

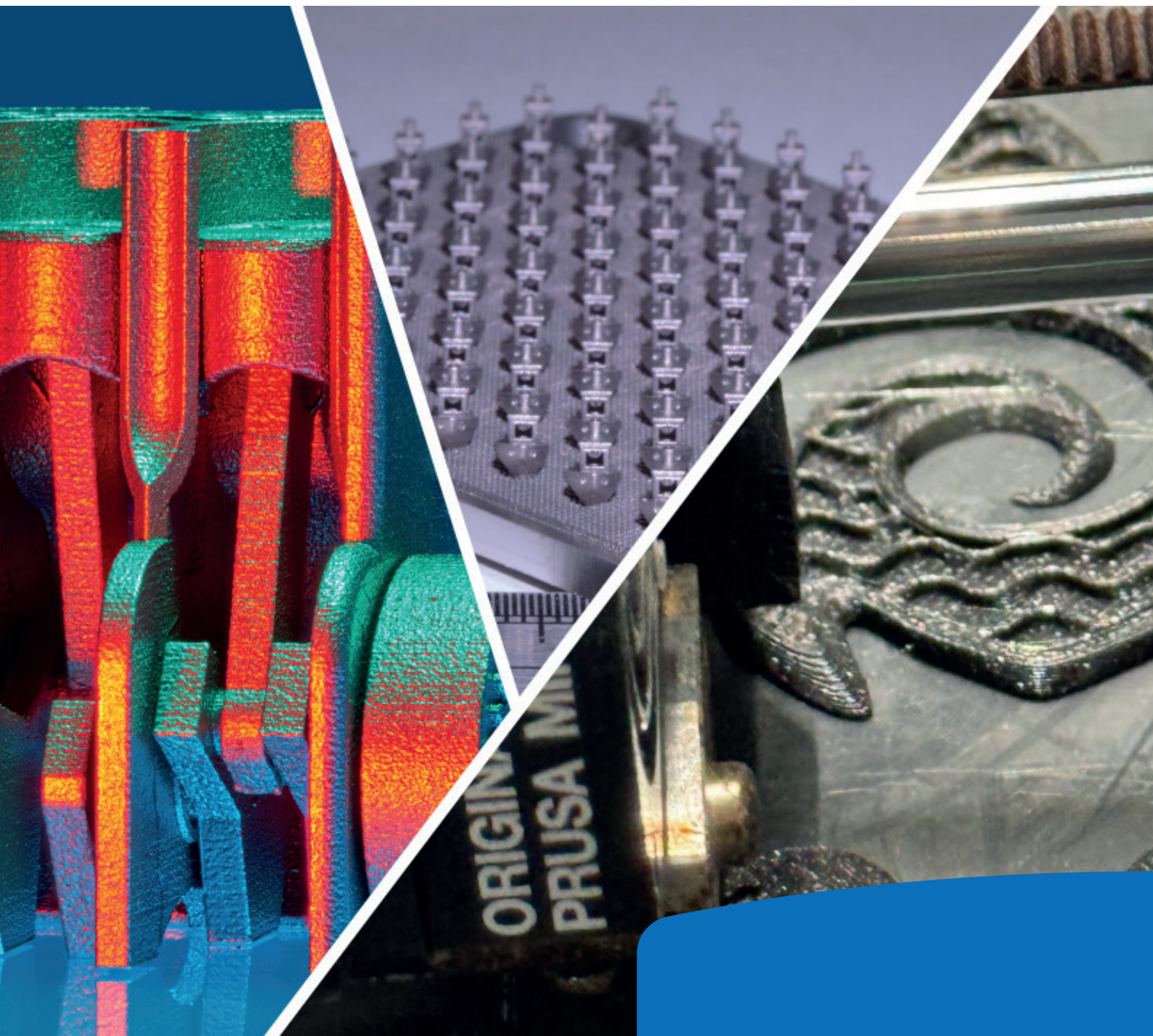


**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

Tagungsband

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15. Oktober 2025



12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15. Oktober 2025 | 09:00 – 17:00 Uhr | Gerhard-Neumann-Bau der Hochschule Mittweida

Veranstalter



Tagungsleitung

Jörg Matthes, Hochschule Mittweida

Tagungskomitee

Jens Bliedtner, EAH Jena
Ines Dani, HTWK Leipzig
Robby Ebert, Hochschule Mittweida
Günter Ganß, Ingenieurbüro für
Kunststofftechnik Suhl
Marco Götze, Hochschule Merseburg
Klaus Krüger, GMBU e.V.
Uwe Mahn, Hochschule Mittweida
Jörg Matthes, Hochschule Mittweida

Kerstin Michalke, EAH Jena
Constance Möhwald, EAH Jena
Michael Pfeifer, Laserinstitut Hochschule
Mittweida
Peter Schulze, HTWK Leipzig

Organisationsteam (alle Hochschule Mittweida)

Jörg Matthes
Annett Kober
Ines Lange
Claudius Petzold
Michael Pfeifer

Impressum

Herausgeber:
Hochschule Mittweida
Referat Forschung
Technikumplatz 17
09648 Mittweida

Ausgabe:
Erstellt für das 12. Mitteldeutsche Forum 3D Druck in der Anwendung am
15.10.2025
<http://dx.doi.org/10.25673/120741>

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

Inhaltsverzeichnis

Opening Session

3D-Hype - sind die fetten Jahre schon vorbei?	002
Stefan Roth, Hochschule Schmalkalden	

Innovative Verfahren und Funktionalisierung

Air Technologies for Additive Manufacturing	018
Stefan Jakschick ULT AG	

Additiv hergestellter Stich- und Schnittschutz auf textiler Basis	028
Fabian Jonas Müller Hochschule Mittweida	

Funktionalisierung additiv gefertigter Bauteile mittels Wire Encapsulation Additive Manufacturing (WEAM)	043
Valentin Mauersberger Fraunhofer IWU	

Können mechanisch gefertigte Bauteile wirklich durch 3D-gedruckte Bauteile ersetzt werden?	055
Joachim Kasemann, Mark3D GmbH	

Materialinnovationen und hybride Lösungen

Untersuchung der Kunststoff-Metall-Haftung bei der additiven Fertigung hybrider Spritzgussformen	070
Alexander Dierle, Thomas M. Wendt HAW Offenburg	

Additive Fertigung der nächsten Stufe: Neue Materialien und Technologien bei Stratasys	073
Michael Anton Stratasys	

Untersuchungen zum selektiven Laserstrahlschmelzen von Aluminiumoxid für die direkte Herstellung oxidkeramischer Bauteile	084
Laura Römer Laserinstitut Hochschule Mittweida	

3D-Druck mit Wasserglas – Ein nachhaltiger Ansatz zur laserbasierten additiven Fertigung	092
Hassel-Schmidt, R. ^{1,2} , Barz, A. ¹ , Bliedtner, J. ¹ , Rädlein, E. ² ¹ Ernst-Abbe-Hochschule Jena ² Technische Universität Ilmenau	

Metallbasierte Additive Fertigung für Hochleistungsanwendungen

Wolfram-Inertgas-Schweißen additiv und konventionell gefertigter Halbzeuge	106
Daniel Krug, Robert Prowaznik, Johannes Günther Günter-Köhler-Institut Jena	

**Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien113
aus Inconel 718**

Florian Heinrich
Laserinstitut Hochschule Mittweida

**Entwicklung additiv gefertigter Treibstofftanks und Festkörpergelenken aus amorphen124
Metallen für Luft- und Raumfahrt**

Maximilian Streinz
Günter-Köhler-Institut, Jena

**3D-Laserdruckverfahren zur Herstellung von porösen wasserabführenden134
Verlaufsstrukturen**

Matthias Horn, Udo Löschner, Lukas Naumann, Jörg Schille
Laserinstitut Hochschule Mittweida

Prozessüberwachung und Qualitätssicherung

Überwachung des 3D-Druckprozess (FFF) mittels Ultraschall142

Johannes Zawatzky
SONOTEC GmbH

**Intrinsische Markierung additiv gefertigter Bauteile zur Verifizierung und Identifizierung152
von Originalbauteilen**

Stephan Eckstein¹, Andreas Krombholz¹, Oliver Neudert¹, Johannes Zawatzki²

¹ GMBU e.V.

² SONOTEC GmbH

**Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der161
mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe**

Ralf Lach, Wolfgang Grellmann, Katrin Reincke
Polymer Service GmbH Merseburg

Metallpulver als Einflussfaktor auf die Bauteilqualität174

Andreas Pelz
m4p material solutions GmbH

Zukunftsfähige Strategien in der Additiven Fertigung

Vom Reststoff zum Prototyp – nachhaltige additive Fertigung im Reallabor SAMSax176

Leif Bretschneider
TU Bergakademie Freiberg

Recycling im Resin 3D-Druck186

Joschka Röben
Röben UG

Ist die additive (Wieder)Herstellung von Ersatzteilen lohnenswert?190

Marcus Witt
METROM Mechatronische Maschinen GmbH

Neue Dimensionen im 3D-Druck

Wenn das CAD an die Grenzen stößt	200
Antonius Köster Antonius Köster GmbH & Co. KG	

Das neu Puprint	216
Andreas Eiden-Bell Synthene SAS	

3D-Druck in der Praxis: Chancen, Grenzen und Erkenntnisse aus dem Mittelstand	223
Marucs Geßner Rapidobject GmbH	

Innovative Polymer-AM: Von Hochleistung bis Mikropräzision

Optimierung der Materialeigenschaften für 3D gedruckte polymere Spritzgusswerkzeuge	233
Valentin Wiesner, Markus Stark, Alexander Rost, Marcel Trier, Kai Graß Hochschule Coburg TTZ Oberfranken	

