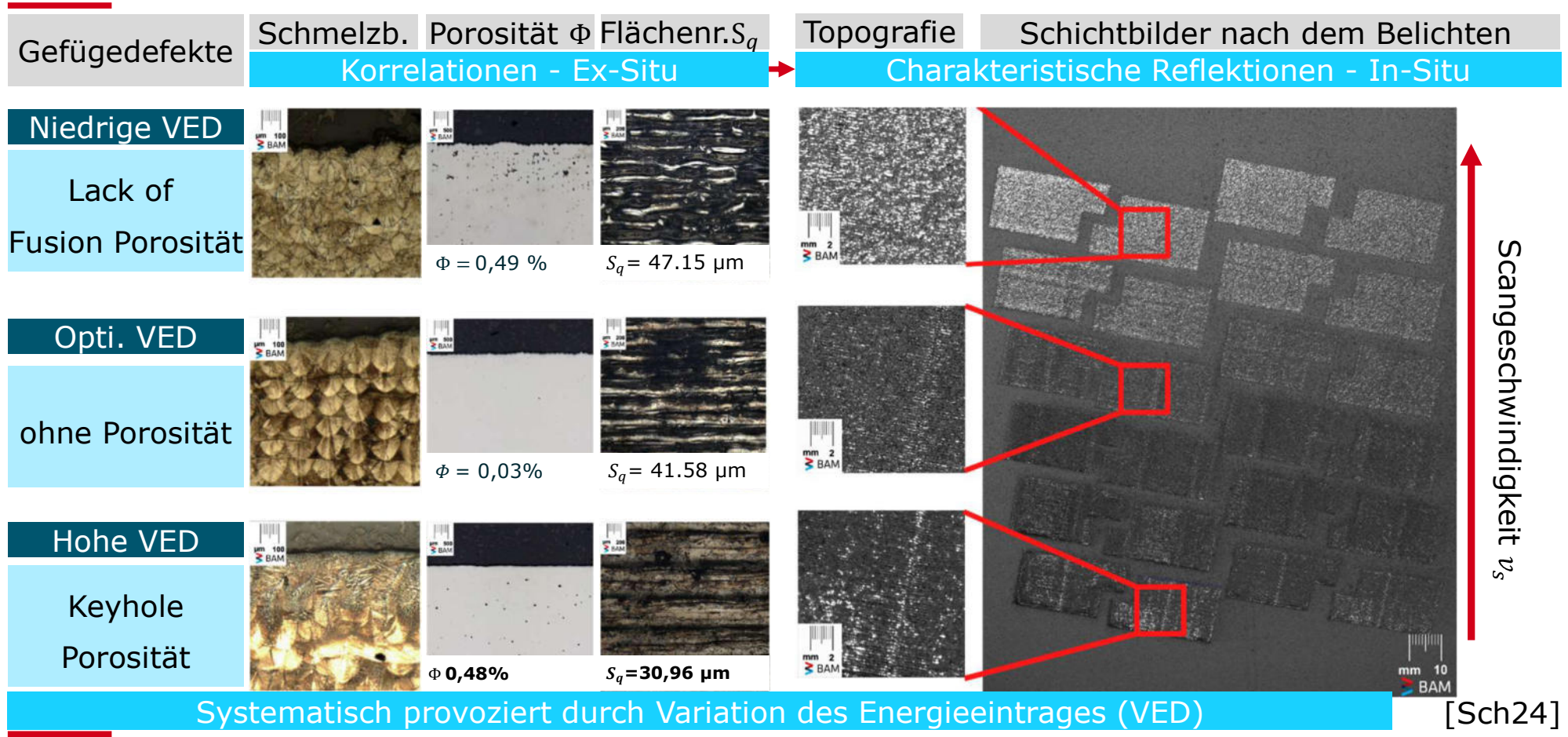


Unausgeglichene Datensätze erschweren Auswertung mittels CNNs

[Mer24]

Visuellen In-Situ Prozessüberwachung

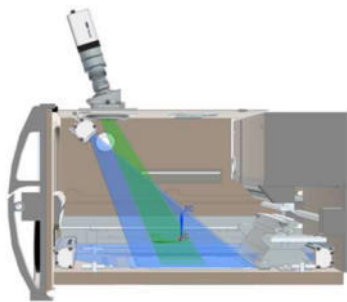
Indirekt erkennbare Defekte – mikroskopisch



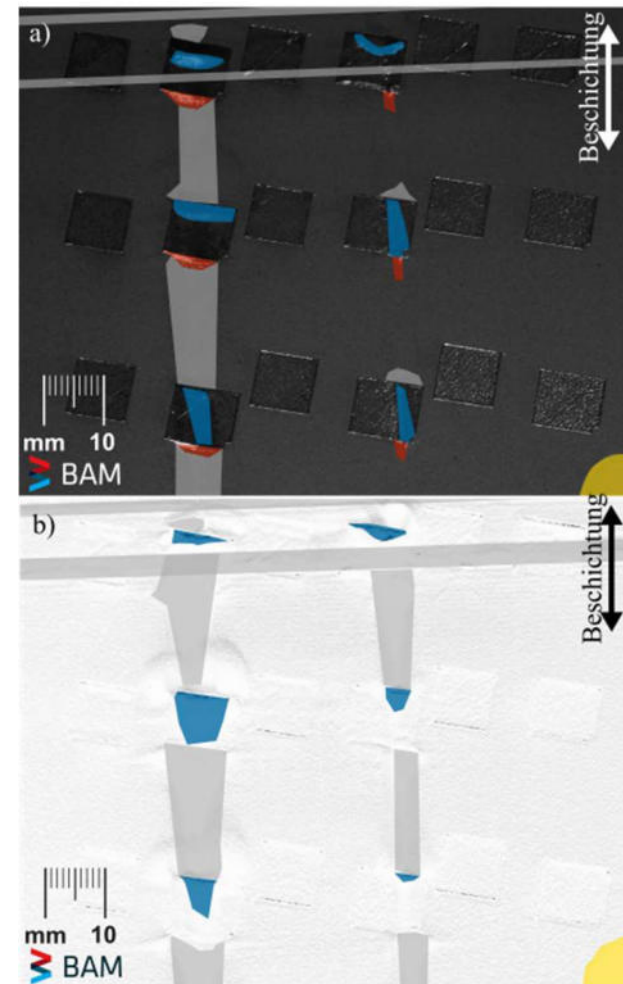
Visuellen In-Situ Prozessüberwachung

Einfluss der Beleuchtungssituation

- Indirekt erkennbare Defekten nur unter Aufsichtbeleuchtung nach dem Belichten erkennbar
- Flacher Beleuchtungswinkel der Dunkelfeldbeleuchtung wirft Schatten an Erhöhungen im Pulverbett
- Wechselnde Schatten erschweren Bildauswertung



Keine zusätzliche Information in Bilder mit Dunkelfeldbeleuchtung



[Mer24]

Indirekt erkennbare Defekte

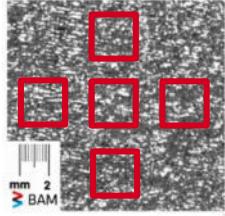
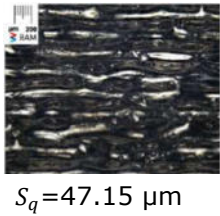
Quantifizierung der visuellen Oberflächenrauheit

Flächenrauh.
 S_q

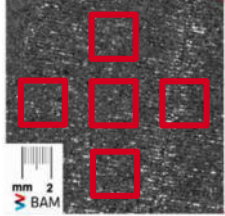
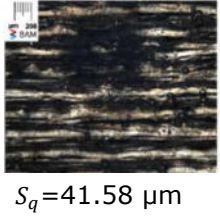
Visuelle
Oberfläche

Quantifizierung der visuellen Oberfläche
Mittels des Kontrasts der Grauwertmatrix

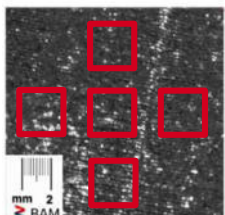
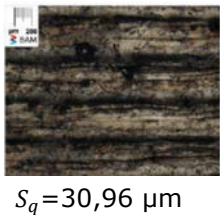
Niedrige
VED



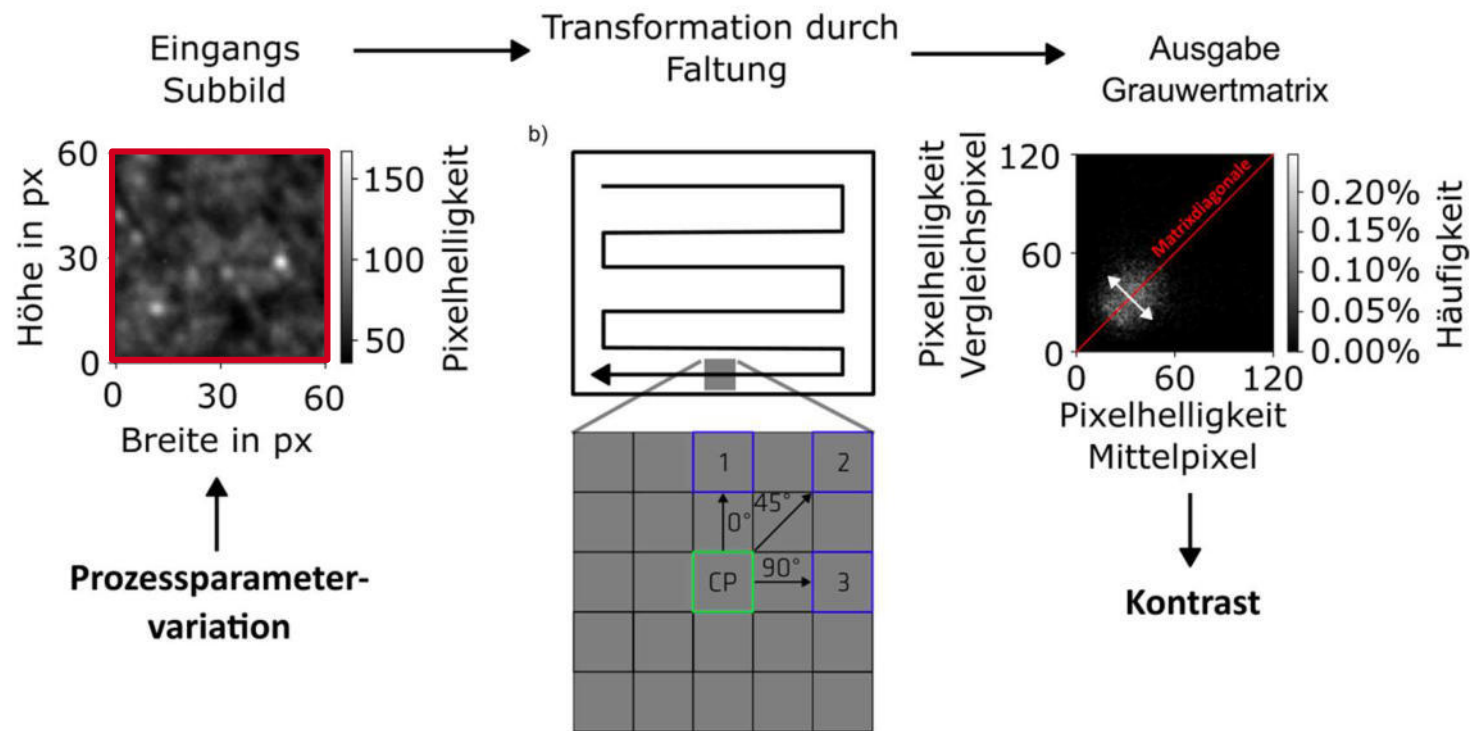
Optimale
VED



Hohe
VED



Subbilder



[Sch24]

Indirekt erkennbare Defekte

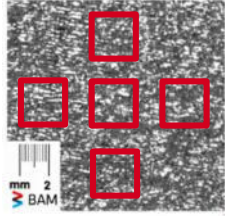
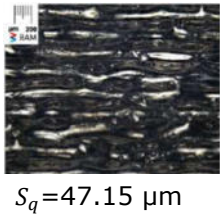
Quantifizierung der visuellen Oberflächenrauheit

Flächenrauheit S_q

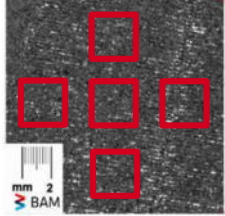
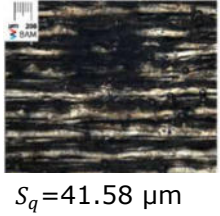
Visuelle Oberfläche

Auswertung Flächenrauheit und Kontrast der Grauwertmatrix

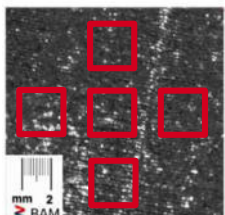
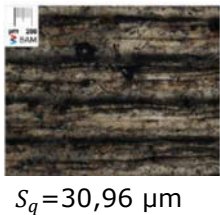
Niedrige VED



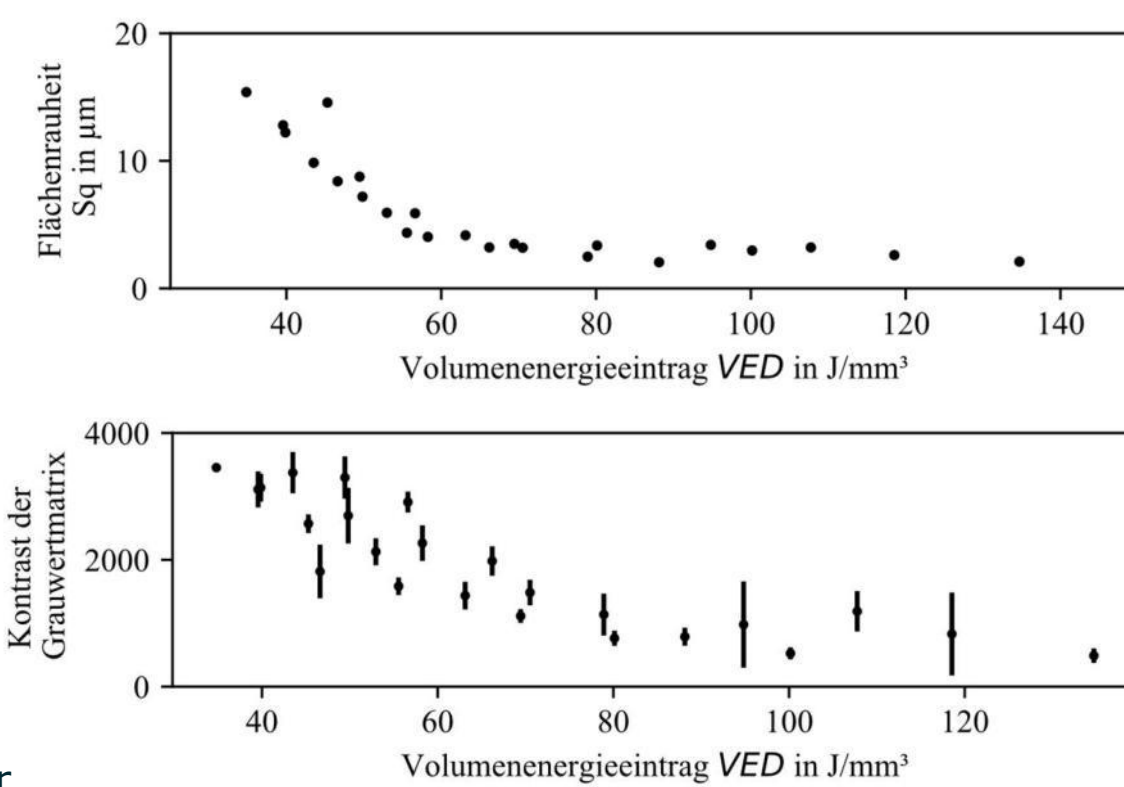
Optimale VED



Hohe VED



Subbilder



Pearson Korrelation von 0,82

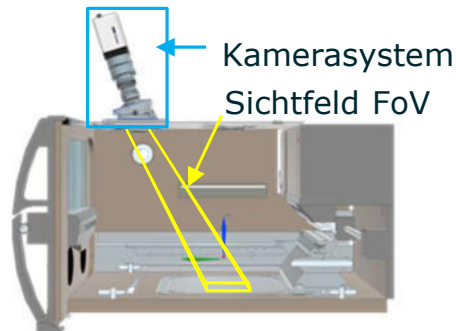
$$VED = \frac{P_L}{v_s * h_s * l_z}$$

[Sch24]

Ausblick – direkt erkennbare Defekte

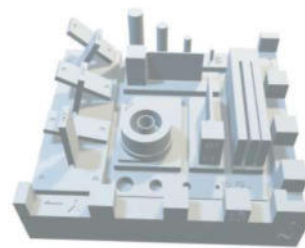
Anwendungstransfer zur Erhebung von vielfältigeren Daten