Experimentelle und numerische Analyse von UD-Tape-verstärktem Polycarbonat-FLM-Druck	241
Hagen Bankwitz Hochschule Mittweida	

Additive Fertigung monodisperser und anzahlgenauer Mikroplastik-Referenzpartikel durch Mikroextrusion	254
Maurice Hauffe Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden	

Prozesse und Qualitätssicherung

KI-basierte Überwachung der Schichtinformation im großvolumigen Schmelzschichtverhalten	261
T. Wille ^a , D. Linke ^a , J. Bliedtner ^a , W. Liao ^b , C. Zhang ^b , G. Notni ^b ^a Ernst-Abbe-Hochschule Jena ^b Technische Universität Ilmenau	

Gamechanger 3D-Druck - Aber wie sieht das mit der Qualität aus?	272
Amador Miano Replique GmbH	

Bildbasierte Fehler- und Prozessanalyse im Extrusions-3D-Druck	279
Björn Kunz TU Chemnitz	

Closing Session

Visionen drucken. Zukunft gestalten - Wie wir mit Robotik und Design lokale Ressourcen nutzen und globale Systeme neu denken können	288
Ada Matthes, Designerin	

Posterpräsentation

Einfluss von Hatchingstrategie und Hatchingabstand auf das Eigenspannungspotenzial.....292 in LPBF-ALSi10Mg –Qualitative Bewertung mittels Cantilever-Methode

Sebastian Gersch ¹, Carsten Schulz ², Jörg Bagdahn ³

¹ Hochschule Anhalt

² Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

³ Hochschule Anhalt

Mit Additiver Fertigung zur Kreislaufwirtschaft im Theaterkulissenbau – Potentiale305 und Herausforderungen des MEX-CRB mit Holzreststoffen

Leif Bretschneider, Henning Zeidler

TU Bergakademie Freiberg

Untersuchungen zur Pulverrheologie und Bauteilfestigkeit im Powder Bed Fusion (PBF)306

Lukas Kube, Simon Hamblyn, Franziska Schlimpert, Ingo Reinhold

HTWK Leipzig

ISO GPS zur Beschreibung systemspezifischer geometrischer Abweichungen additiver307 Fertigungssysteme

Anna Sorgatz, Sophie Gröger

TU Chemnitz

Opening Session

Der 3D Hype – Sind die fetten Jahre schon vorbei? Standortbestimmung und Ausblick



Bildquelle: FKM

Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth
12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung
Mittweida, 15.10.25

THE ADDITIVE MANUFACTURING LANDSCAPE: 171 COMPANIES & INSTITUTIONS DRIVING THE INDUSTRY FORWARD (APRIL 2019)

AMFG / Autonomous Manufacturing



Die fetten Jahre...

...schon vorbei?

Bad News...

Quelle: x-technik additive Fertigung

Themen > Fertigungssysteme > Polymer > AKF - Arburg Kunststoff Freiformen

BRANCHENGESCHEHEN

Arburg: Rückzug aus der Additiven Fertigung

Arburg zieht sich aus dem Geschäftsfeld der Additiven Fertigung (AM) zum 31. Dezember 2025 zurück. Die Betreuung der bestehenden Kunden und Anwender des Freeformers in Sachen Service und Ersatzteile ist sichergestellt.

10.09.2025 · ARBURGadditive · Teilen: · Zur Merkliste

„...Denn, obwohl das industrielle Fertigungssystem Freeformer (...) nach Markteinführung auf der K 2013 aufgrund ihrer technologischen Alleinstellungsmerkmale branchenweit für Aufsehen sorgten, hätten weder die wirtschaftlichen Ziele für dieses Geschäftsfeld langfristig realisiert werden können, noch habe sich insgesamt der globale 3D-Druck-Markt erwartungsgemäß entwickelt.“

AM veräußern

Von Carolyn Schwaar · vor 3 Monaten

Trumpf steigt aus dem Geschäft mit 3D-Metalldruckern aus. Der 100 Jahre alte deutsche Werkzeugmaschinenhersteller seine Sparte für additive Fertigung, zu der auch eine Reihe von 3D-Druckern für das **Laser-Pulverbettsschweißen von Metallen** gehört. Das in München ansässige Private-Equity-Unternehmen DUBAG kauft den Geschäftsbereich von Trumpf, der als eigenständiges Unternehmen von Schio, Italien, aus geführt wird. Das neue Unternehmen (Name: TBA) wird seine Aktivitäten reduzieren und sich stärker auf die Anwendungsberatung konzentrieren und sich dabei an EOS orientieren. Der Deal muss noch von den Behörden genehmigt werden.

Source: Trumpf

News +++ Formnext
Frankfurt, 18. – 21. November 2025

formnext

Formnext und führende AM-Experten fordern Änderung der deutschen Förderstrategie für die Additive Fertigung

Frankfurt am Main, 01.09.2025. Die Formnext sowie führende Experten im Bereich Additive Fertigung (AM) in Deutschland fordern ein Überdenken der staatlichen AM-Förderung. In der aktuellen Vorlage des Haushaltsentwurfs der Bundesregierung sind keine neuen Förderungen für AM und Leichtbau geplant.

Quelle: formnext



Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

Folie 3



Der Markt in Bewegung...

„Revolution in der globalen Massenproduktion“

SLM Solutions gehört jetzt zu Nikon

© 1. Februar 2023 · 3 Minuten Lesezeit

Die NXG X12 600 verfügt über 12 Laser mit jeweils 1 kW-Leistung und einem quadratischen Bauraum von 600 x 600 x 600 mm. Bild: SLM

Quelle: www.additive-industrie.de

3D-DRUCK NEWS ACTUALITIES

Nano Dimension übernimmt Markforged und positioniert sich als Marktführer

Am 26. September 2024 von André Z. veröffentlicht

In purchasing Markforged, Nano Dimension said it is acquiring a company with scale and efficiency. In 2023, Markforged's revenue was \$93.8 million with a 27.4% gross margin and 48.6% non-CAAP gross margin, and a second quarter of 2024 gross margin of 48.3% and non-CAAP gross margin of 44.9%. This had the potential to expand further, added Nano Dimension.

NEW! (UNCONFIRMED) COMPANIES & MARKETS (CATEGORIES/COMPANIES/MARKETS)

Arc Impact to acquire key Desktop Metal and ExOne assets in \$7M bankruptcy sale

Desktop Metal | ExOne | Arc Public Benefit Corporation

The US Bankruptcy Court for the Southern District of Texas has approved a deal that will see Arc Impact Acquisition Corp., based in New York, USA, acquire core businesses from Desktop Metal, Inc. and its subsidiaries, including ExOne's metal Binder Jetting technology, for \$7 million. The sale, finalized September 4, 2025, also includes the assumption of certain liabilities and contracts.

The agreement comes after Desktop Metal filed for Chapter 11 (https://www.metal-3d.com/desktop-metal-files-for-chapter-11-bankruptcy-plans-asset-sale-to-arc/) protection in July 2025. Although acquired by Nano Dimension (https://www.nano-dimension.com/desktop-metal-acquisition/) in April 2025, the bank decline to be reported to be the decision of Desktop Metal's independent Board of Directors.

Themen > Fertigungssysteme > Metall > LPBF - Laser Powder Bed Fusion

GASTKOMMENTAR

Eindrücke von der TCT-Asia: von „copy cat“ zum globalen Innovator

Nachdem der Kunststoff-3D-Druck hauptsächlich in den USA während der 1980er-Jahre entwickelt wurde und der Metall-3D-Druck in Europa während der 1990er-Jahre, brauchte es auch noch den Fall des Eisernen Vorhangs nach Osten und weltweit liberalere politische Strömungen, um den freien Welthandel, auch mit China, deutlich anzukurbeln. Das triggerte auch den lokalen Nachbau solcher Technologien und das meist bei den lokalen Händlern der westlichen Hersteller nach dem Motto „das können wir doch auch selbst“.

Quelle: Stefan Ritt, https://www.additive-fertigung.com/

Fazit

- Wer große SLM-Bauteile möchte, kommt an China im Moment nicht vorbei!
- Die Technologie und Ausführung sind ebenbürtig oder gar vollständiger bzw. besser.
- Hightech- und Rocket-Sciences-Anwendungen sind als Referenz verfügbar.
- Lokaler Support ist installiert und funktionell.
- Die Vielzahl der Modellvarianten ist deutlich größer als bei westlichen Anbietern.
- Mittlere Anlagengrößen gibt es zum halben Preis.
- Alle genannten Hersteller fertigen auch Peripherieanlagen und Pulver.

EP-M2050 Metal 3D Printer

30-Liter Laser Powder Bed Fusion Manufacturing System

regiojet

Build volume 2000 x 2000 x 1100 mm (with a consumable 2 with up to 1000 mm³)

90-Liter working together spread up to 1000 mm³

End-to-end throughput of up to 1000 mm³

Excellent quality & good consistency

SPControl, EPControl

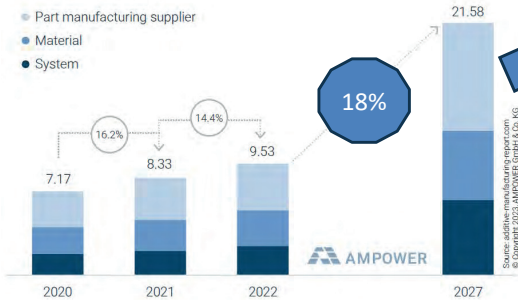
Prof. Stefan



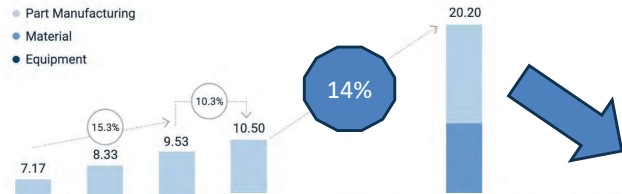
Der Markt....

- Hohes Wachstumspotential
- Start-Ups → Trend zur Konsolidierung/Fusionierung
- China als Konkurrent wächst

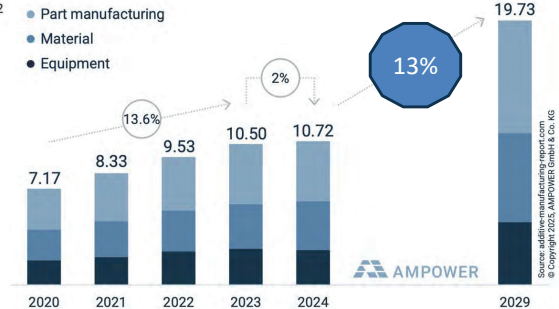
Global metal and polymer Additive Manufacturing market 2020 to 2022 and supplier forecast 2027 [EUR billion]



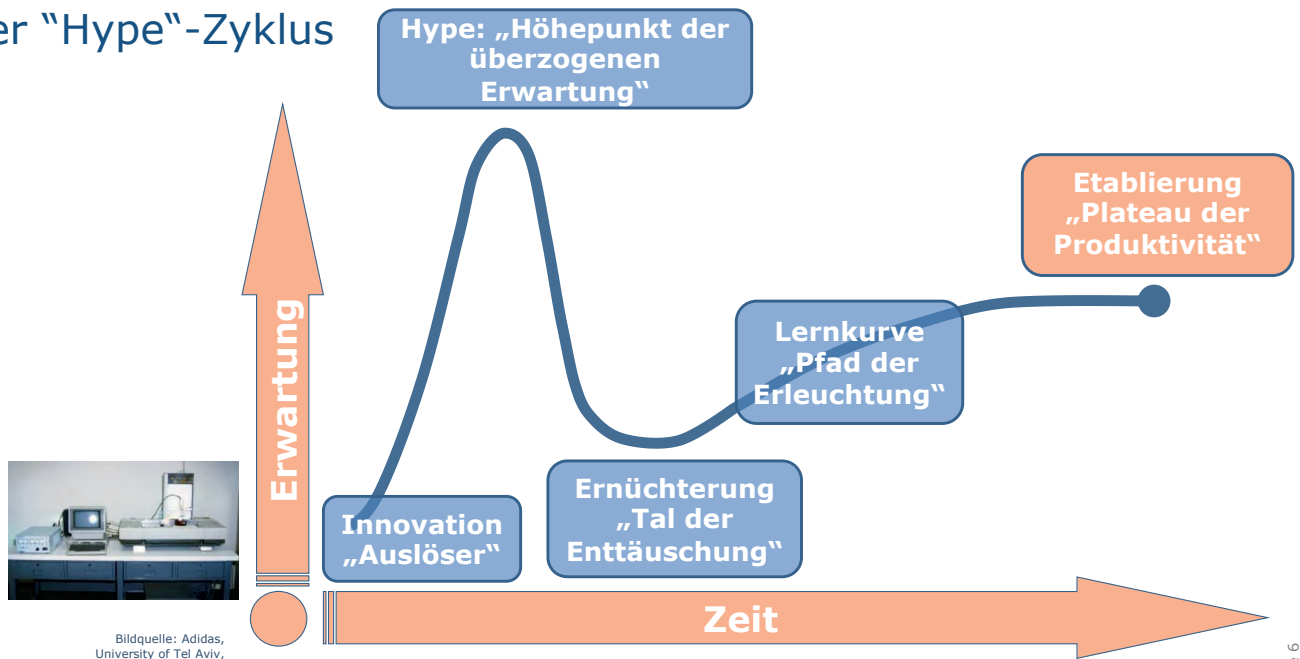
Global metal and polymer Additive Manufacturing market 2020 to 2023 and forecast 2028 [EUR billion]



Global metal and polymer Additive Manufacturing market 2020 to 2024 and forecast 2029 [EUR billion]



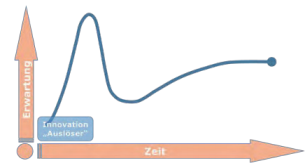
Der "Hype"-Zyklus



Der Auslöser...

- 1980 – erste Untersuchungen durch Hideo Kodama zum Rapid Prototyping
- **1984** – Patentanmeldung Stereolithographie Verfahren auf Basis Flüssigharz (Chuck Hull, Gründer 3D Systems)
- 1988 – Patentanmeldung Selektives Lasersintern SLS (Carl Deckard)
- **1989** Patentanmeldung Fused Deposition Modeling FDM (Scott Crump, Stratasys)
- 1990er Jahre: Kommerzialisierung der Systeme
- 1996 – erste Binder Jetting Anlagen (ZCorp)
- 2000 – erste Multijet Modeling Systeme (Objet)
- **2009** – FDM Patent Stratasys läuft aus → Innovationsschub, Markteroberung

Chuck Hull

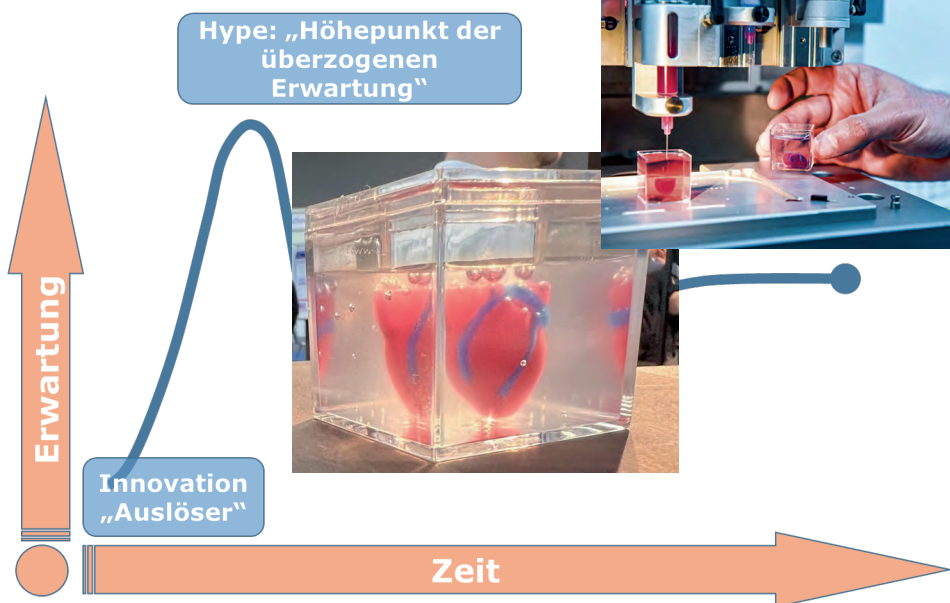


SLA-1, erster Stereolithographiedrucker 3D Systems (1987)



Folie 7

Die Hype-Phase



Die Vision: 3D Druck für alle ☺

"...So the replicating rapid prototyping machine will allow the revolutionary ownership, by the proletariat, of the means of production...."

(Adrian Bowyer: World without money, https://reprap.org/wiki/Wealth_Without_Money, 2.12.2004, abgerufen 21.03.21)

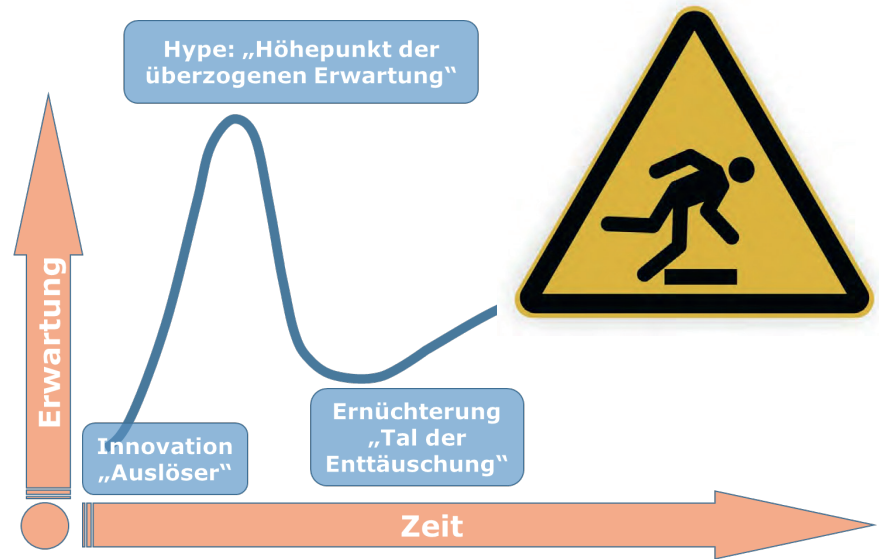
Bildquelle: Wolters, University of Tel Aviv

Folie 8

Die Ernüchterung – Unsere Gegenwart

Hemmnisse

- ⚡ lange Produktionszeit
- ⚡ nur niedrige Stückzahlen
- ⚡ schlechtes Oberflächenfinish
- ⚡ geometrische Genauigkeit
- ⚡ nicht das richtige Material für die richtige Anwendung
- ⚡ schnelllebigste Technologie
- ⚡ energieintensiv
- ⚡ ...