Transfer und Optimierung



Schematische Seitenansicht SLM 280 HL mit aktuellem In-Situ System

Datenerhebung



Schichtbilder von Referenzbaujobs

Forschungsschwerpunkte

- Datenmanagement und -reduktion
- Semi-Supervised Labeling
- Defekterkennung mittels faltender neuronale Netzwerke(CNNs)
- Reduktion der Falsch-Positiv-Rate

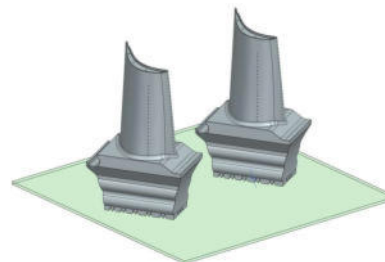
**Steigerung
Wirtschaftlichkeit**



Pot. Partner



Industrielle PBF-LB/M Maschinen



Schichtbilder von Realen Anwendungen

Ausblick – Indirekt erkennbare Defekte

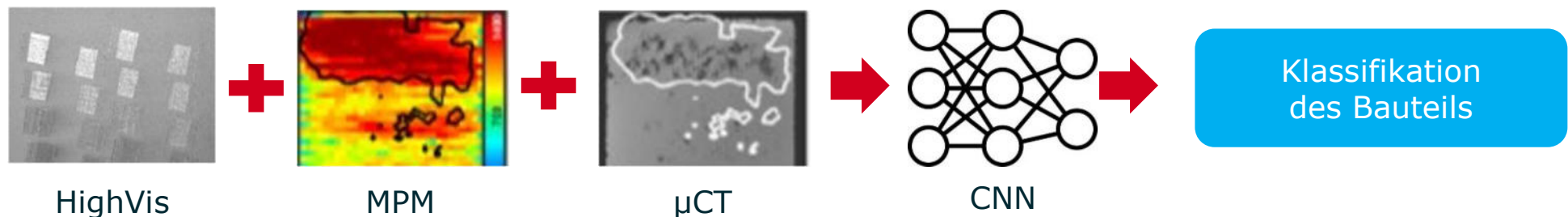
Fazit und Ansätze für die Zukunft

Fazit:

- Hochaufgelöste visuelle In-Situ Prozessüberwachung (HighVis) ist sensitiv auf Flächenrauheit
- Auftreten von Flächenrauheit korreliert mit Ausbildung von Lack of Fusion Porosität
- Proben mit geringer Porosität und Keyhole Porosität zeigen geringe Unterschiede in Flächenrauheit

Potentielle weitere Untersuchungen:

- Multimodale Auswertung von Melt-Pool-Monitoring (MPM) und visueller In-Situ Prozessüberwachung
- Trainieren von Multimodalen CNNs inkl. μ CT-Daten als Ground Truth



Quellennachweise

Kurzbeleg	Quelle
[Sch23]	Schmidt, Jonathan, In-Situ Prozessüberwachung für PBF-LB/M - Systematische Erstellung von Trainingsdaten für die Defekterkennung mittels maschinellen Lernens, 2023, TU-Berlin, Masterarbeit
[Mer24]	Merz, Benjamin, et al. "Impact of Illumination Technique on the Detectability of Irregularities in High-Resolution Images of Visual In-Situ Process Monitoring in Laser Powder Bed Fusion." <i>Procedia CIRP</i> , vol. 124, 2024, pp. 98-103. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.079 .
[Sch24]	Schmidt, Jonathan, et al. "Visual Surface Structure Analysis of High-Resolution Images from Visual In-Situ Process Monitoring in Laser Powder Bed Fusion." 77th IIW Annual Assembly and International Conference, 6-12 July 2024, Rhodos, Greece. Presentation.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt

Bundesanstalt für Materialforschung – und prüfung (BAM)

M. Sc. Jonathan Schmidt

Fachbereich 9.6 Additive Fertigung metallischer Komponenten

jonathan.schmidt@bam.de

www.bam.de

Session 8: Qualitätssicherung im 3D-Druck 2

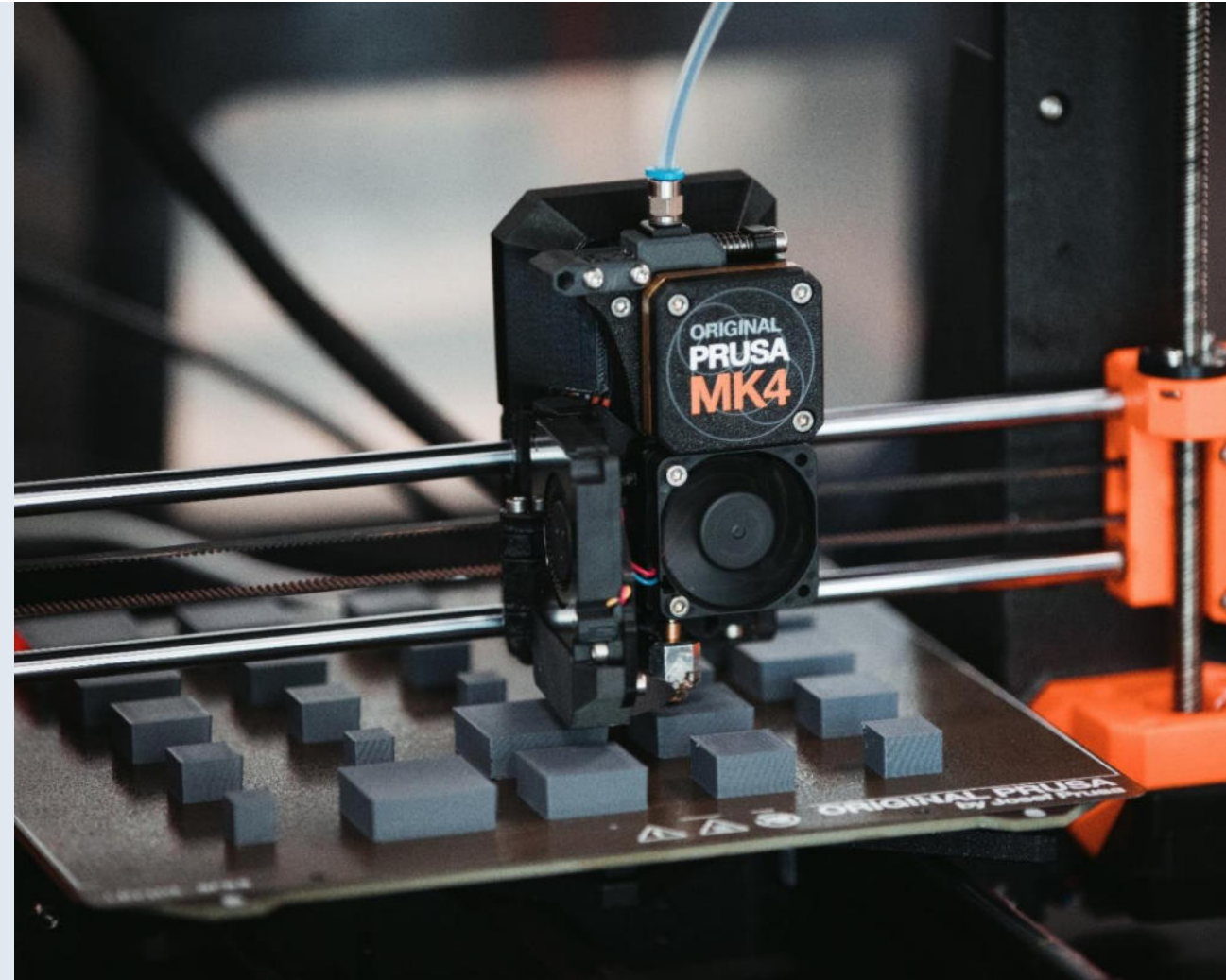
Material- und Prozessüberwachung im FFF- und FGF-Verfahren

Johannes Zawatzki,
Sonotec GmbH

AddiQ – Qualitätssicherung in der
Additiven Fertigung

VP4: Material- und Prozess- überwachung im FFF- und FGF-Verfahren

Johannes Zawatzki, SONOTEC GmbH



AddiQ Verbundprojekt 4

- Verbundprojektleitung:
GMBU e.V. (Dr. Oliver Neudert)
- 5 Teilprojekte
- Material- und Prozessüberwachung
im FFF- und FGF-Verfahren
- Entwicklung einer steuerbaren 3D-Druck-
Prozessumgebung mit Materiallagersystem

GMBU



Gesellschaft zur Förderung
von Medizin-, Bio- und
Umweltechnologien e.V.



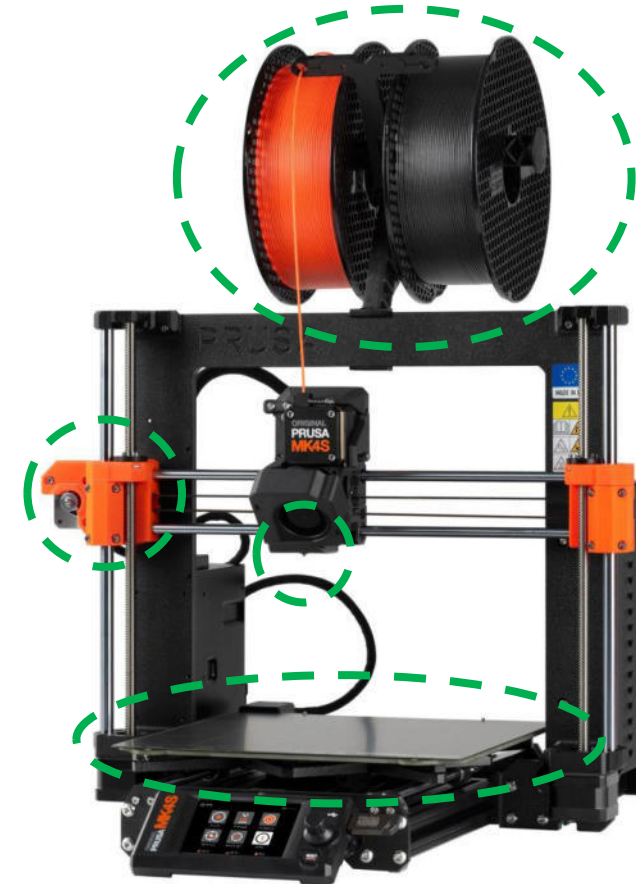
Material- und Prozessüberwachung

Drucker

- Prusa MK4
- Offene Struktur
- State-of-the-Art
- Verbreitung

Fehlerquellen

- Material
 - Filament
 - Granulat
- Prozess
 - Antriebe & Lagerung
 - Hotend
 - Druckbett
 - Belüftung



<https://www.prusa3d.com/content/images/product/original/86e363eb-5877-4a28-b15b-e0d1b280bfae.jpg>

Materialvarianten

Material	PLA	PETG	PETG ESD	TPU	ABS	ASA
Variante	Green-Tec Pro	Extrudr	Fiberlogy	PolyFlex TPU95	proFlame Retardant	Apollox
Eigenschaft	Biologisch abbaubar/ ölfrei	Transparent	ESD-sicher	Flexibel	UL 95 V-0	UV- witterungs- beständig

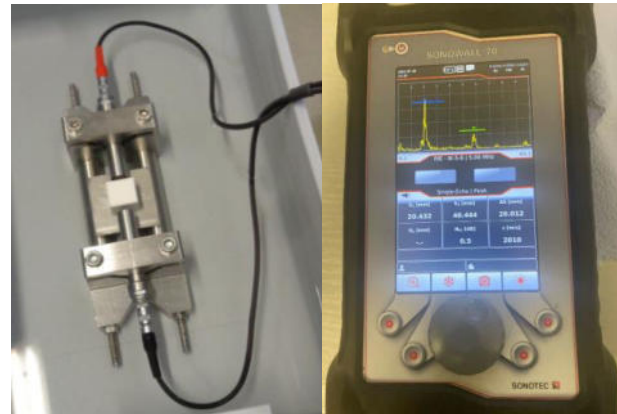
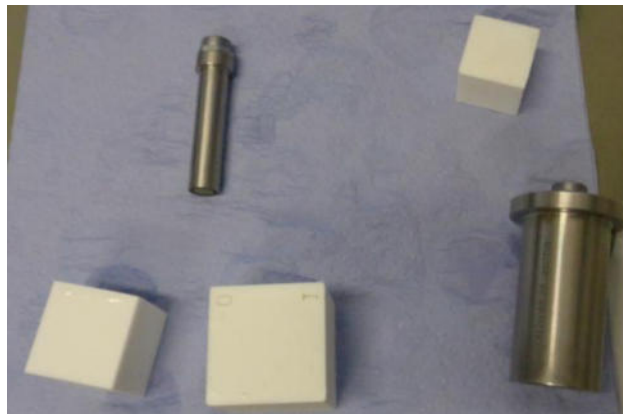
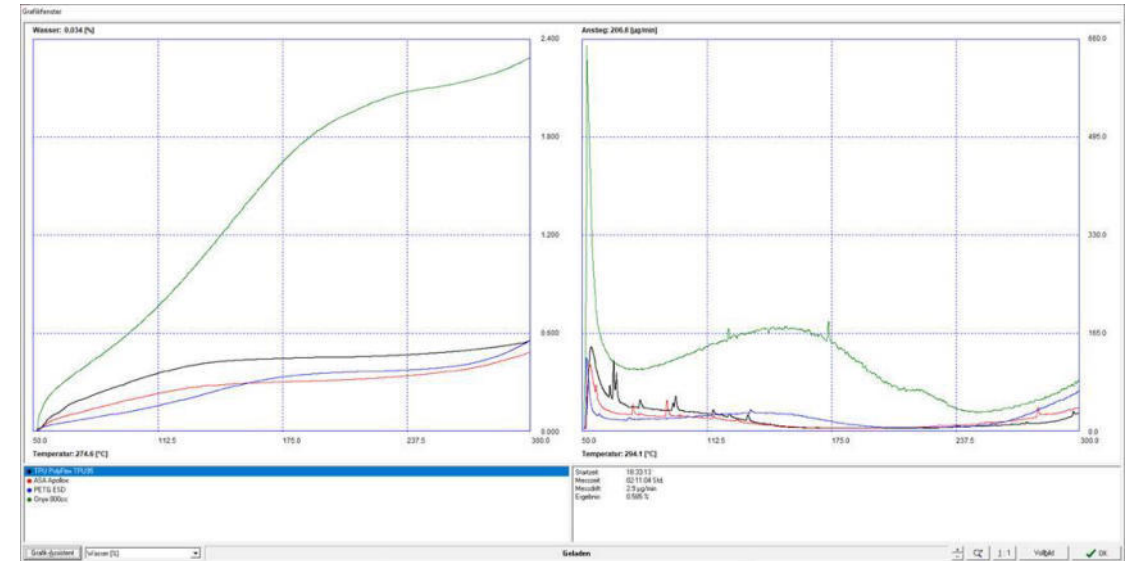
Untersuchungen: Filament

Wassergehaltsanalysen

- Mittels Karl-Fischer-Titration
- Gaschromatographie

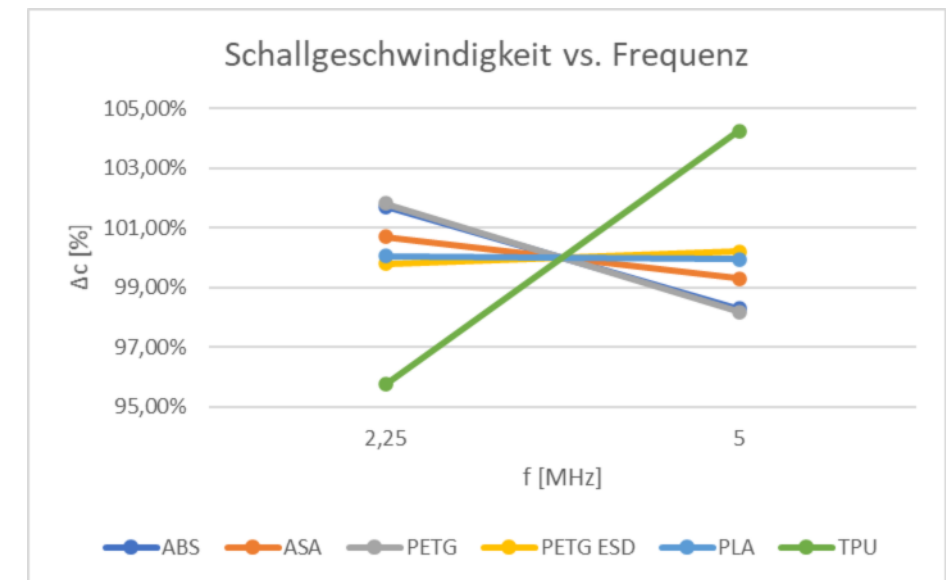
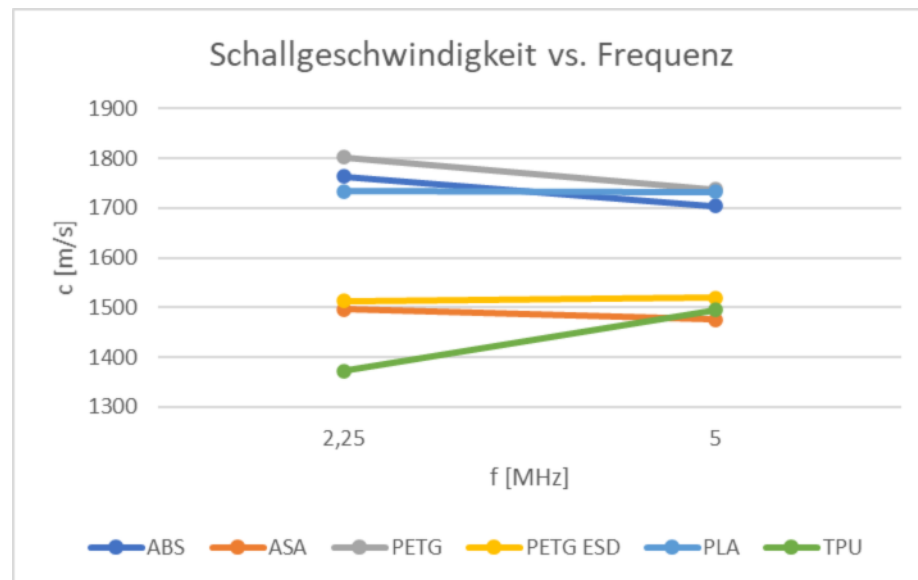
Ultraschallanalysen