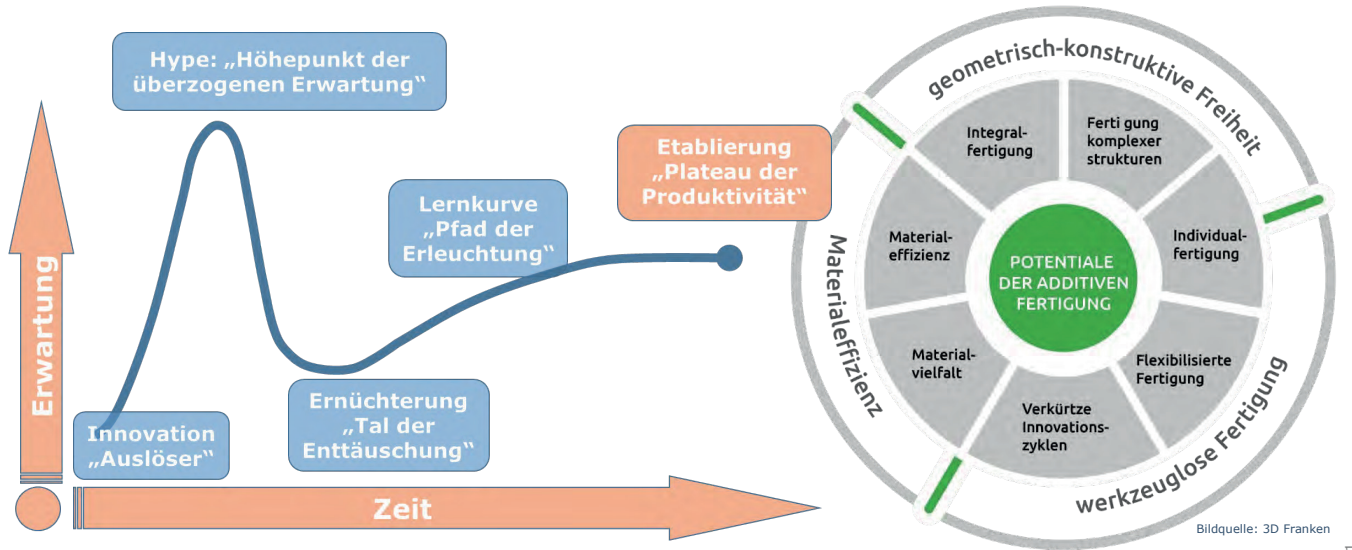


Ausblick Wege aus dem Jammertal



Bildquelle: Tetsche

AM – die Potentiale nutzen!



Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

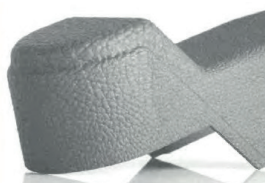


Folie 11

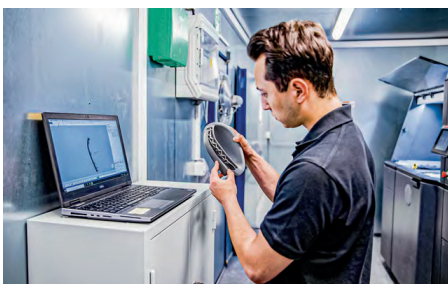
Rapid Repair – Anwendungsbeispiel Automotive

EvoBus/Setra

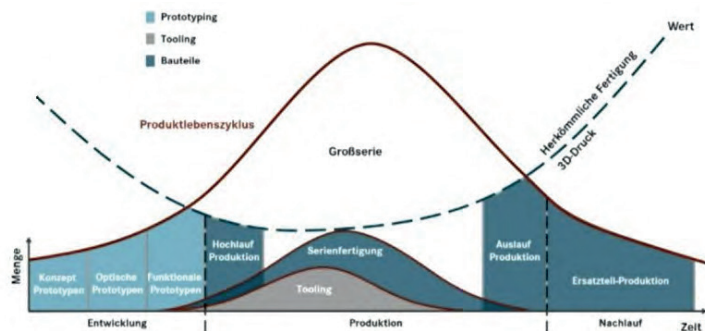
- Seit 2016
- Stückzahl 20.000/a
- 300.000 Ersatzteile, davon 12% AM-fähig
- zum Teil keine digitalen Daten für die Geometrie



Einsatz des 3D-Druckes im Produktlebenszyklus



Bildquelle: Daimler Truck AG, Daimler Buses integriert 3D-Druck in die Ersatzteillfertigung. Konstruktion, 04-2019
J. Kretz, R. Anderhofstadt: 3D-Druck fährt Bus, Vortrag Rapid.tech 2021



Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 12

Rapid Repair – Deutsche Bahn

- Ersatzteilproduktion durch 3D-Druck
- Reduzierung Lagerbestände
- schnelle Ersatzteilbeschaffung



Lernkurve
„Pfad der
Erleuchtung“



Zeit

Anwendungsbeispiele

- Radsatzlagerdeckel (Bildmitte) aus dem 3D-Drucker
- Turbinenschaufelrad für die Lichtmaschine der Dampflokomotive
- Handlauf in Braille-Schrift



Bildquelle: Deutsche Bahn



Initiative „mobility goes additive“

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



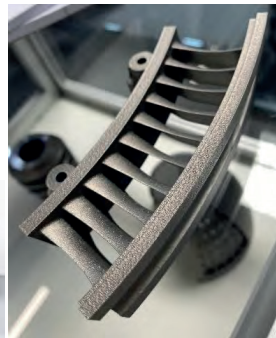
Folie 13

Rapid Repair – Deutsche Bahn

Bildquelle: Deutsche Bahn, toolcraft



- Lichtmaschine für Dampflokomotive
- Wasserdampf, Temperaturen bis 220°C → verschleißanfällig
- Umsetzung in additiv gefertigte Turbinensegmente → leicht wechselbar



Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 14

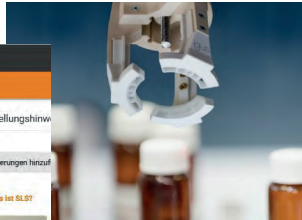
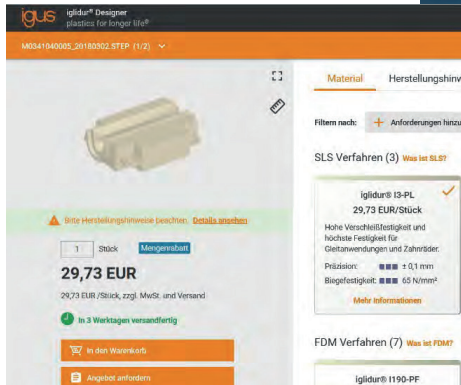
Anwendung kleine Losgrößen – Sondermaschinenbau

Anwendung Industrie / Automation

- Herausforderung kleine Lösgrößen
- Ersatzteile / Verschleißteile



Bildquelle: Schunk, igus



- Beispiel: Schunk, igus
- Greiferlösungen für die Industrie
 - kundenindividuell



Folie 15

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Anwendungsbeispiel Industrie

- Lasergerät für die 2D-Bemessung zur Markierung von Trockenbauschienen-Positionen in Innenräumen
- Gehäuse additiv im SLS-Verfahren hergestellt
- Material PA12, Oberflächenfinish: geglättet, eingefärbt
- Kleine Losgrößen 1...500 Stck./a



Hilti PMD 200 Jobsite Layout Tool compared to traditional two person drywall layout
<https://www.youtube.com/watch?v=KSIE1F8mtb4>



Folie 16

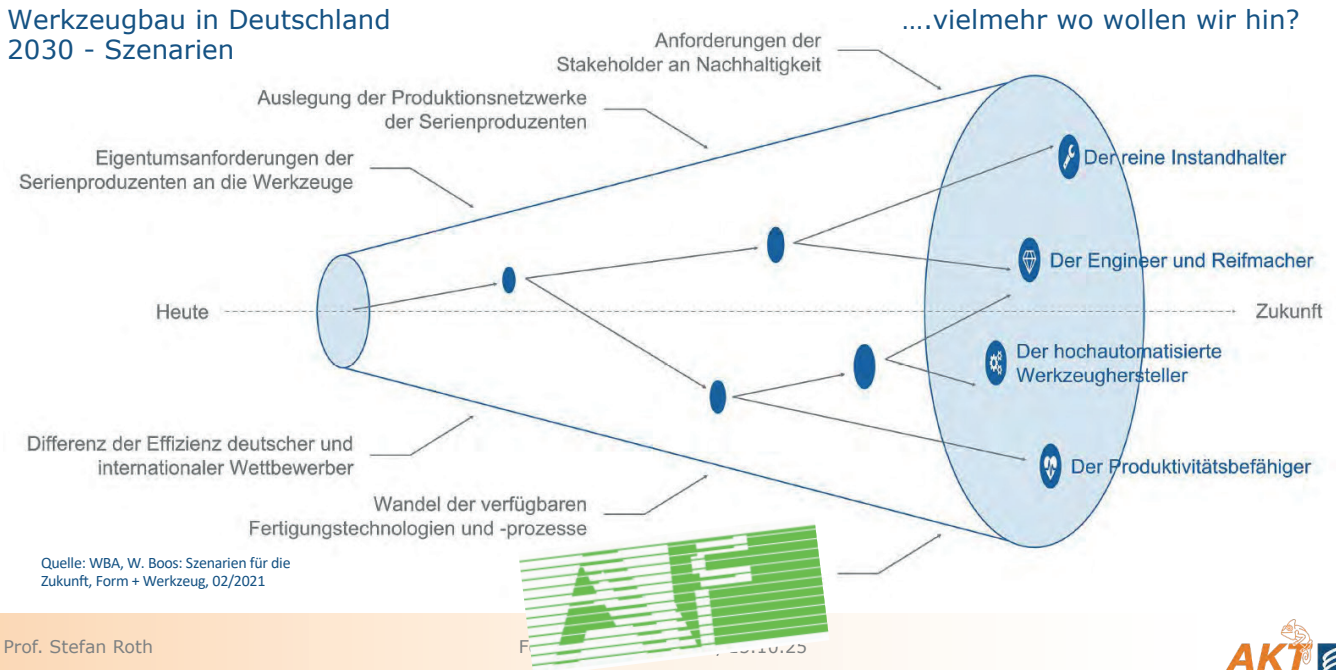
Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



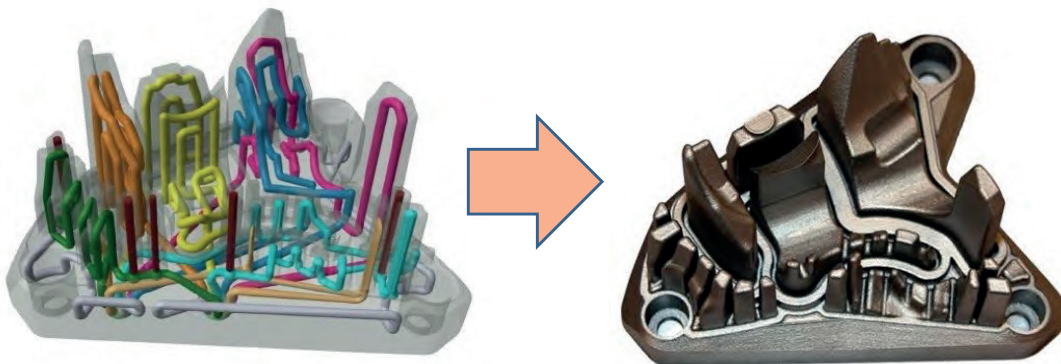
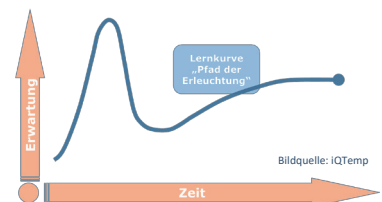
Wo stehen wir im Werkzeugbau?

Werkzeugbau in Deutschland
2030 - Szenarien



Anwendung konturnahe Kühlung

- Beispiel Kühlkanalgeometrie in Spritzgießwerkzeugen
- konturnahe Gestaltung der Kühlkanäle
- Reduzierung Kühlzeiten
- bessere Bauteileigenschaften (Glanz, geringer Verzug)



Prof. Stefan Roth

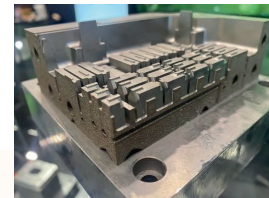
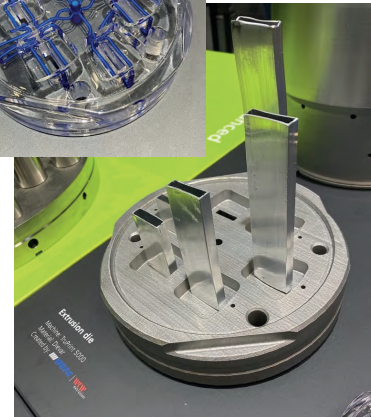
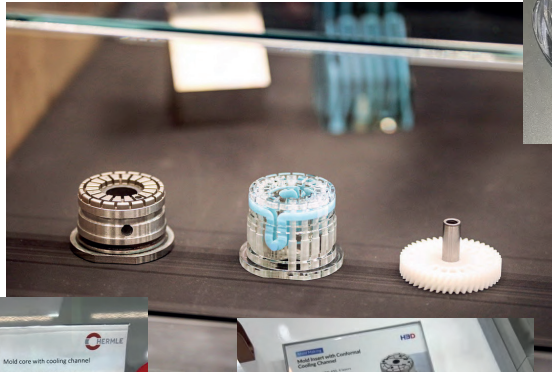
Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

AKT

Folie 18

Anwendung konturnahe Kühlung

- Beispiel Kühlkanalgeometrie in Spritzgießwerkzeugen



Prof. Stefan Roth

Forum

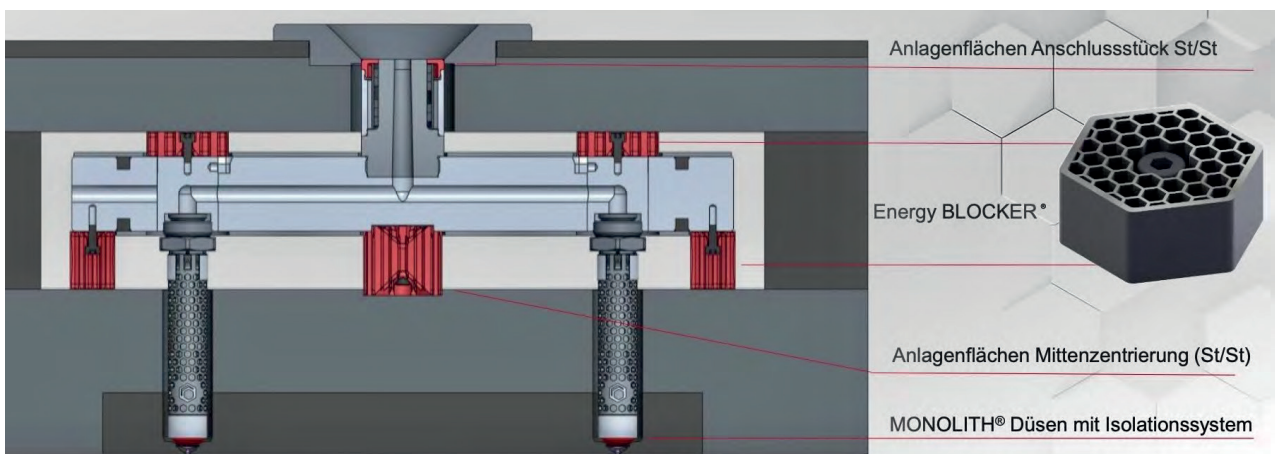


Folie 19

Beispiel Spritzgießwerkzeug

Heißkanalsystem

- Temperierung und Förderung der Schmelze von der Spritzgießmaschine zum Anguss (Bauteilkavität)
- Thermische Isolierung Heißkanal - Werkzeug



Bildquelle: Witosa

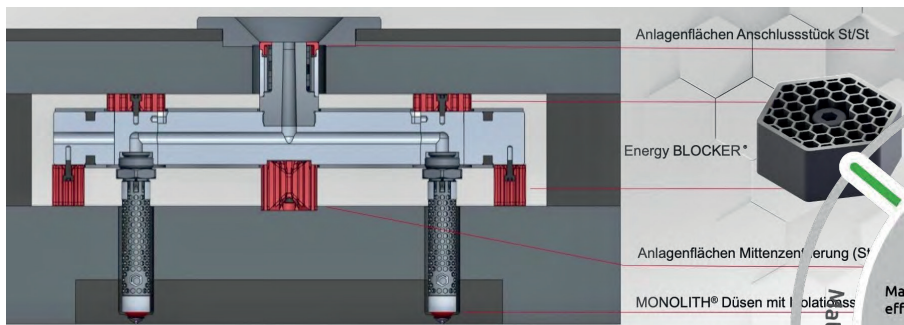
Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

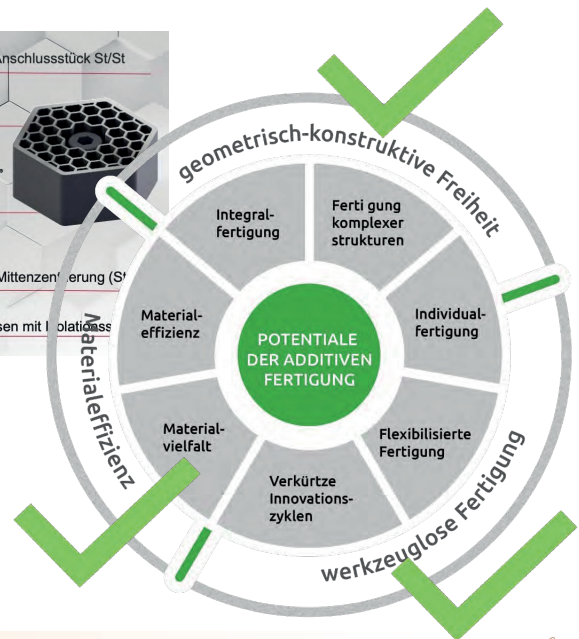


Folie 21

Heißkanalsystem additiv



- Mehrwert durch Additive Fertigung
- Präzision durch Nachbearbeitung



Bildquelle: Witosa

Prof. Stefan Roth

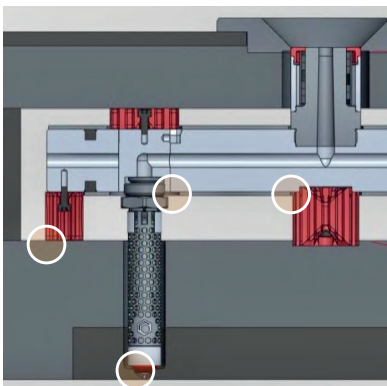
Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 22

Heißkanalsystem additiv

- Präzision durch Kombination der Verfahren Additiv - Subtraktiv



Bildquelle: Witosa

Prof. Stefan Roth

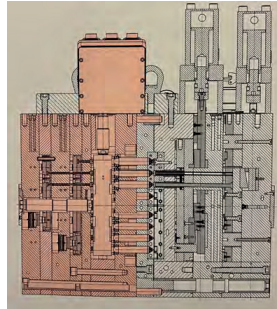
Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