- Mittels Impuls-Echo vs. Durchschallung
- Schallgeschwindigkeit
- Impedanz



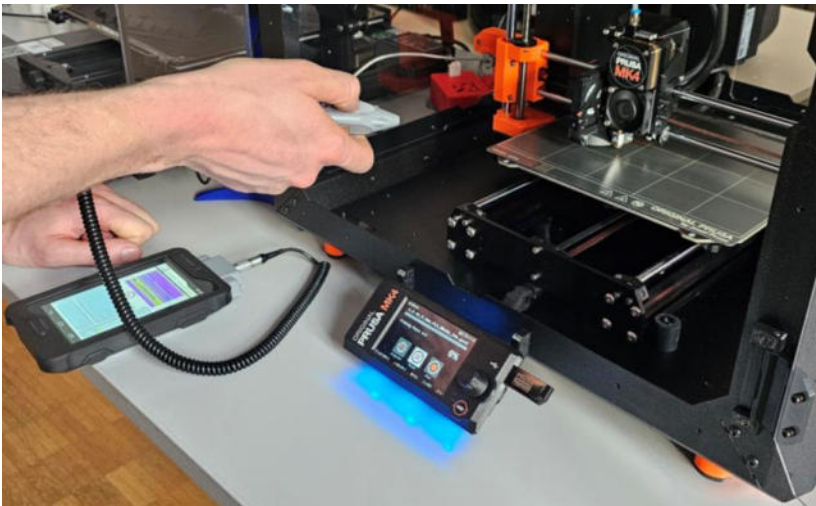
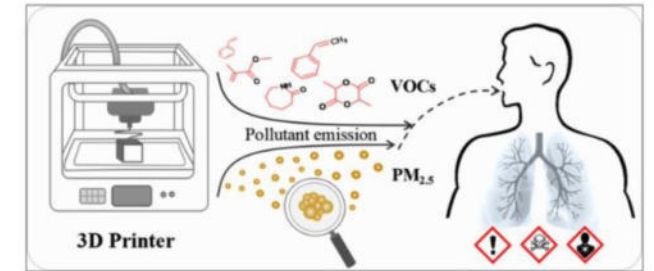
Schallgeschwindigkeit (Z-Achse)

Material	PLA	PETG	PETG ESD	TPU	ABS	ASA
Größe [mm]	30	30	30	10	30	30
c [m/s] @ 2,25 MHz	1734	1802	1513	1373	1763	1496
c [m/s] @ 5 MHz	1732	1738	1519	1495	1704	1475



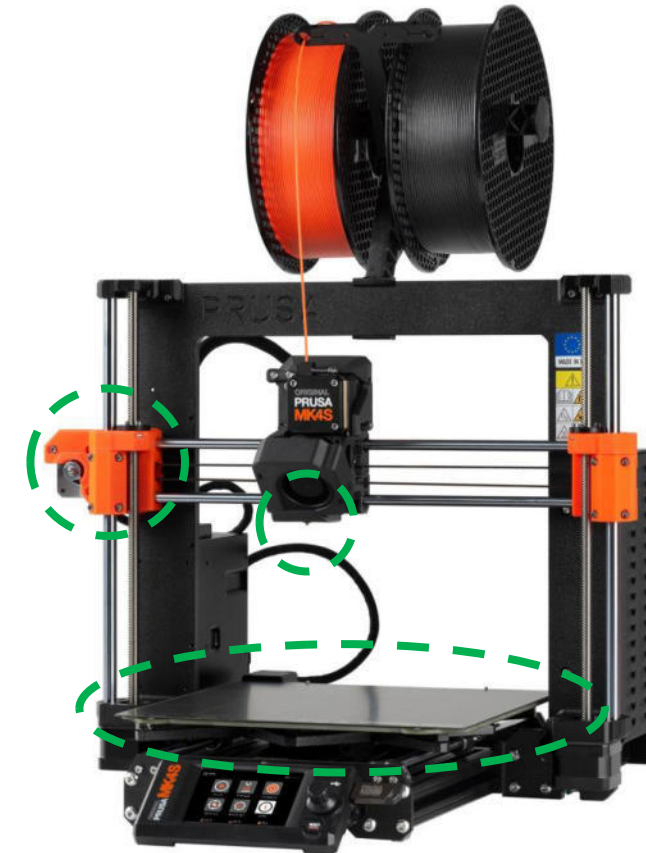
Untersuchungen: Druckprozess FFF

- Emissionen mittels VOC-Sensor
- Belüftung des Druckprozesses
- Videoüberwachung
- Detektion von Druckfehlern mittels Luft-US & Körper-US



Prozessfehler

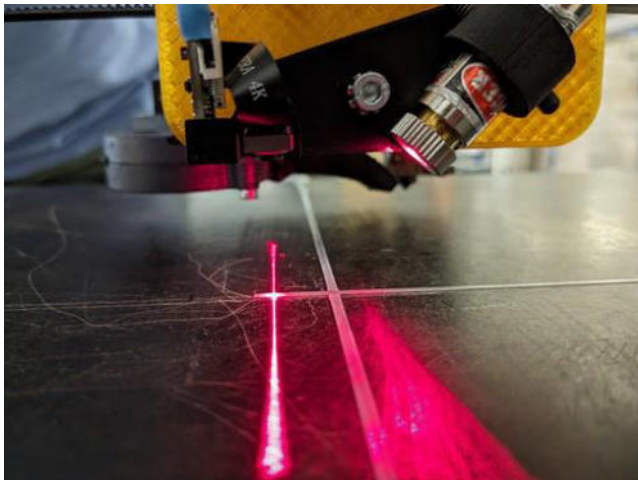
Luft-US	Körper-US	
Hotend	Druckbett	Antriebe/ Lagerung
Verstopfte Düse	Warping	Verschleiß
Wassergehalt	Layercracking	
Oozing/Stringing	Verzug der Schichten	



<https://www.prusa3d.com/content/images/product/original/86e363eb-5877-4a28-b15b-e0d1b280bfae.jpg>

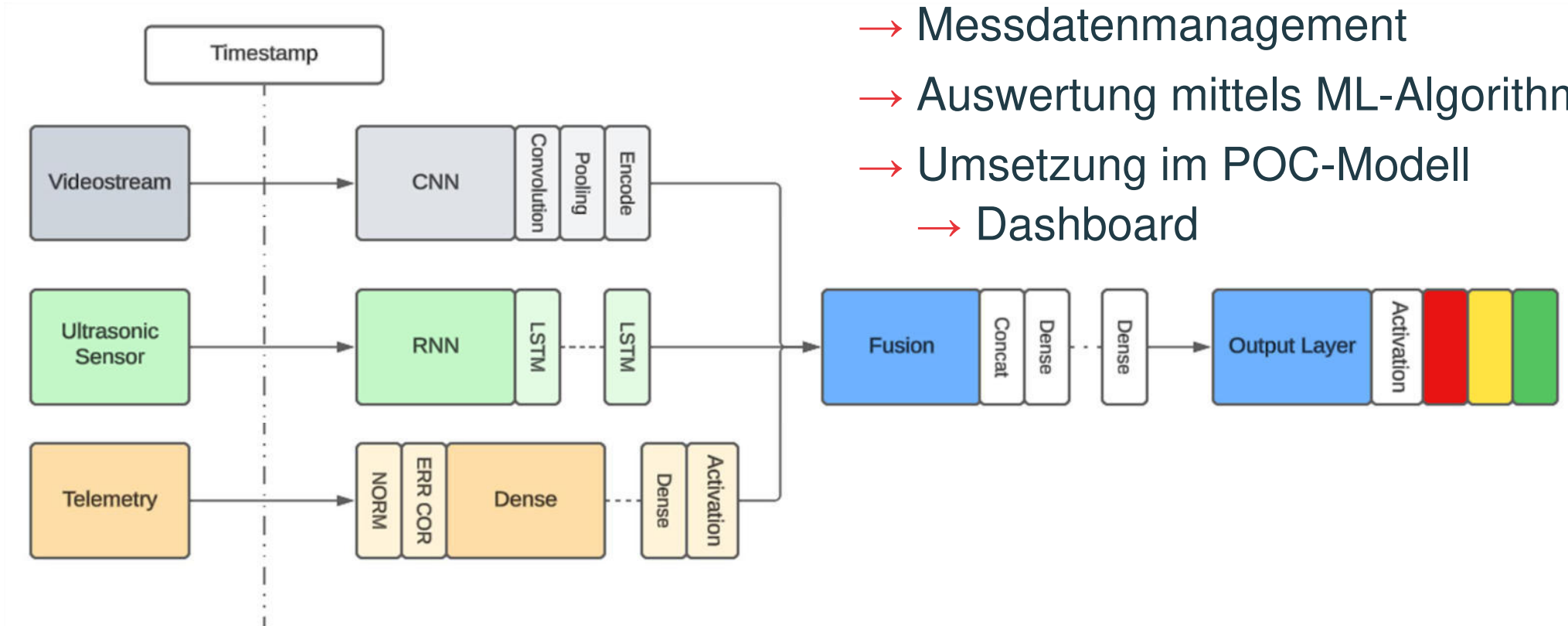
Untersuchungen: Druckprozess FGF

- Wirtschaftliches, kleinskaliges Pelletdruckverfahren
- Mit verbesserter Präzision und Zuverlässigkeit
- Innovative Prozessüberwachung und -regelung
 - Wärmebildverfahren
 - Extrusionsratenmessung
 - Bewegungs- & Lastsensorik



Datenauswertung zur Prozessanalyse

- Entwicklung einer steuerbaren Prozessumgebung
- Messdatenmanagement
- Auswertung mittels ML-Algorithmen
- Umsetzung im POC-Modell
- Dashboard



Ausblick

- Steuerbare 3D-Druckprozessumgebung
 - Mit verschiedenster Sensorik
 - Optisch
 - Akustisch
 - Chemisch
 - Zur automatisierten Fehlererkennung
 - Als Kleinserie mit Materiallagersystem

- Bis Ende 2026

Ansprechpartner

→ Sie wollen weitere Informationen oder in Austausch treten?
Schreiben Sie uns gerne an.

Verbundprojektleitung:
Dr. Oliver Neudert, GMBU e.V.



Vortragender:
Johannes Zawatzki, SONOTEC GmbH



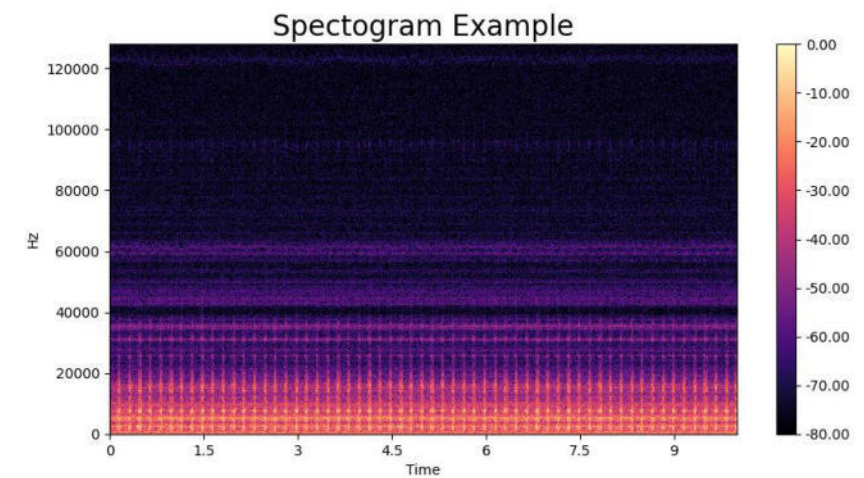
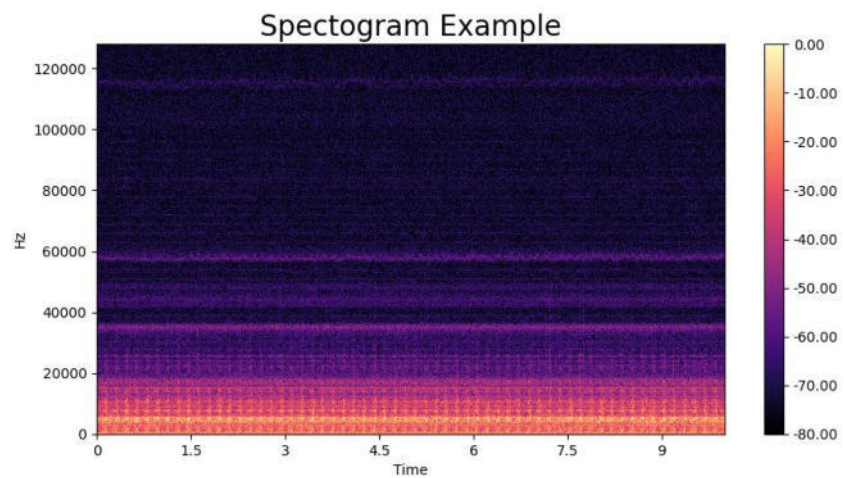
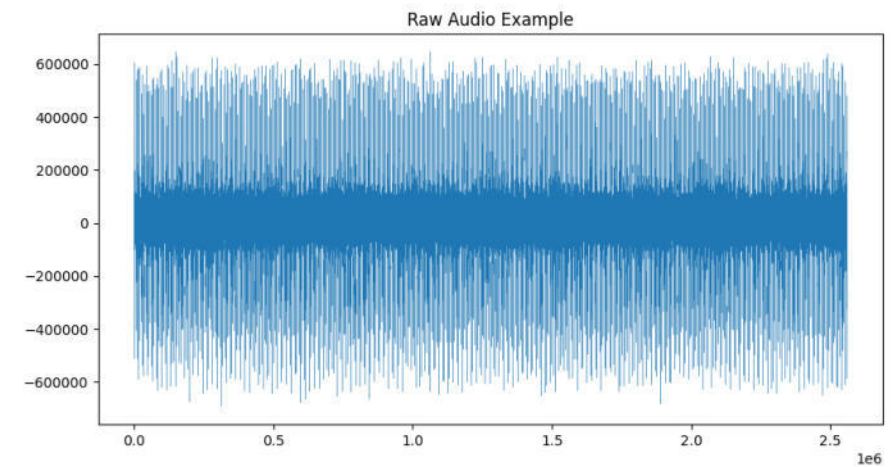
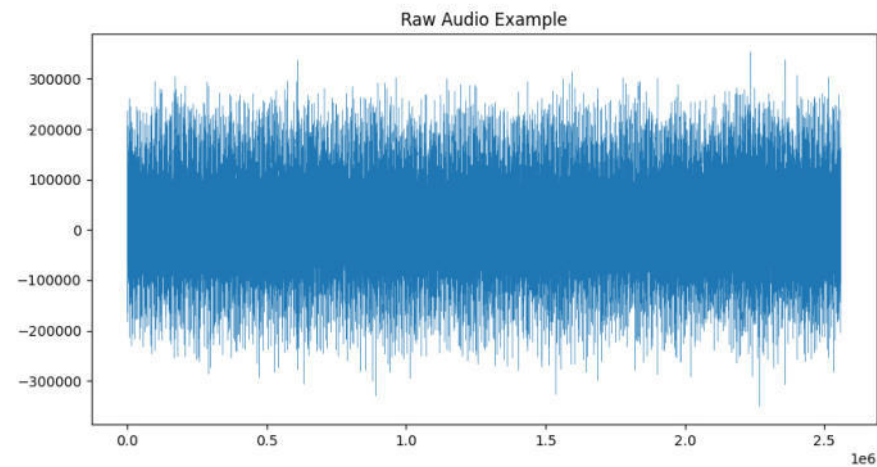
→ Johannes.zawatzki@sonotec.de



→ addiq@sonotec.de

→ www.addi-q.com

AP3: Spektrum Auswertung – Lagerprüfstand



Session 8: Qualitätssicherung im 3D-Druck 2

**Korrelationen zwischen den
(bruch)mechanischen Eigenschaften und der
Werkstoffmorphologie additiv gefertigter
Kunststoffe**

Ralf Lach,
Polymer Service GmbH Merseburg

Polymer Service GmbH Merseburg

An-Institut an der Hochschule Merseburg

Korrelationen zwischen den (bruch)mechanischen Eigenschaften und der Werkstoffmorphologie additiv gefertigter Kunststoffe

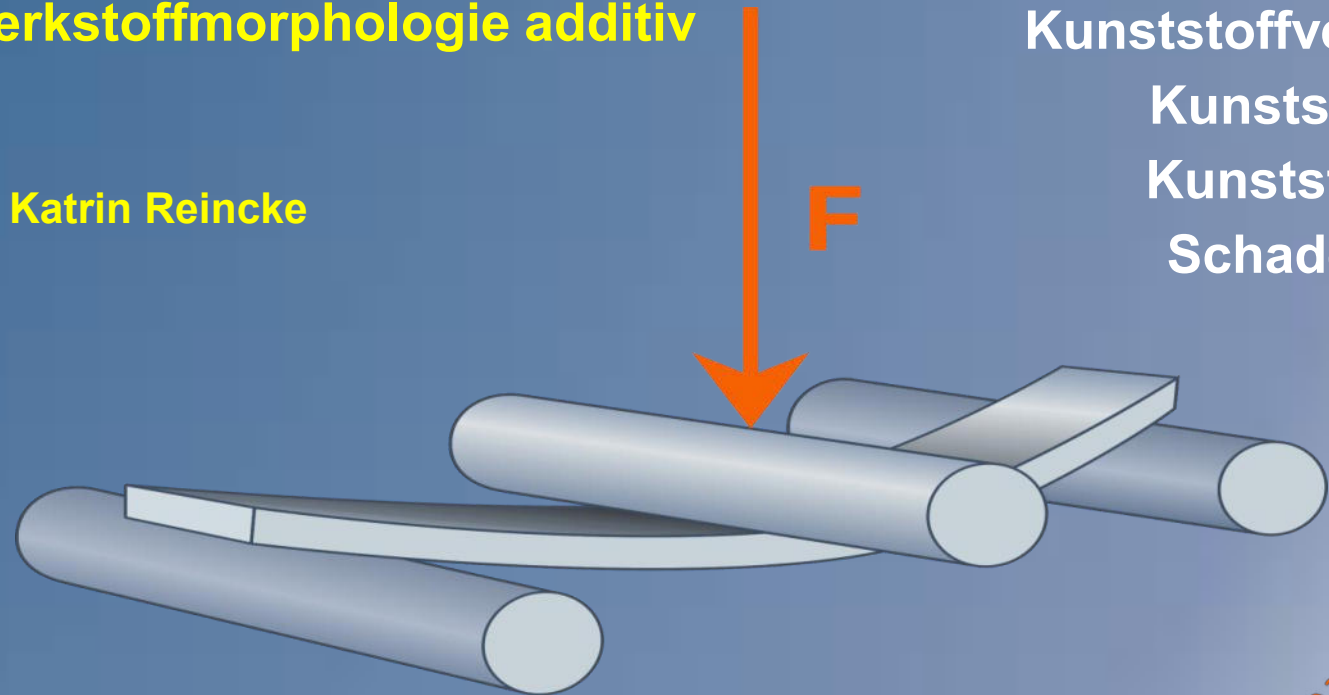
Ralf Lach, Wolfgang Grellmann, Katrin Reincke

Polymersynthese
Kunststoffverarbeitung
Kunststoffanalytik
Kunststoffprüfung
Schadensanalyse

Polymer Service GmbH Merseburg

Geusaer Straße 81f
06217 Merseburg

Telefon: +49 (0)3461 30889-55
Telefax: +49 (0)3461 30889-99
E-Mail: info@psm-merseburg.de
Homepage: www.psm-merseburg.de



Kunststoffe auf dem Prüfstand

PSM

Korrelationen zwischen den (bruch)mechanischen Eigenschaften und der Werkstoffmorphologie additiv gefertigter Kunststoffe

- **Motivation**
- **Fused Layer Deposition (3D-Druck) – Einfluss von Baurichtung der Prüfkörper und Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die bruchmechanischen Eigenschaften**
 - Einleitung
 - Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch
 - Quasistatischer Bruchmechanikversuch
- **Selektives Lasersintern – Einfluss der Dichte und Baurichtung der Prüfkörper auf die mechanischen Eigenschaften**
 - Einfluss der Baurichtung
 - Einfluss der Dichte
 - Verfahren zur Qualitätssicherung
- **Zusammenfassung**

Motivation

Rapid Technologien

- Rapid Prototyping
- Rapid Tooling
- **Rapid Manufacturing**

Rapid Manufacturing zur Kleinserienproduktion in der industriellen Anwendung: kostensparende und zeiteffiziente Alternative verglichen mit dem Spritzguss

Jedoch:

Nur sehr wenige Informationen zum Rissausbreitungsverhalten und zum mechanischen Langzeitverhalten von additiv gefertigten Kunststoffteilen verfügbar

Selektives Lasersintern

Selektives Laserschmelzen
Selektives Maskensintern

Fused Layer Deposition

Single/Multi Jet Modelling

Layer Laminated Manufacturing

Stereolithographie

Zwei-Photonen-Lithographie

Digital Light Processing

Korrelationen zwischen den (bruch)mechanischen Eigenschaften und der Werkstoffmorphologie additiv gefertigter Kunststoffe

- Motivation
- **Fused Layer Deposition (3D-Druck) – Einfluss von Baurichtung der Prüfkörper und Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die bruchmechanischen Eigenschaften**
 - Einleitung
 - Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch
 - Quasistatischer Bruchmechanikversuch
- Selektives Lasersintern – Einfluss der Dichte und Baurichtung der Prüfkörper auf die mechanischen Eigenschaften
 - Einfluss der Baurichtung
 - Einfluss der Dichte
 - Verfahren zur Qualitätssicherung
- Zusammenfassung

Parameteroptimierung für den 3D-Druck

Matrix für die Prüfkörperherstellung

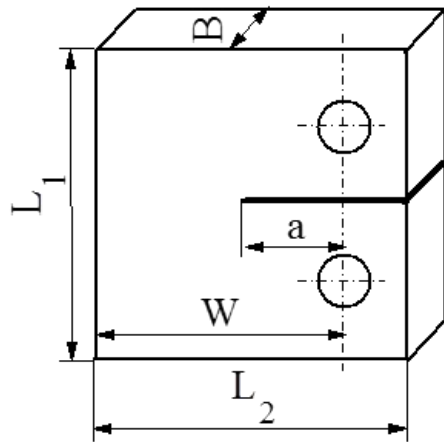
	Geschwindigkeit (mm/s)	Orientierung (Winkel)
Zugversuch	60	45°/45°
		0°/90°
	80	45°/45°
		0°/90°
IKBV	60	45°/45°
		0°/90°
	80	45°/45°
		0°/90°
Bruchmechanikversuch	60	45°/45°
		0°/90°
	80	45°/45°
		0°/90°

Schulterbereich der Vielzweckprüfkörper aus ABS in Abhängigkeit von der Parameteroptimierung



3D-gedruckte Bruchmechanikprüfkörper

Kleine Compact-Tension(CT)-Prüfkörper (mini-CT) aus ABS für den quasistatischen Bruchmechanikversuch (Mode I-Beanspruchung)

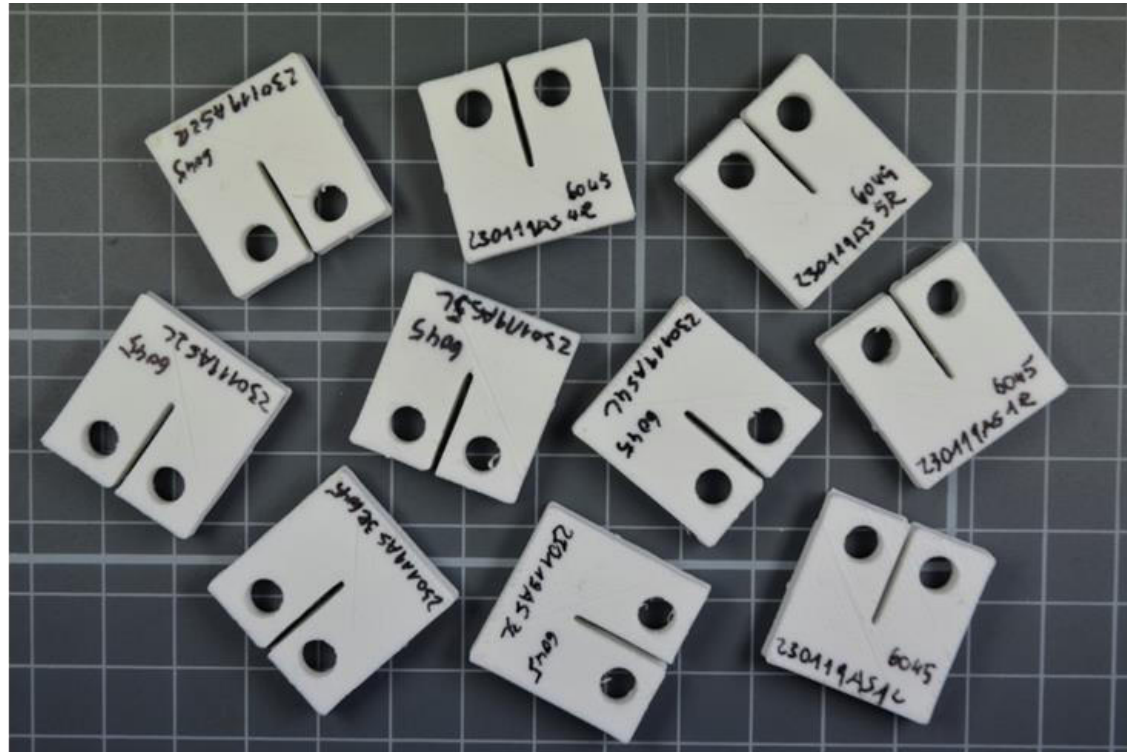


mini-CT-Prüfkörper

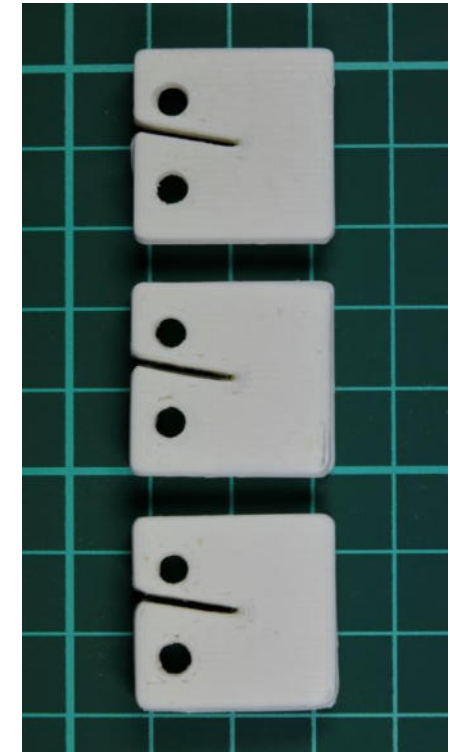
$L_1 = L_2 = 25 \text{ mm}$

$B = 4 \text{ mm}$

$a/W \sim 0,5$



Prüfkörper für Mixed Mode I/II-Beanspruchung

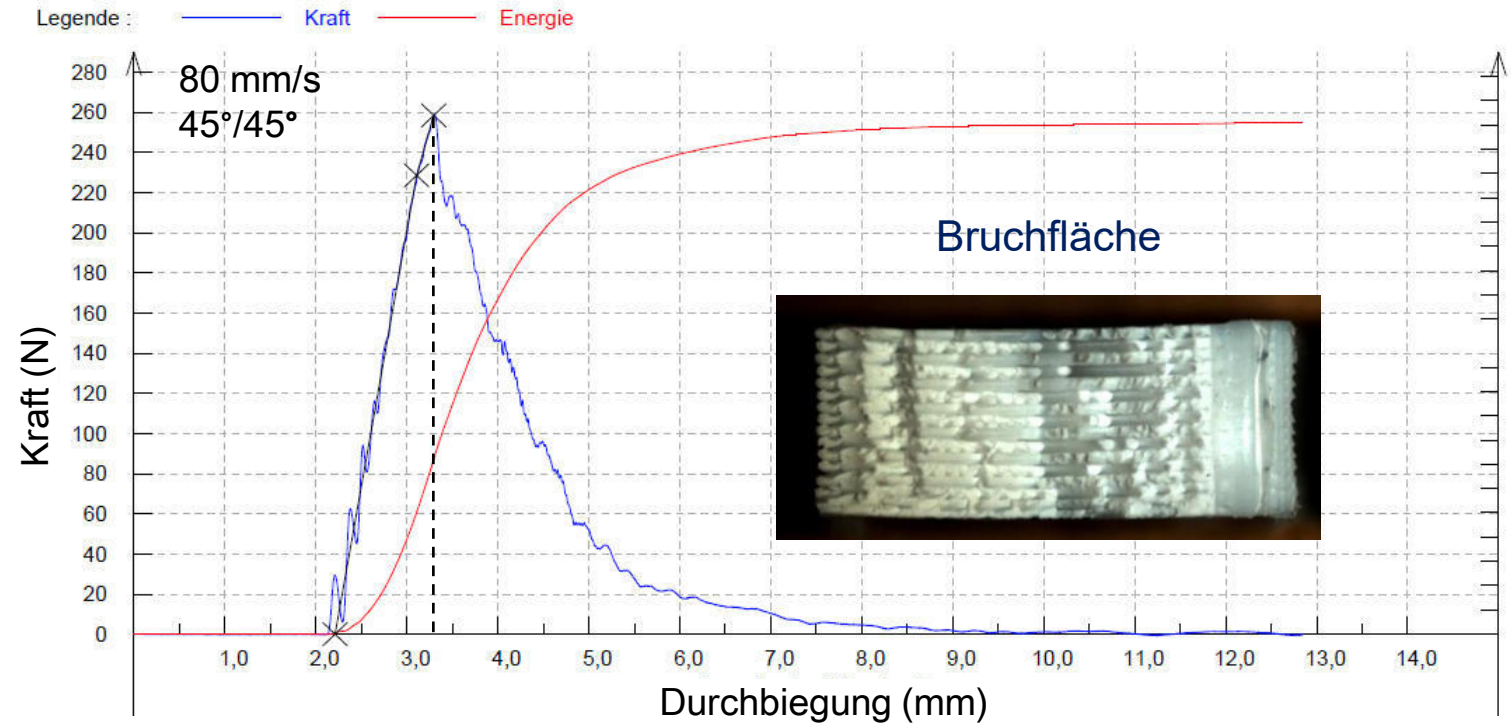


Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch (IKBV)

Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch (IKBV)