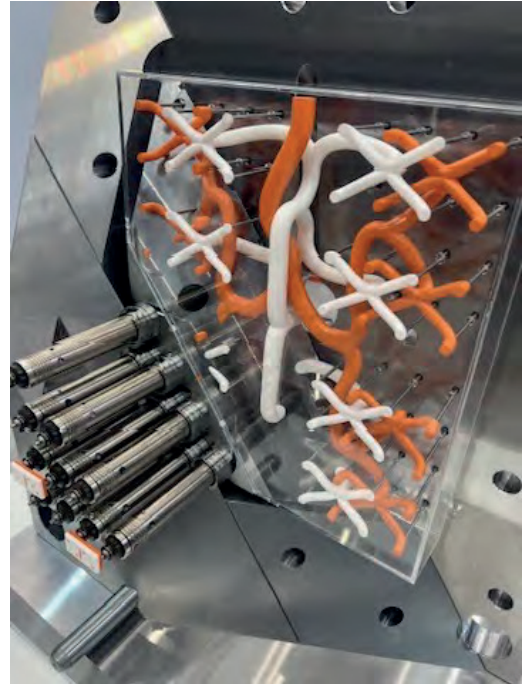
Folie 23

Heißkanalverteiler additiv gefertigt

- HASCO: „Domino“ Gemeinschaftsprojekt mit Arburg und Polar-Form, K-Messe 2025
- Additiv gefertigter Heißkanalverteiler
 - Optimale Schmelzebalancierung
 - Kompaktere Bauform → kleinere Düsenabstände → kleineres Werkzeug → kleinere SGM → geringere Kosten und höhere Bauteilqualität



Bildquelle: HASCO



Folie 24

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Projektrahmenbedingungen



Titel:	Extrusionswerkzeuge auf Basis von Additive Manufacturing - ExAM
Förderprogramm:	Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)
Projektträger:	DLR Projektträger
Forschungsvereinigung:	Forschungsgemeinschaft Deutscher Werkzeug- und Formenbauer e. V. (FDWF)
Vorhabensnummer:	01IF23360 N
Laufzeit:	01.08.24 – 31.07.26
Fördervolumen:	730.000 €



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ausgangssituation

➔ **Das Werkzeug ist der „Hebel“ für Ausbringung und Qualität in der Extrusion**

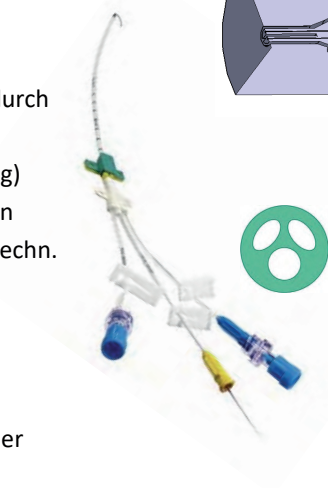
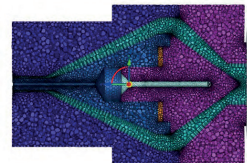
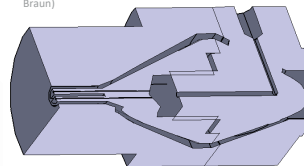
Lösungsansatz

- Optimierte Werkzeugauslegung durch geometrische Gestaltung (Schmelzekanal und Temperierung)
- Anwendungsfall Katheterextrusion (Medizin) und Profilverstellung (techn. Anwendung)

Forschungsziel

- Leitfaden zur Gestaltung von Extrusionswerkzeugen mit Hilfe der Additiven Prozesskette

Bildquelle: B.Braun Melsungen SE, IAPT, HS Schmalkalden (Tobias Braun)



Extrusionswerkzeuge auf Basis von Additive Manufacturing - ExAM

09.05.25 | Seite 26

Anwendungsbeispiel Zahnmedizin

- 3D-gedruckte Bohrschablone zur Implantatsetzung mit provisorischer Versorgung



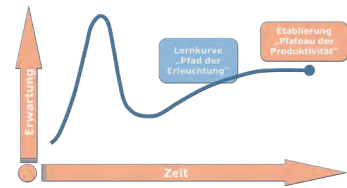
Bildquelle: Primeprint Collection Klinische Fälle, Firmeninformation Dentsply Sirona (2022), eigene Aufnahme



Folie 28

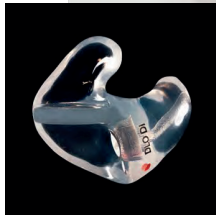
Anwendungsbeispiel Otoplastiken

- Anwendung Hörgeräte und individueller Gehörschutz
- Abformung des Gehörganges
- Erzeugung 3D Datensatz
- Herstellung der Otoplastik durch SL-Verfahren



Dreve – Digitale
Prozesskette AM

Bildquelle: dreve, specht hören
und sehen, eigene Aufnahme
formnext 2024



Prof. Stefan Roth

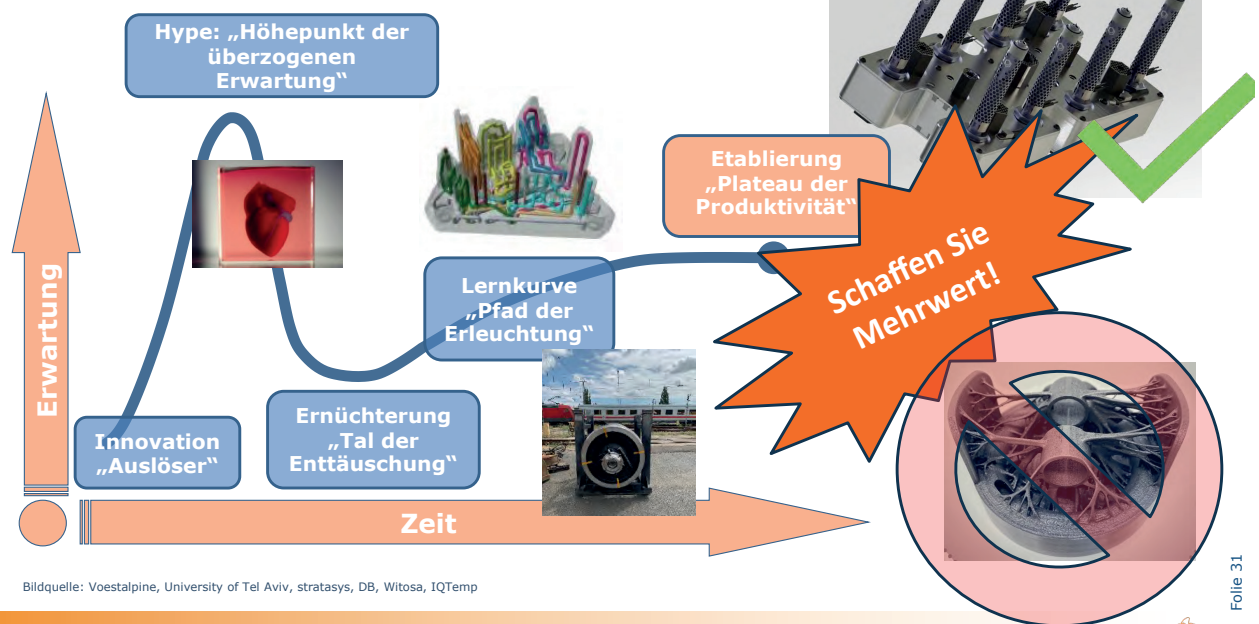
Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 29

3D Druck – Standortbestimmung & Ausblick

Zusammenfassung



Bildquelle: Voestalpine, University of Tel Aviv, stratasy, DB, Witosa, IQTemp

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 31

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

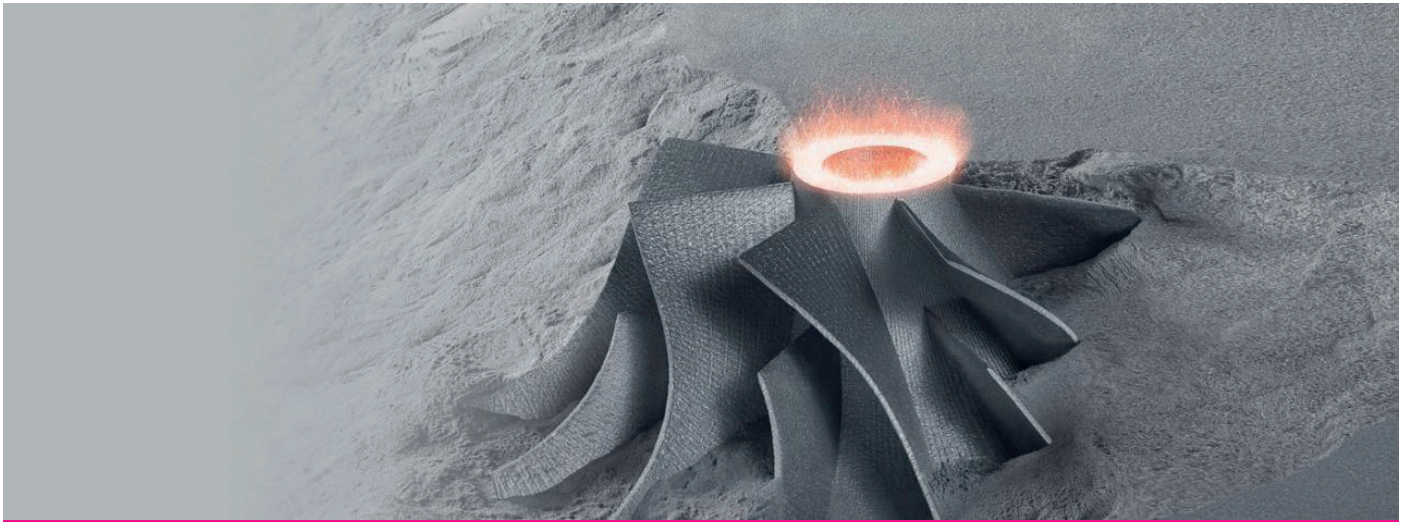
Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth
Professur Produktentwicklung /
Konstruktion
Angewandte Kunststofftechnik (AKT)

Hochschule Schmalkalden
Fakultät Maschinenbau
Blechhammer 4-8
98574 Schmalkalden

E-Mail: s.roth@hs-sm.de
www.hs-schmalkalden.de
www.angewandte-kunststofftechnik.de