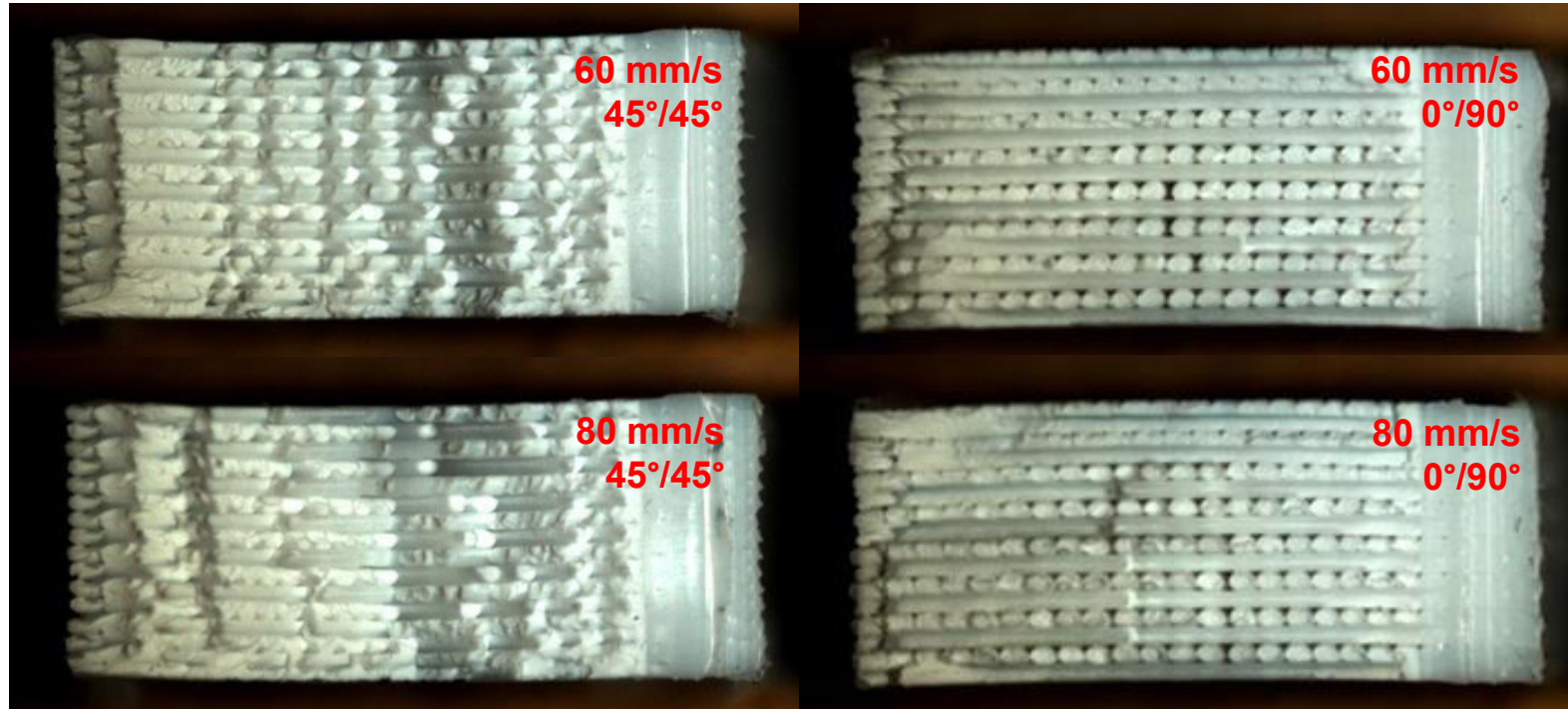
Kraft-Durchbiegungs-Diagramm für ABS



- Beanspruchungsgeschwindigkeit: 1 m/s bei Normklima; Ermittlung von Kraft-Durchbiegungs-Diagrammen, Lichtmikroskopische Bruchflächenanalyse
- Ermittlung der Widerstands gegen instabile Risseinleitung auf Basis der Fließbruchmechanik: (J-Wert und CTOD)

Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch (IKBV)

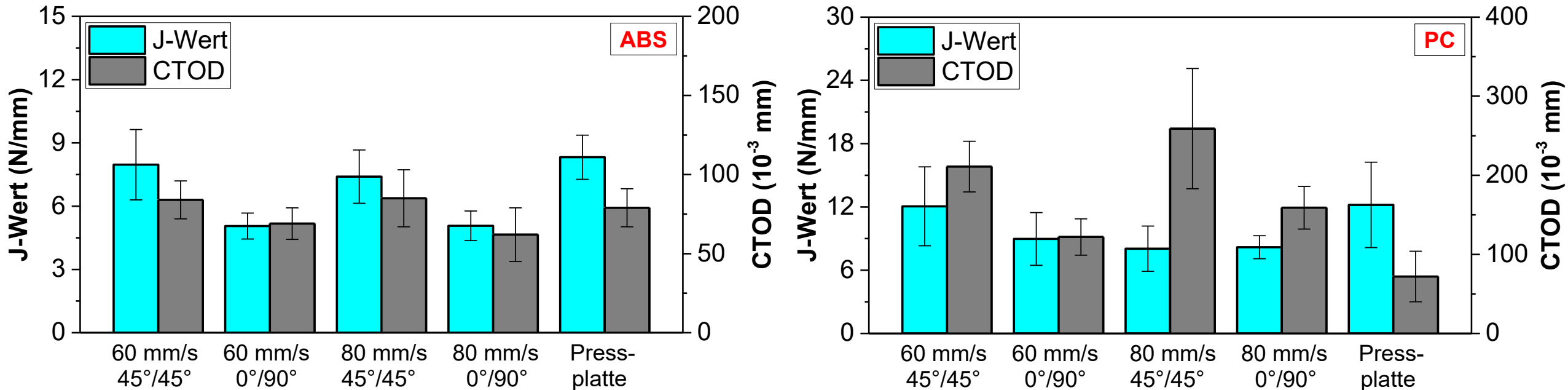
Lichtmikroskopische Bruchflächenaufnahmen von ABS in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Druckgeschwindigkeit und Orientierung), Bruchflächenmaße: $4 \times 10 \text{ mm}^2$



- Richtung 45°/45°: Elastisch-plastisches Deformationsverhalten mit überwiegend stabilem Risswachstum (hohe Energiedissipation) und ausgeprägter Weißfärbung der unebenen Bruchflächen → mikroskopisch: Mode II-Anteile
- Richtung 0°/90°: Elastisch-plastisches Deformationsverhalten mit stabilem/instabilem Risswachstum (Rissarrest und geringere Energiedissipation) und weniger ausgeprägter Weißfärbung der ebenen Bruchflächen

Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch (IKBV)

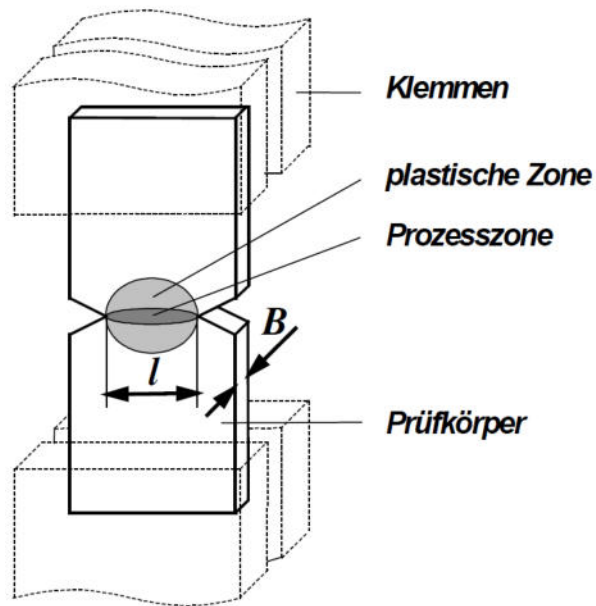
Bruchmechanische Kennwerte (J-Wert und CTOD) für ABS und PC als Widerstand gegen instabile Risseinleitung unter schlagartigen Versuchsbedingungen in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Druckgeschwindigkeit und Orientierung)



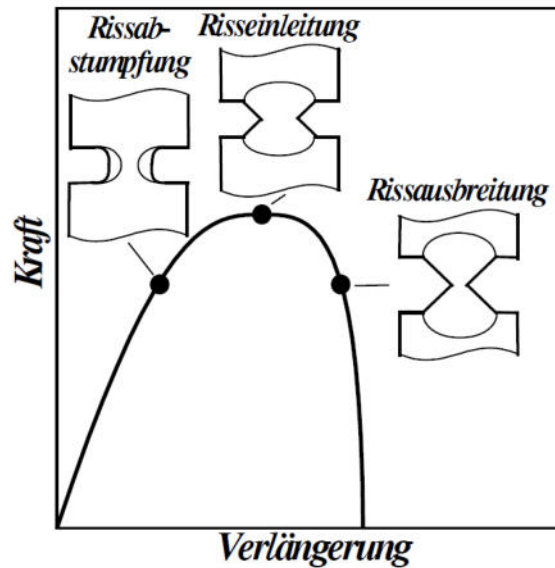
- Starker Einfluss der Orientierung: Bruchmechanische Kennwerte für Richtung 45°/45° größer als für Richtung 0°/90°; Kein (kaum) Einfluss der Druckgeschwindigkeit
- Bruchmechanische Kennwerte 3D-gedruckter ABS-Teile (45°/45°) entsprechen diejenigen für Pressplatten

Quasi-statischer Bruchmechanikversuch

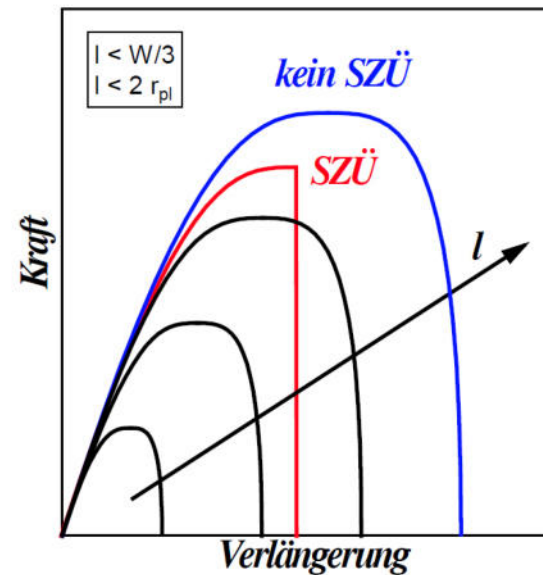
Methode der Wesentlichen Brucharbeit (essential work of fracture, EWF) – Versuchsdurchführung und Gültigkeit



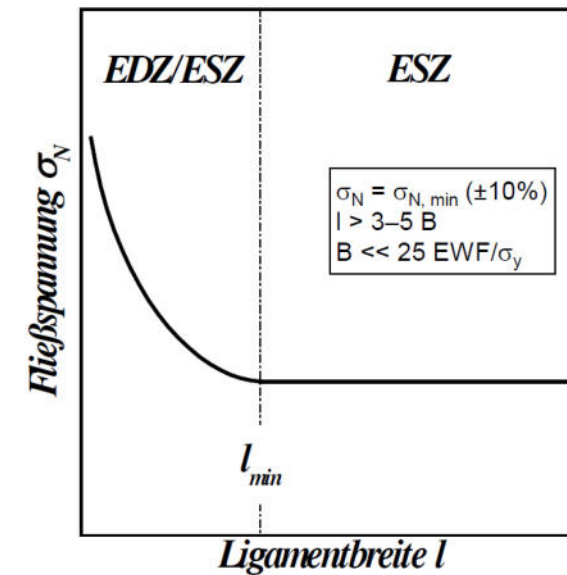
Risseinleitung nach Durchplastifizierung des Ligaments



Selbstähnlichkeit der Kraft-Verschiebungs-Diagramme



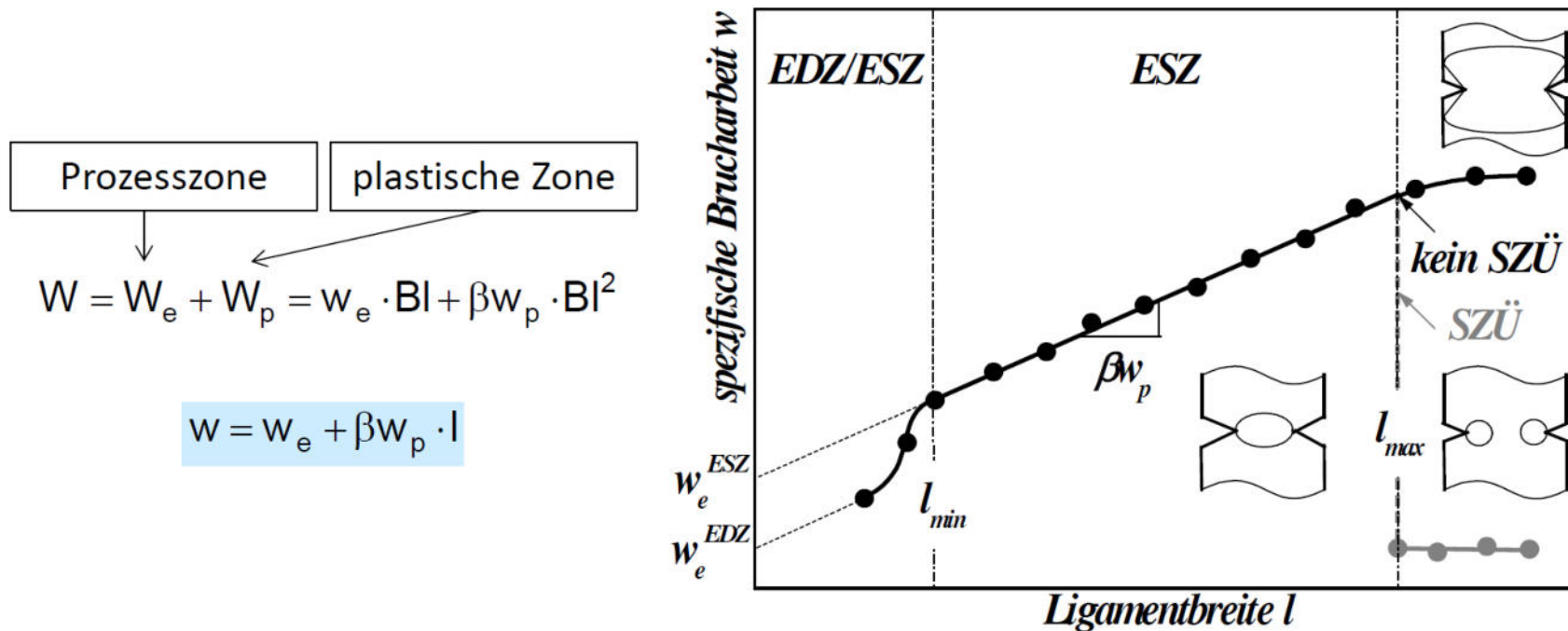
Ebener Spannungszustand (ESZ)



- Kraft-Verlängerungs-Diagramme an 3D-gedruckten, doppelseitig gekerbten Zugprüfkörpern (double-edge notched tensile, DENT) aus ABS im Gültigkeitsbereich der EWF-Methode

Quasi-statischer Bruchmechanikversuch

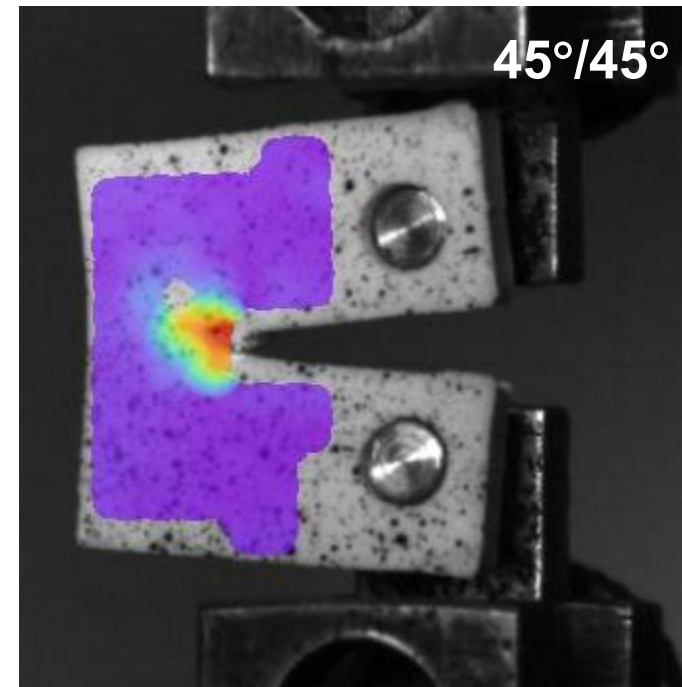
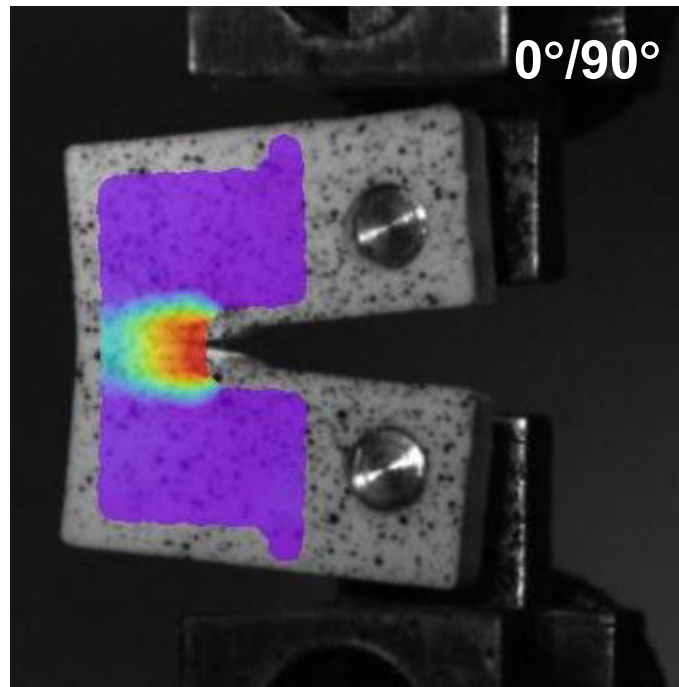
Methode der Wesentlichen Brucharbeit (essential work of fracture, EWF) – Auswertung und bruchmechanische Kennwerte



- EWF-Methode für ABS anwendbar, jedoch für PC nur bedingt anwendbar

Quasi-statischer Bruchmechanikversuch

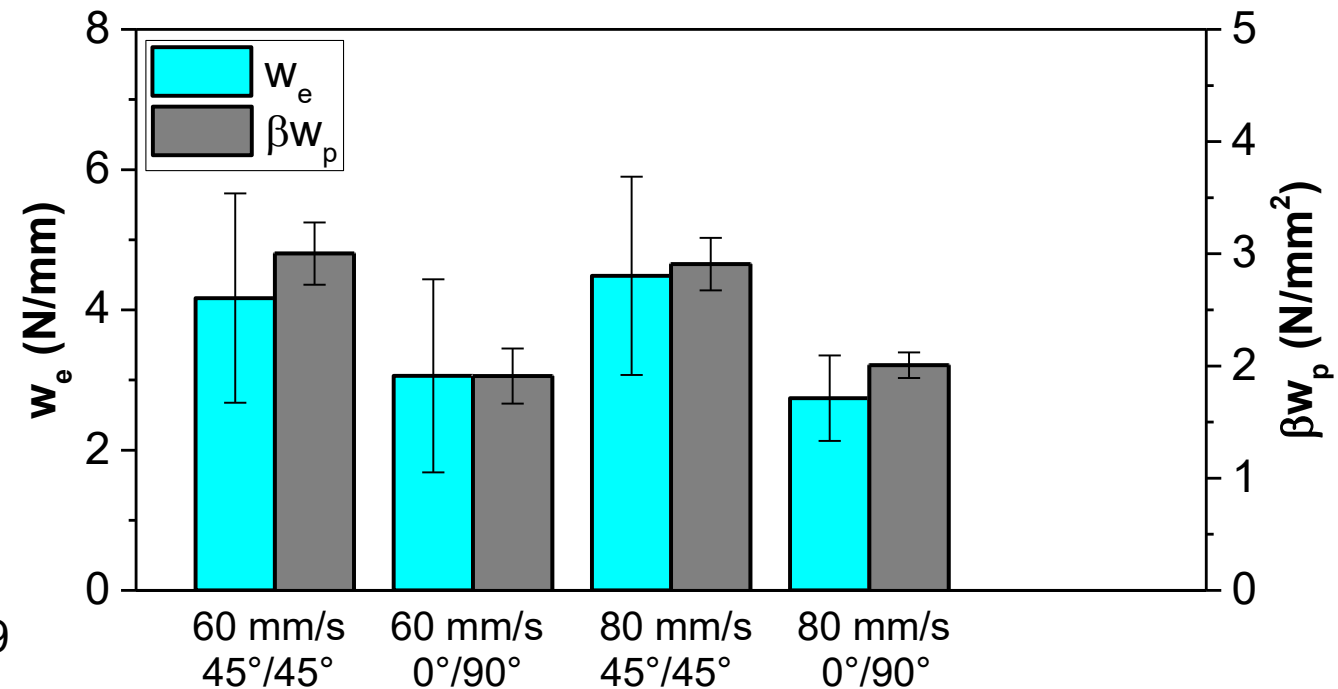
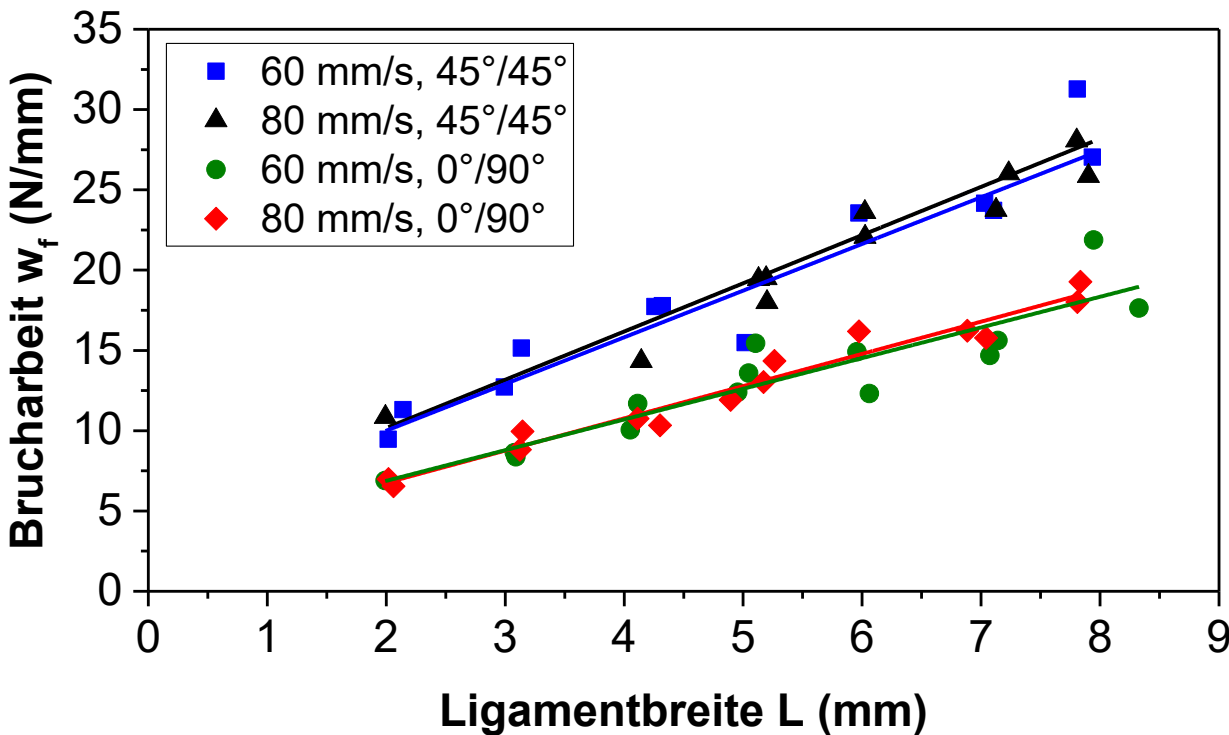
Risspitzennahe lokale Dehnungsfelder während bruchmechanischer Untersuchungen an mini-CT-Prüfkörpern aus ABS für unterschiedliche Orientierungen



- Makroskopische Rissausbreitung entsprechend Orientierung → Richtung 45°/45° mit Mode II-Anteilen, Richtung 0°/90°: nur Mode I

Quasi-statischer Bruchmechanikversuch

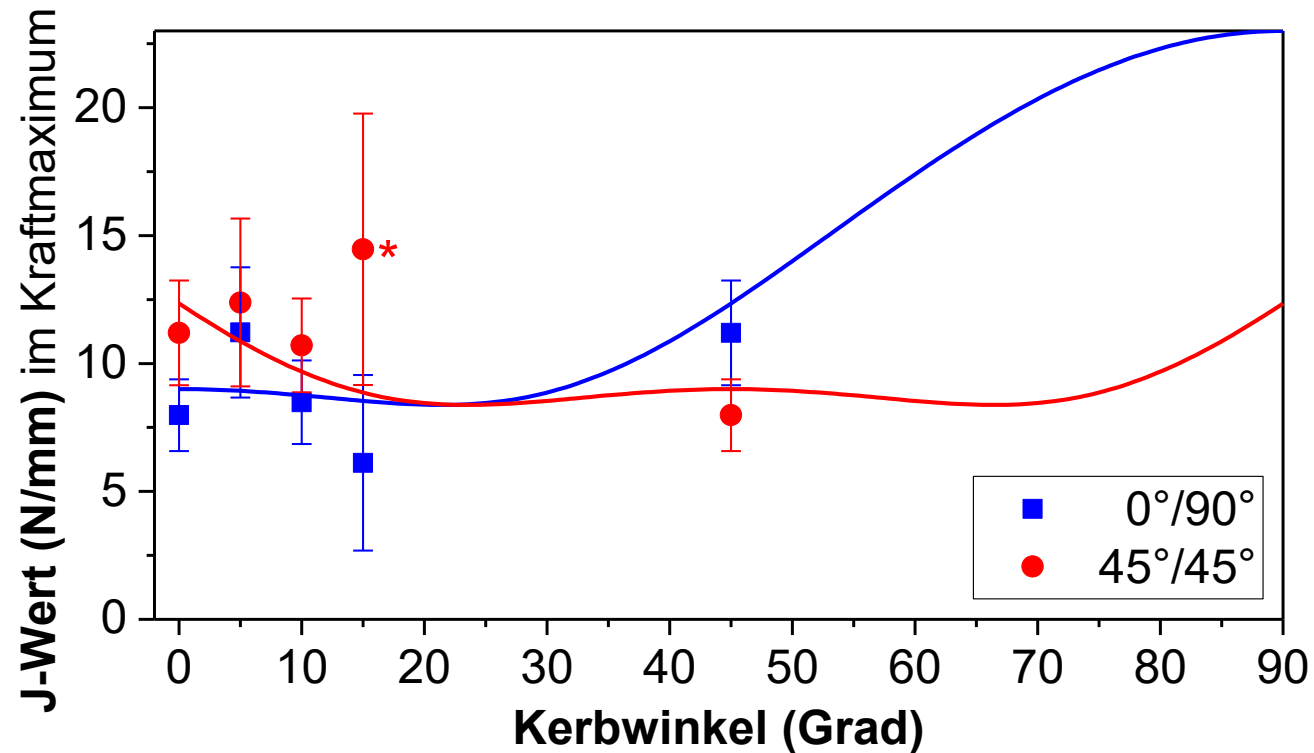
Bruchmechanische Kennwerte für ABS als Widerstand gegen stabile Risseinleitung (w_e) und -ausbreitung (βw_p) in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Druckgeschwindigkeit und Orientierung)



- Starker Einfluss der Orientierung: Bruchmechanische Kennwerte für Richtung 45°/45° größer als für Richtung 0°/90°; Kein Einfluss der Druckgeschwindigkeit

Quasi-statischer Bruchmechanikversuch unter Mode I/II Mixed Mode

Bruchmechanische Kennwerte für ABS (J-Wert im Kraftmaximum) in Abhängigkeit in Abhängigkeit von der Orientierung bei einer Druckgeschwindigkeit von 60 mm/min



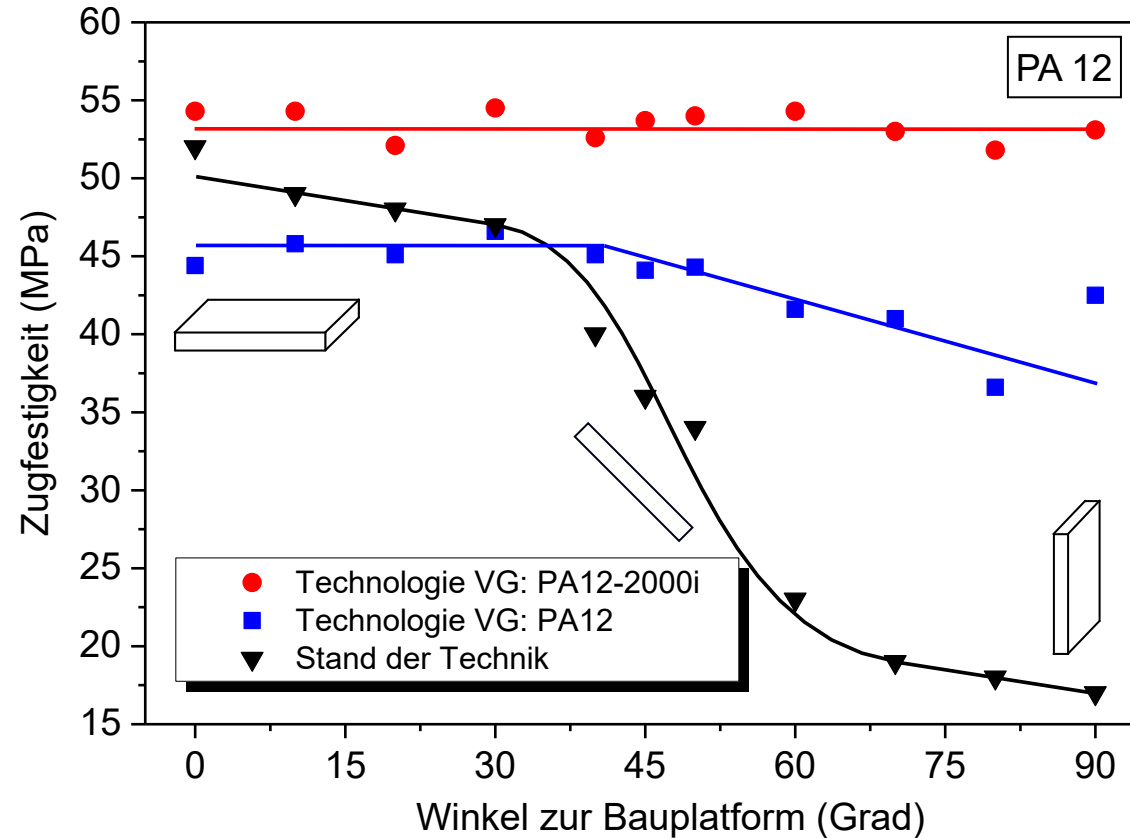
Punkte – experimentelle Werte (* Bruch teilweise in der Einspannung),
durchgezogene Linien – berechneter Vergleichswert J_v

Korrelationen zwischen den (bruch)mechanischen Eigenschaften und der Werkstoffmorphologie additiv gefertigter Kunststoffe

- Motivation
- Fused Layer Deposition (3D-Druck) – Einfluss von Baurichtung der Prüfkörper und Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die bruchmechanischen Eigenschaften
 - Einleitung
 - Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch
 - Quasistatischer Bruchmechanikversuch
- **Selektives Lasersintern – Einfluss der Dichte und Baurichtung der Prüfkörper auf die mechanischen Eigenschaften**
 - Einfluss der Baurichtung
 - Einfluss der Dichte
 - Verfahren zur Qualitätssicherung
- Zusammenfassung

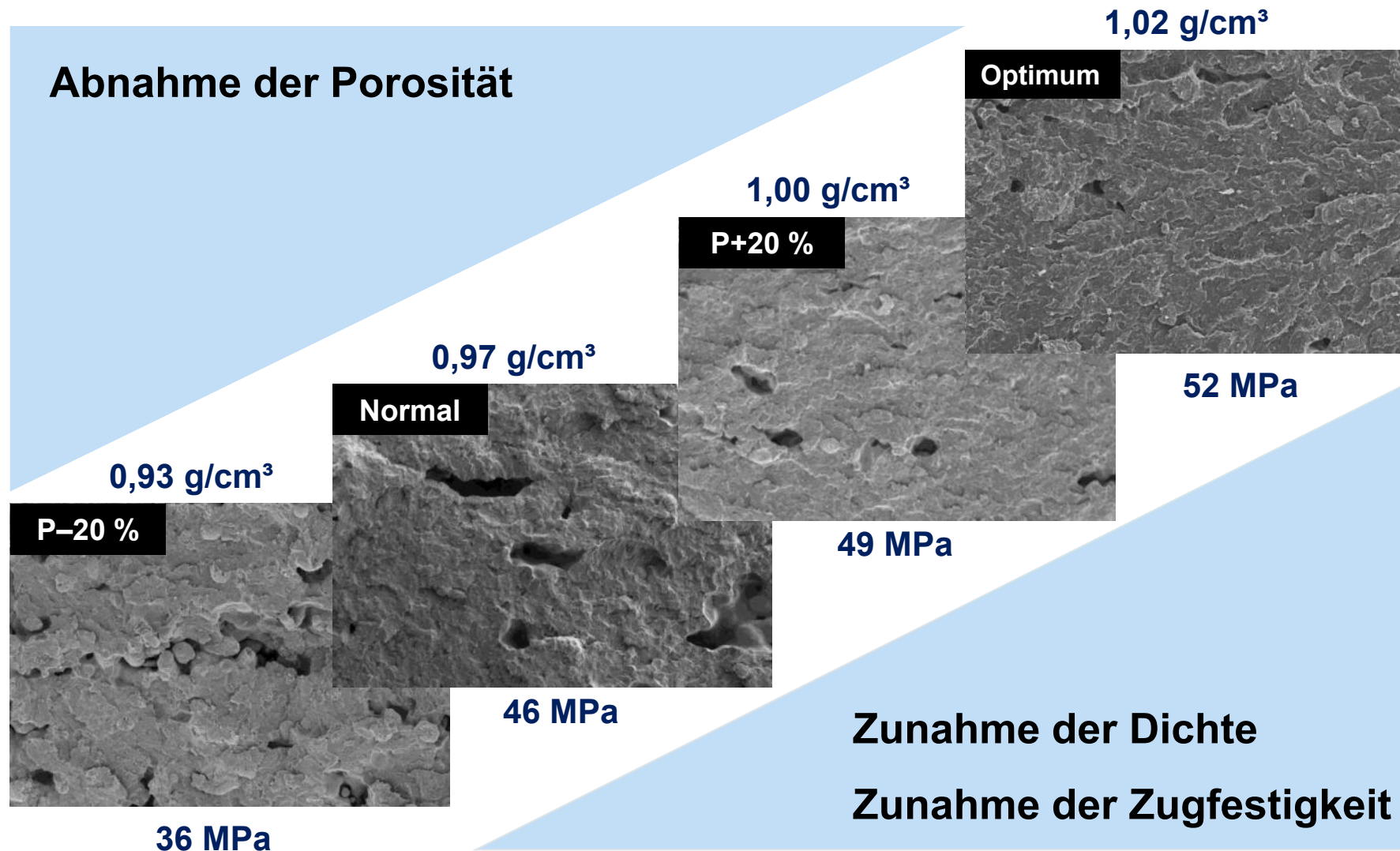
Einfluss der Baurichtung (Orientierung) auf mechanische Kennwerte