Innovative Verfahren und Funktionalisierung



Air Technologies for Additive Manufacturing

New Purity Law for Metallic 3D Printing: Powder, Inert Gas, Precision



Agenda

Motivation

Lasers and Particles

Influence of process gas on:

- The machine
- The product
- The people

Challenges

Solutions

Summary



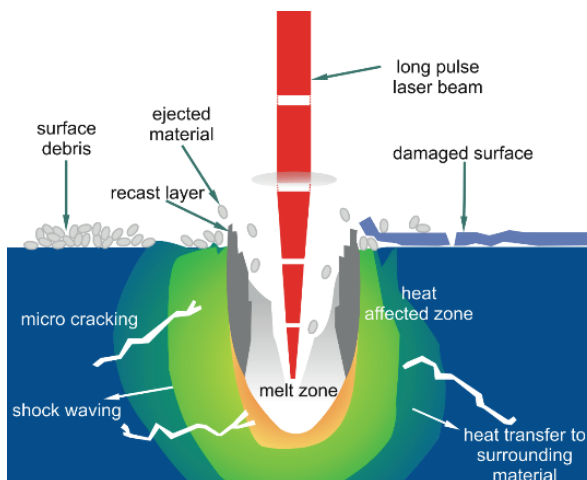
Purity Law = Process Control



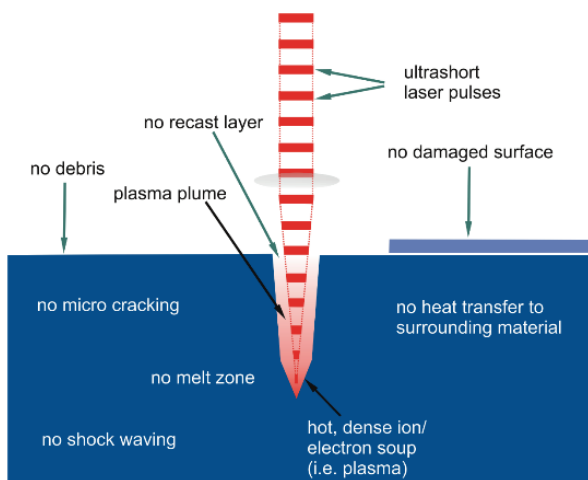
Airborne pollutants and their impacts



Application with long pulse laser (e.g. μs)



Application with ultra short pulse laser (e.g. fs)

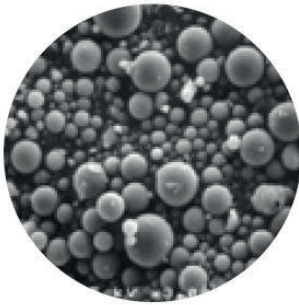


Short pulsed laser processes \rightarrow Nano particles around 100nm

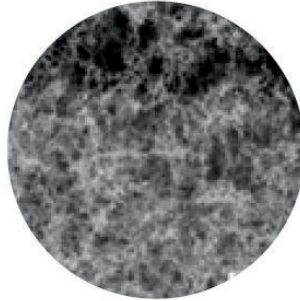


Particle sizes

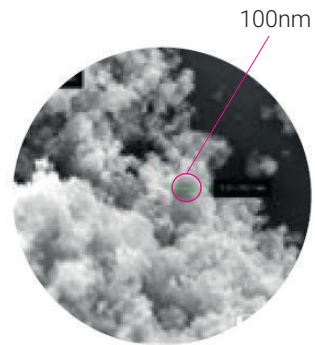
Laser application dust under microscope



Continuous wave laser (cw)
Nanosecond pulse (ns)



Pikosecond pulse (ps)



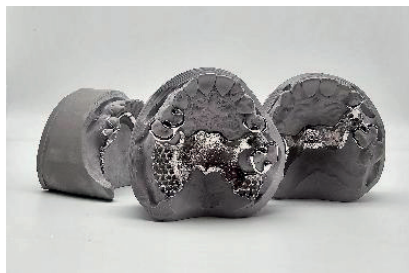
Femtosecond pulse (fs)

5



Process gas cleaning

Example applications and need for sufficient process gas clean



Process gas cleaning

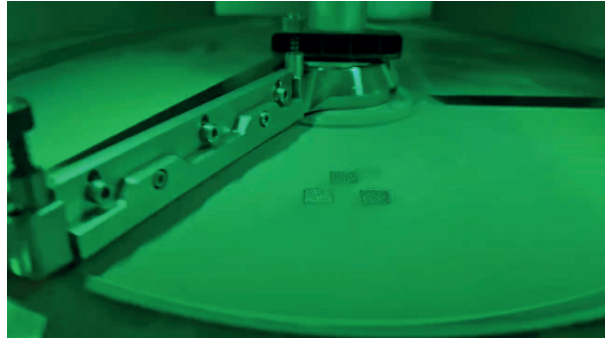
Example applications and need for sufficient process gas clean



Without homogeneous gas flow



With homogeneous gas flow



Homogenous gas flow keeps the build area clean and free of defects



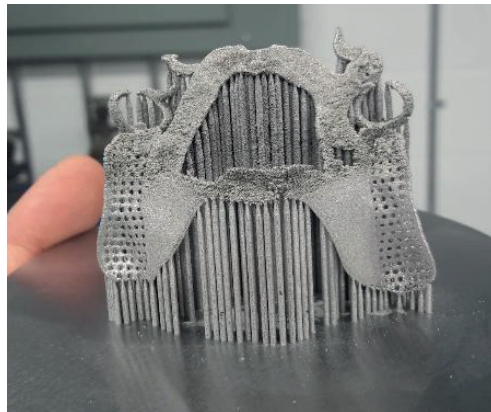
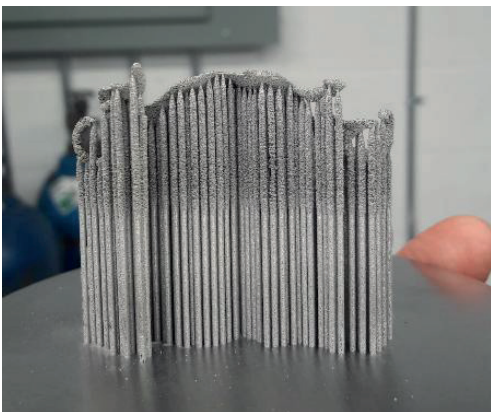
Process gas cleaning

Example applications



Why do you need gas cleaning in a PBF metal printer?

Error pattern: Complete failure of process cleaning during printing



Process gas cleaning

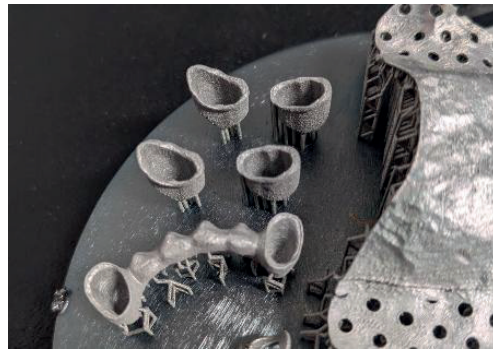
Example applications

one
lab



Why do you need gas cleaning in a PBF metal printer?

Error pattern: Complete failure of process cleaning during printing

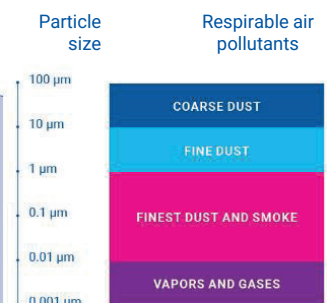
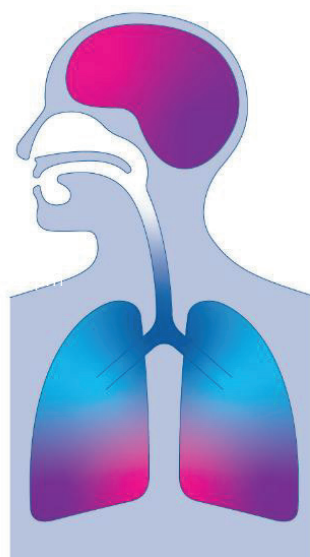


Material processing releases pollutants

Hazards for employees, machines, products, and the environment

Every day a person takes in food:
approx. 0.8 to 1.5 kg solid food
approx. 1.5 to 3.0 liters of liquid
approx. 20 to 30 kg air (~20 m³/d)

Air born particles are part of our daily consumption





Additive Manufacturing LPBF

Contact with powder, condensates and gases during Process

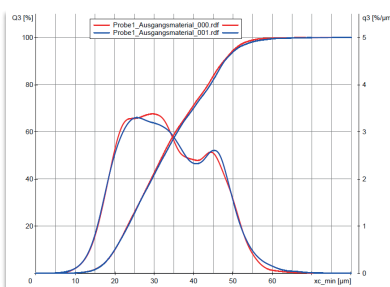
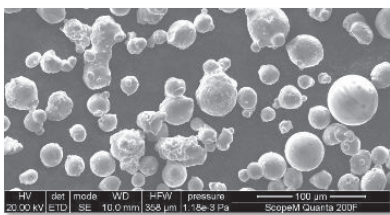


11

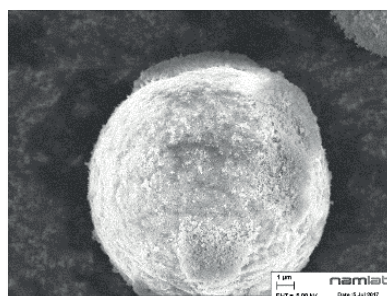
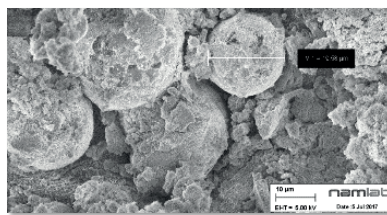