Einfluss der Baurichtung auf die Zugfestigkeit von PA12 für unterschiedliche Stadien der Prozessparameteroptimierung



- Isotrope Werkstoffeigenschaften durch optimierte Prozessparameter

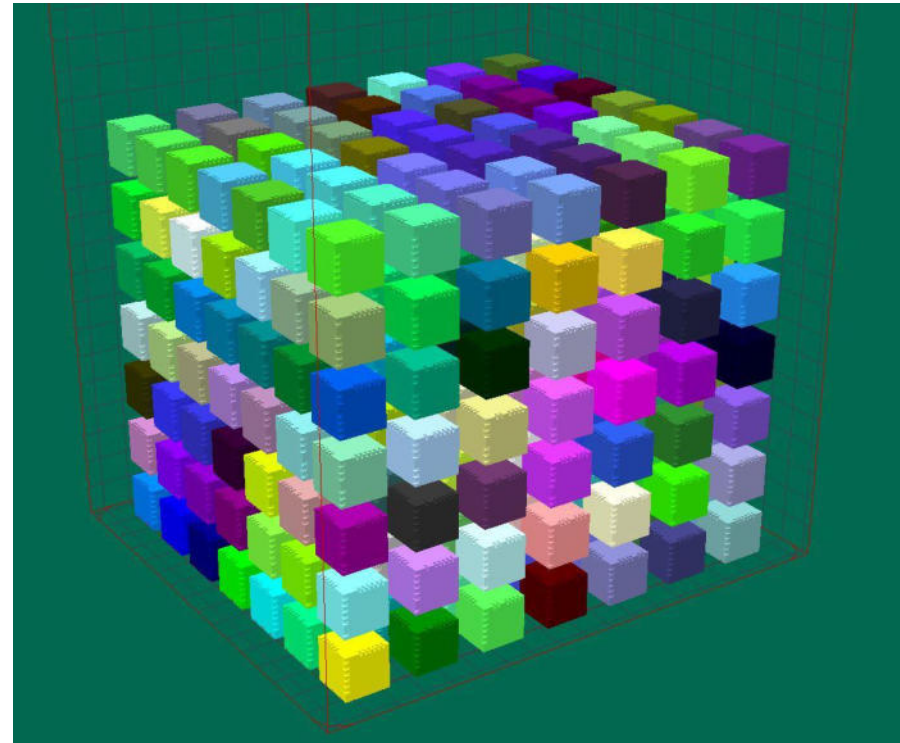
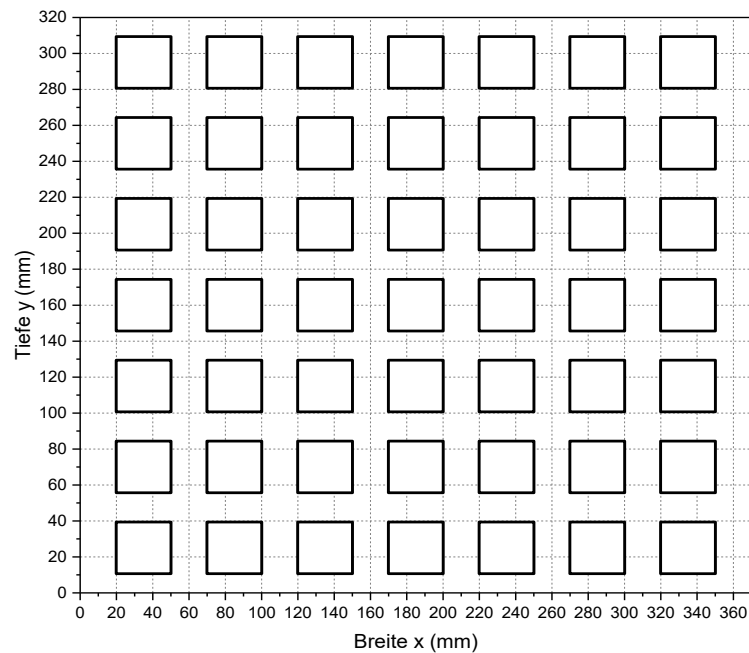
Einfluss der Dichte auf mechanische Kennwerte



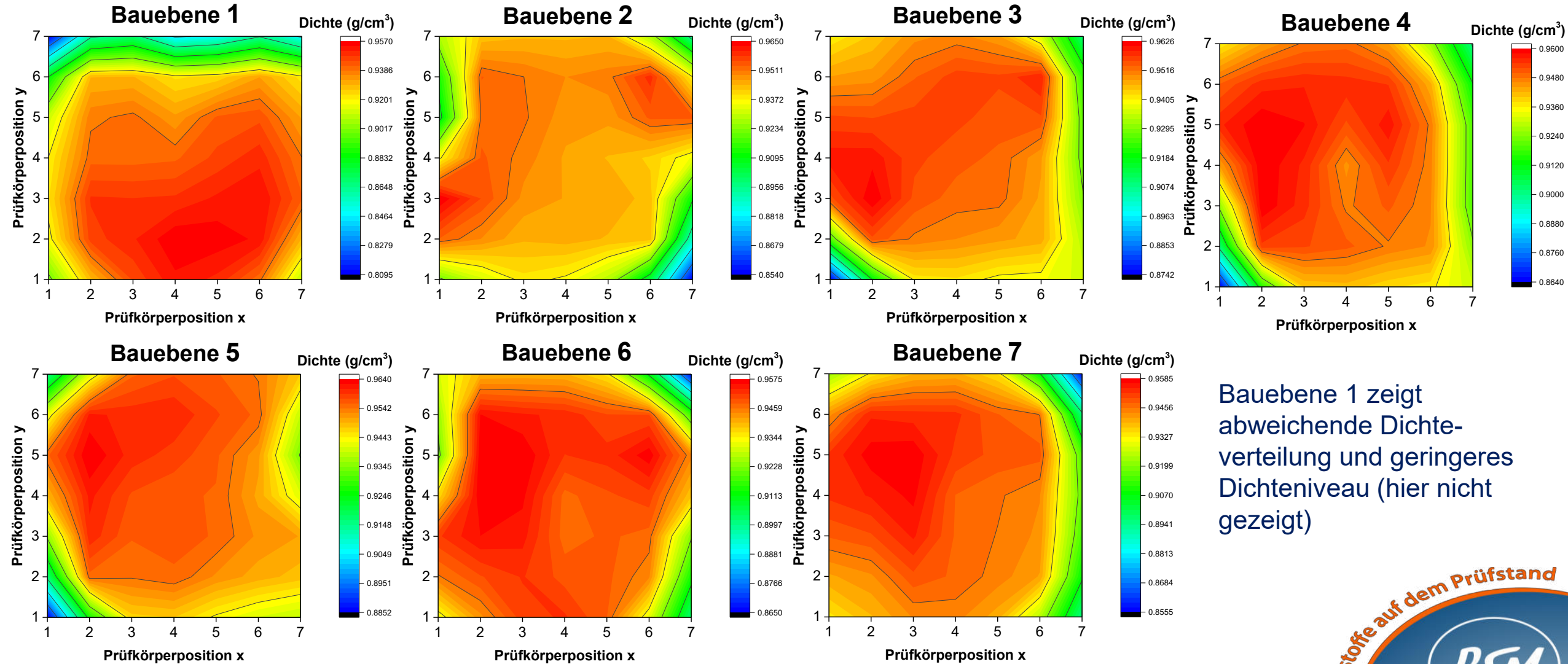
Einfluss der Dichte auf mechanische Kennwerte

Vergleichswürfel aus PA12 zur ortsabhängigen Ermittlung struktureller und geometrischer Parameter sowie der mechanischen Eigenschaften

Würfel in der Bauebene 1



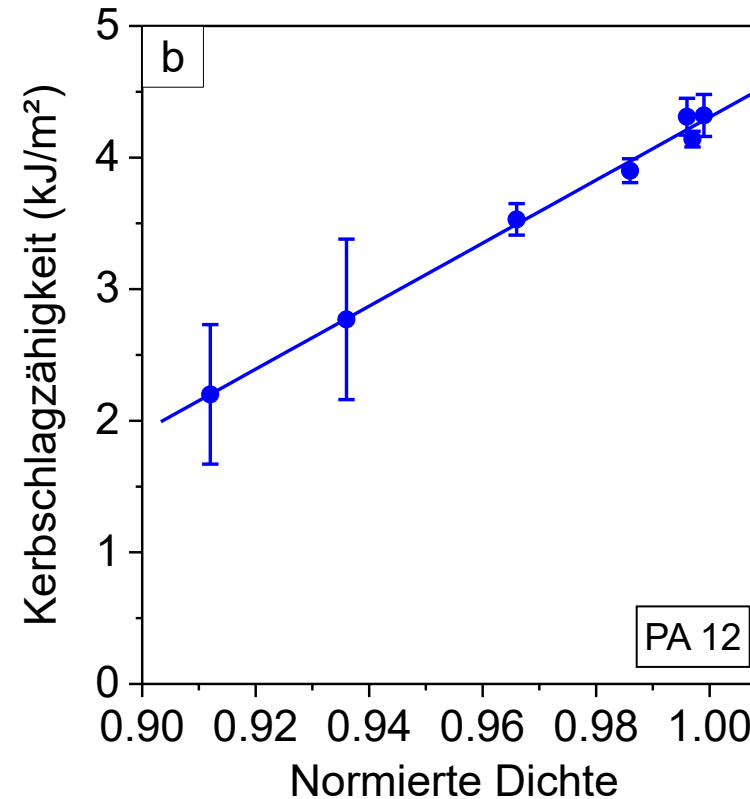
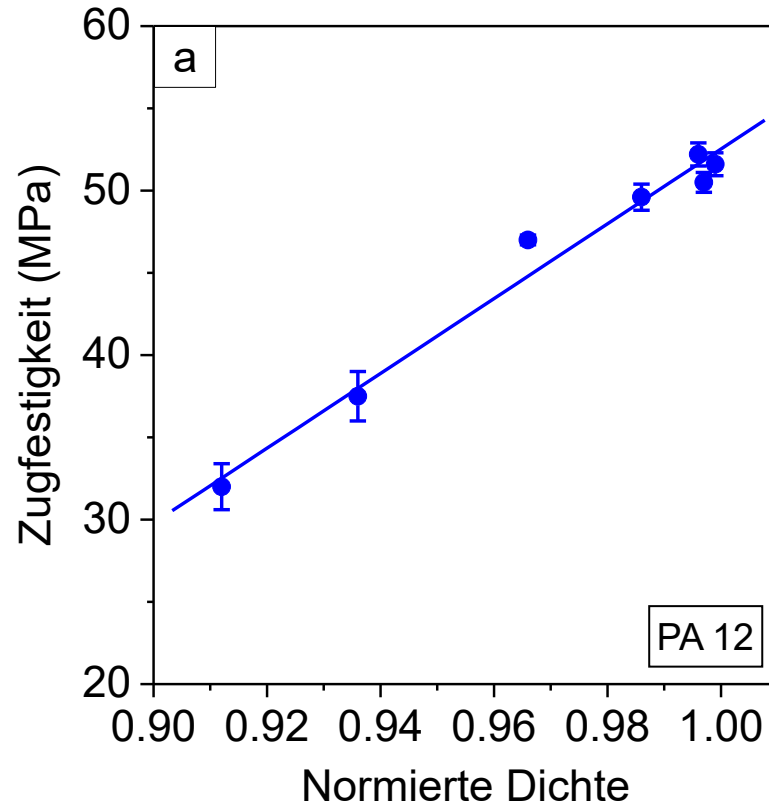
Einfluss der Dichte auf mechanische Kennwerte



Bauebene 1 zeigt abweichende Dichteverteilung und geringeres Dichteniveau (hier nicht gezeigt)

Einfluss der Dichte auf mechanische Kennwerte

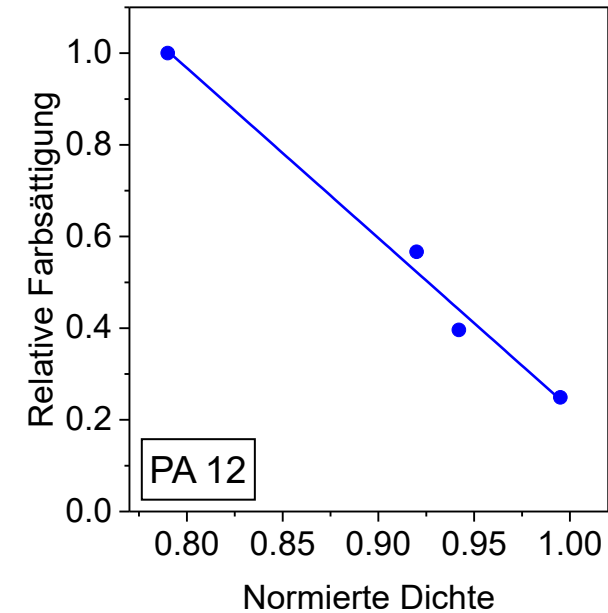
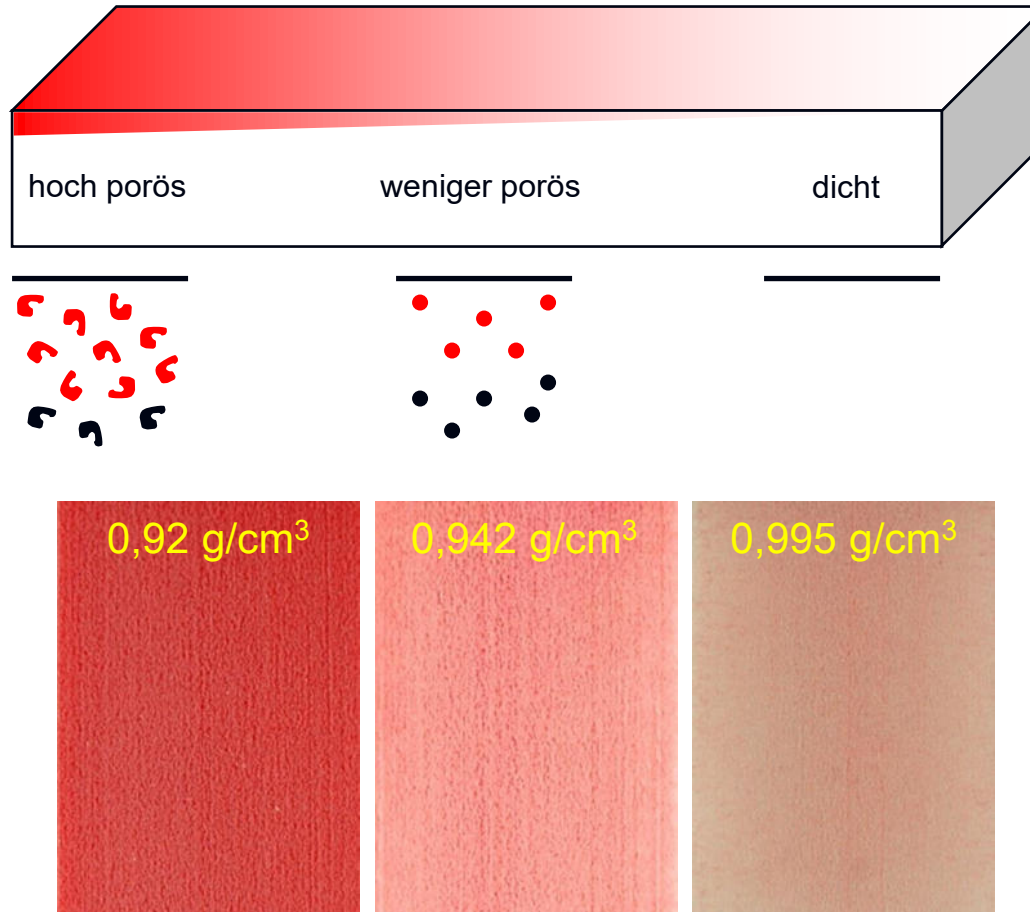
Einfluss der Dichte auf die Zugfestigkeit und Kerbschlagzähigkeit von PA12



- Lineare Korrelation zwischen mechanischen Kennwerten und Dichte (auch für andere Werkstoffe)

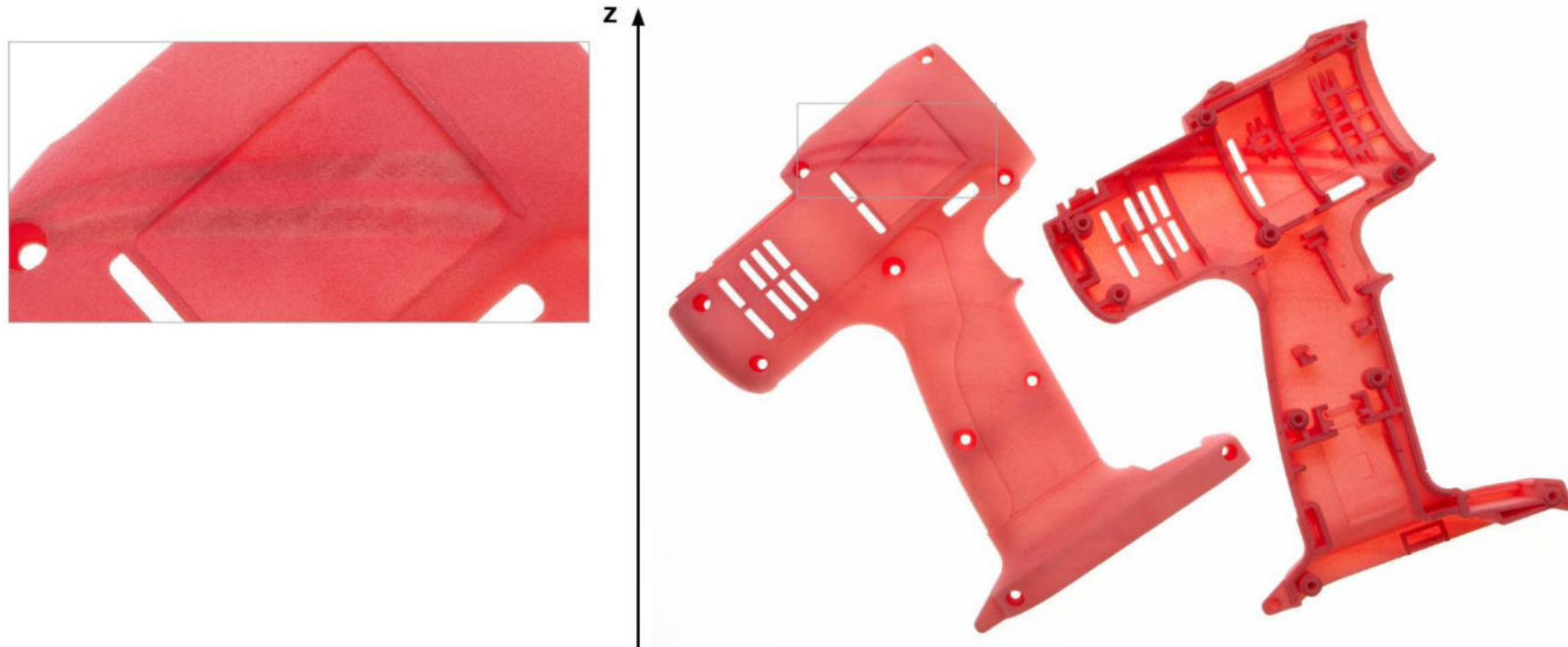
Zerstörungsfreie Prüfung zur Qualitätssicherung – der Farbeindringtest

Ermittlung einer Kalibrierkurve für Farbeindringtest



Zerstörungsfreie Prüfung zur Qualitätssicherung – der Farbeindringtest

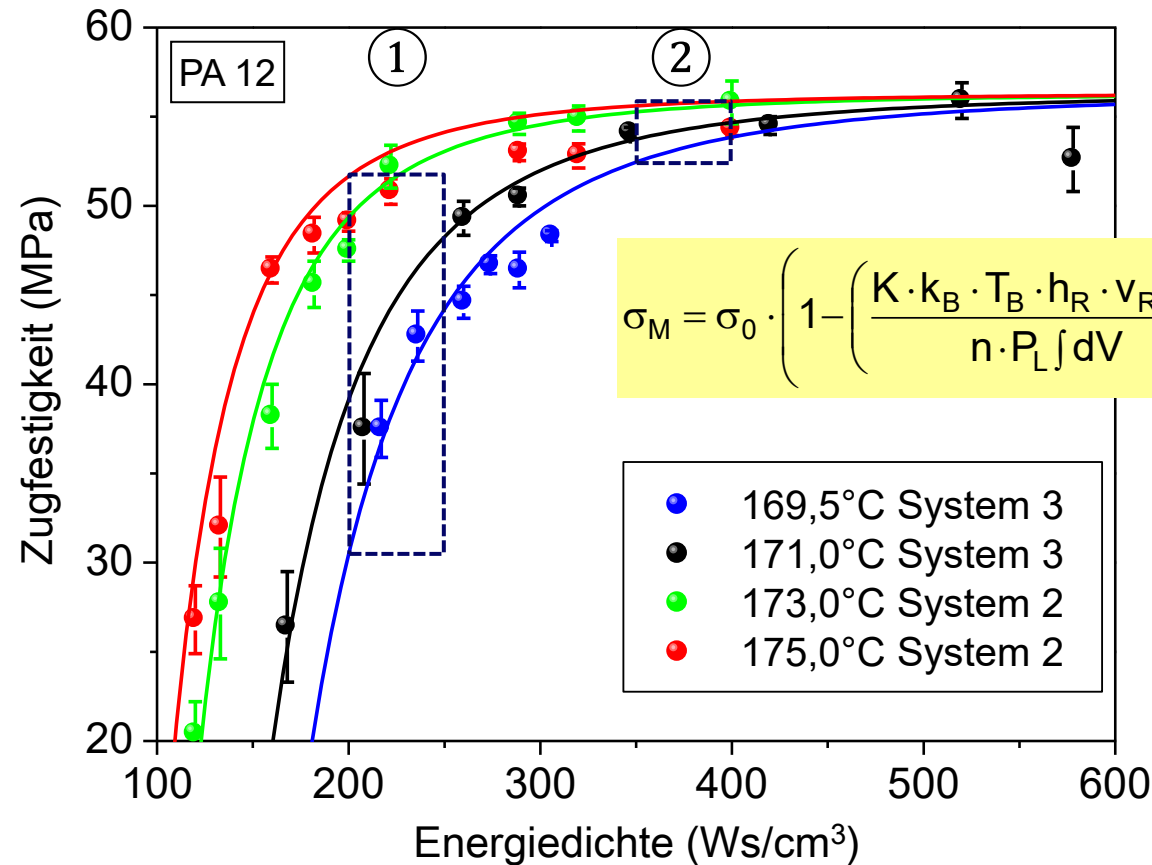
Anwendungsbeispiel für Farbeindringtest



Gehäuse eines Schraubendrehers aus PA12 mit Fehlstellen

Qualitätssicherung – Erstellung von stabilen Prozessfenstern

Einfluss der Energiedichte auf die mechanischen Eigenschaften



- ① Instabiles Prozessfenster
- ② Stabiles Prozessfenster

- σ_M – Zugfestigkeit
- σ_0 – maximale Zugfestigkeit
- K – Werkstoffkonstante
- k_B – Boltzmann-Konstante
- T_B – Bauraumtemperatur
- h_R – Strahlversatz
- v_R – Rastergeschwindigkeit
- d_s – Schichtdicke
- n – Wiederholungen
- $P_L \int dV$ – Energiedichte

$$\sigma_M = \sigma_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{K \cdot k_B \cdot T_B \cdot h_R \cdot v_R \cdot d_s}{n \cdot P_L \int dV} \right)^{3.4} \right)$$

- 169,5°C System 3
- 171,0°C System 3
- 173,0°C System 2
- 175,0°C System 2

Punkte – experimentelle Werte,
durchgezogene Linien –
berechnete Werte

Korrelationen zwischen den (bruch)mechanischen Eigenschaften und der Werkstoffmorphologie additiv gefertigter Kunststoffe

- Motivation
- Fused Layer Deposition (3D-Druck) – Einfluss von Baurichtung der Prüfkörper und Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die bruchmechanischen Eigenschaften
 - Einleitung
 - Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch
 - Quasistatischer Bruchmechanikversuch
- Selektives Lasersintern – Einfluss der Dichte und Baurichtung der Prüfkörper auf die mechanischen Eigenschaften
 - Einfluss der Baurichtung
 - Einfluss der Dichte
 - Verfahren zur Qualitätssicherung
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

Fused Layer Deposition (3D-Druck)

- Kein Einfluss der Druckgeschwindigkeit auf die bruchmechanischen Eigenschaften
- Bruchmechanische Kennwerte für Richtung $0^\circ/90^\circ$ kleiner als für Richtung $45^\circ/45^\circ$
- Ursache: Mikroskopische (IKBV) bzw. makroskopische (quasi-statischer Bruchmechanikversuch) Mode II-Anteile der Rissausbreitung für Richtung $45^\circ/45^\circ$ → Bruchzähigkeit unter Mode II größer als unter Mode I

Selektives Lasersintern

- Einfluss der Baurichtung auf die Zugfestigkeit: Isotrope Eigenschaften durch Prozessparameteroptimierung
- Lineare Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Dichte
- Methoden der Qualitätssicherung: Dichtewürfel im Bauraum, Farbeindringtest, stabiles Prozessfenster



Vielen Dank für Ihr Interesse

Ralf Lach, Wolfgang Grellmann, Katrin Reincke
*Korrelationen zwischen den (bruch)mechanischen Eigenschaften
und der Werkstoffmorphologie additiv gefertigter Kunststoffe*



Danksagung:

Investitionsbank Sachsen-Anhalt

Prognose des Einsatzverhaltens 3D-gedruckter Bauteile mittels bruchmechanischer Ansätze (FFD-Crack)

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Qualitätssicherung in der additiven Fertigung (AddiQ)

www.polymerservice-merseburg.de
ralf.lach@psm-merseburg.de

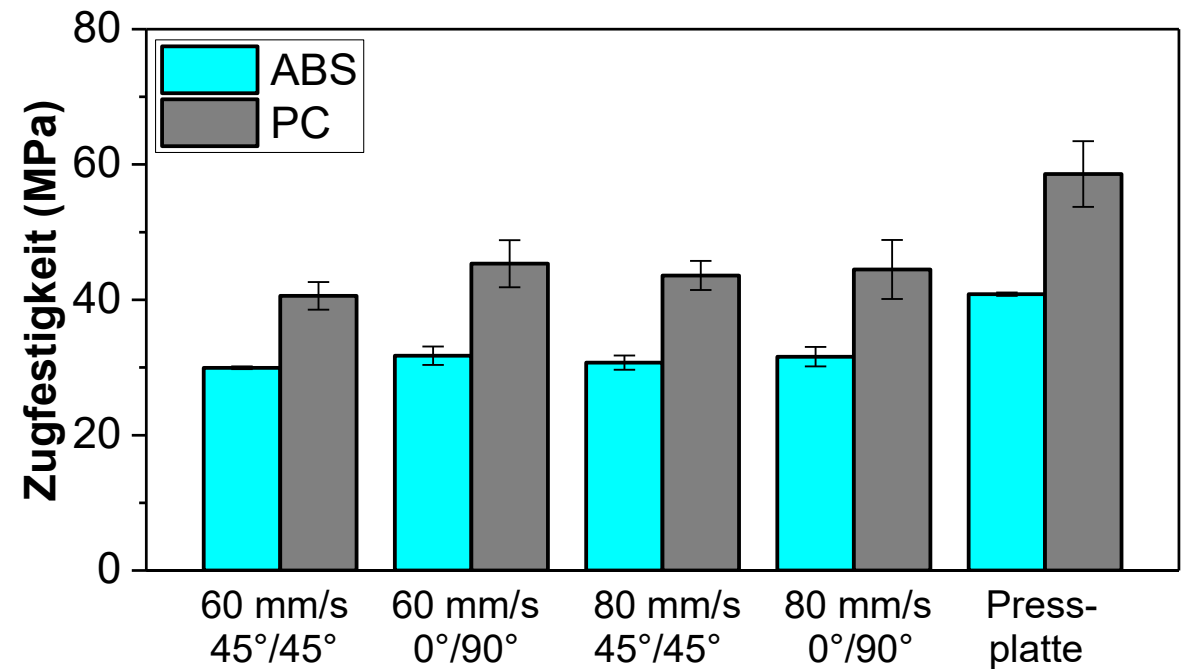
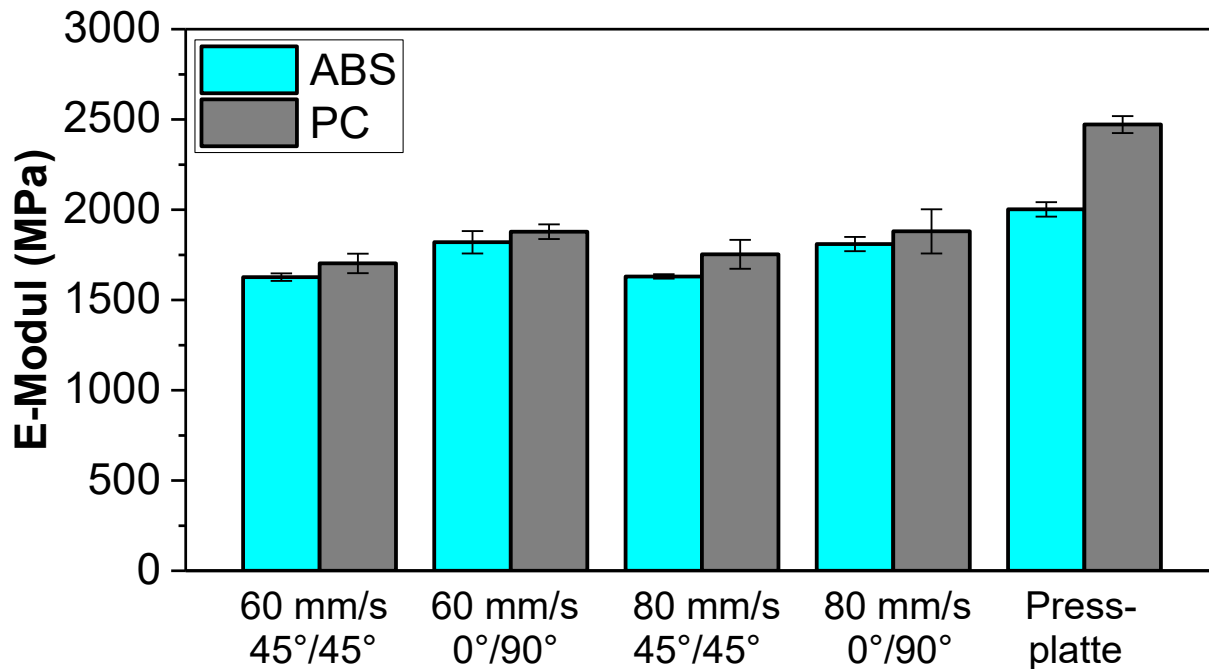


GEFÖRDERT VOM



Einachsiger Zugversuch

E-Modul und Zugfestigkeit aus dem einachsigen Zugversuch für ABS und PC in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Druckgeschwindigkeit und Orientierung)



- Kaum Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen Kennwerte unter einachsiger Zugbeanspruchung: Kennwerte für Richtung 0°/90° geringfügig größer als für Richtung 45°/45°
- Porositätsbedingt mechanische Kennwerte 3D-gedruckter Teile kleiner als diejenigen für Pressplatten



12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15. Oktober 2025

Hochschule Mittweida



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences



www.hs-mittweida.de/forum-3d-druck

Impressum

Herausgeber:
Hochschule Merseburg
Eberhard-Leibnitz-Straße 2
06217 Merseburg

Ausgabe:

Erstellt für das 11. Mitteldeutsche Forum 3D Druck in der Anwendung am
16.10.2024
<http://dx.doi.org/10.25673/116960>

Inhalt:

Inhalte, Fotos, Grafiken und Tabellen ohne Quellenangaben liegen in der Verantwortung der jeweiligen Autoren.



www.hs-merseburg.de