Dangers and health risks

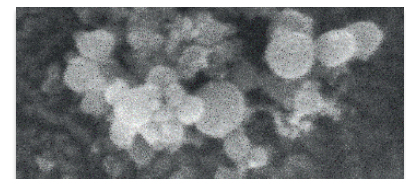
Particle sizes of metal powder and condensates



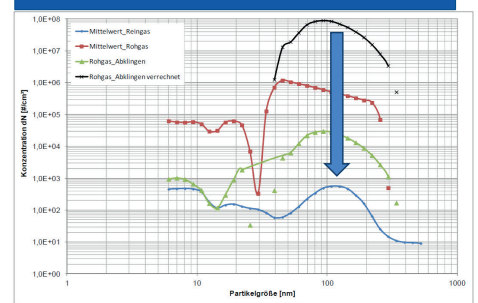
starting material : 5-60 μm



material from filter



amount ca. 100,000,000 particles/ cm^3



particle size distribution of raw gas before separator (6-300 nm)

12



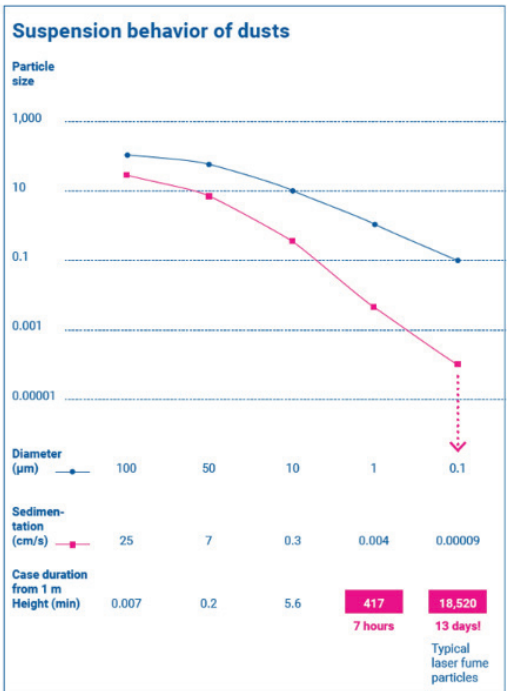


Particle sedimentation

Different density

Particles in the size as generated during additive manufacturing my settle never or after very long time.

... Though faster then with Stokes because of Cunningham: From the view of a particle with 100nm is the air not a continuum anymore.



13

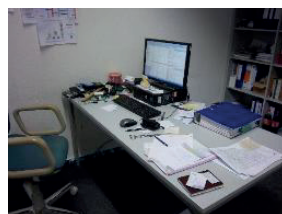


Dangers and health risks

Example of particles contamination



Metal powder



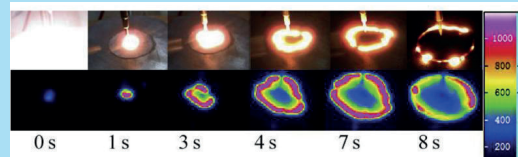
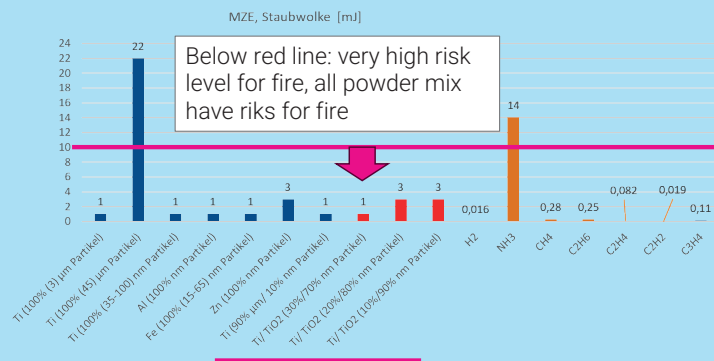
Condensates

14



Why does ULT not use Lime powder for inertization?

1. Even with lime powder **still risk of fire** during maintenance by customer



Flame distribution of 70% micro Ti/ 30% filter aid

Sources: Wu2009, Eckhoff2012, Yuan2017

2. With lime powder **risk of low quality** product because of oxidation during process

Lime powder can store hygroscopical water, which is released during the process and leads to oxidation of 3D Print product, reducing its quality. 1kg powder can contain 100g Water at standard room humidity levels

3. complex, **expensive** because of frequent waste removal and lime powder purchase

15



Process gas cleaning

AMF 200 scalable solution

Features:

- Long life time Filter >10.000 Working hours
- **Two Orders Less Maintenance -Built for Continuous Operation.**
- Modular, open, gas cleaning system
- Contamination-free disposal of the filter elements - high level of safety and containment when removing used filter cells
- Small footprint

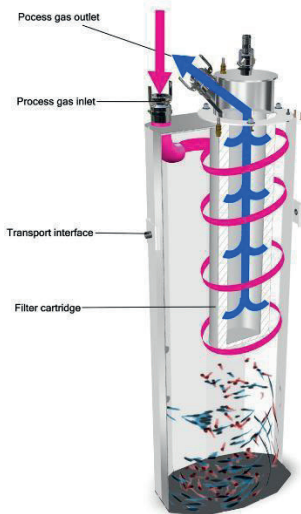


17



Process gas cleaning

AMF 200 gas cleaning – main filter cell



Filtration during process:

Raw gas (red) flows spirally along filter cell housing downwards to the dust collector

Direction of raw gas is switched and flows upwards inside the filter cell to the cartridge

Pre-selection of bigger particles when direction is switched

Remaining particles are filtered by cartridge, clean gas (blue) leaves the filter cell

18



Unique advantage of ULT Technology

ULT Long Life Capsule

- Always-on Safety & Productivity
- Contamination-free handling – protects people and processes
- Certified durability with sustainable performance
- Maximum process reliability due to robust filtration

ULT Safe Disposal Tech

- Zero risk – from operation to disposal
- Easy & safe to use
- Sustainable throughout the life cycle, simple disposal without further cost



19



Many thanks to the awarded Team „AMF200“



20



Thank you for your attention.



Vortrag

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

Additiv hergestellter Stich- und Schnittschutz auf textiler Basis

M. Eng. Fabian Jonas Müller



hs-mittweida.de

Agenda

1. Einführung in die Forschungsarbeit
2. Experimentelle Untersuchungen
3. Ergebnisse
4. Zusammenfassung und Ausblick

Einführung

seit 2014 Zunahme der Gewalttaten gegen
Polizeivollzugsbeamte (+38,5 %) und
registrierte Opfer (+69,7 %)

Rettungskräfte und Feuerwehr ebenfalls
betroffen

[1]

kontinuierlicher Anstieg von Messerangriffen
seit 2020

allein in Sachsen 2023

+21,9 % im Vergleich zum Vorjahr

[2]

Jahr	Gewalttaten mit Opfererfassung PVB					
	Fälle			PVB als Opfer		
	Anzahl	Veränderung		Anzahl	Veränderung	
		absolut	in %		absolut	in %
2014	33.478	1.548	4,9	62.286	3.680	6,3
2015	33.479	111	0,3	63.932	1.646	2,6
2016	36.755	3.276	9,8	71.315	7.383	11,5
2017	36.441	-314	-0,9	73.897	2.582	3,6
*) 2018	38.109	-226	4,6	79.164	5.267	7,1
**) 2019	38.635	526	1,4	80.084	920	1,2
2020	38.960	525	0,8	84.831	4.747	5,9
2020	39.649	689	1,8	88.626	3.795	4,5
2022	42.777	3.128	7,9	96.208	7.582	8,6
2023	46.218	3.441	8,0	105.708	9.500	9,9

[1]

Einführung

seit 2014 Zunahme der Gewalttaten gegen
Polizeivollzugsbeamte (+38,5 %) und
registrierte Opfer (+69,7 %)

Rettungskräfte und Feuerwehr ebenfalls
betroffen

[1]

kontinuierlicher Anstieg von Messerangriffen
seit 2020

allein in Sachsen 2023

+21,9 % im Vergleich zum Vorjahr

[2]

Jahr	Fälle mit mind. einem erfassten Opfer der genannten Berufsgruppen			Opfer		
	Polizeivollzugsbeamte (PVB)	Feuerwehr	Sonstige Rettungsdienste	Polizeivollzugsbeamte (PVB)	Feuerwehr	Sonstige Rettungsdienste
2018 **)	38.122	621	1.397	79.191	889	1.908
2019	38.635	683	1.575	80.084	941	2.149
2020	38.960	558	1.469	84.831	855	2.001
2021	39.649	510	1.650	88.626	744	2.339
2022	42.777	650	1.920	96.208	940	2.676
2023	46.218	687	2.050	105.708	1.069	***) 2.902

[1]

Einführung

seit 2014 Zunahme der Gewalttaten gegen Polizeivollzugsbeamte (+38,5 %) und registrierte Opfer (+69,7 %)

Rettungskräfte und Feuerwehr ebenfalls betroffen

[1]

kontinuierlicher Anstieg von Messerangriffen seit 2020

allein in Sachsen 2023
+21,9 % im Vergleich zum Vorjahr

[2]

Jahr	Fälle mit mind. einem erfassten Opfer der genannten Berufsgruppen			Opfer		
	Polizeivollzugsbeamte (PVB)	Feuerwehr	Sonstige Rettungsdienste	Polizeivollzugsbeamte (PVB)	Feuerwehr	Sonstige Rettungsdienste
2018 **)	38.122	621	1.397	79.191	889	1.908
2019	38.635	683	1.575	80.084	941	2.149
2020	38.960	558	1.469	84.831	855	2.001
2021	39.649	510	1.650	88.626	744	2.339
2022	42.777	650	1.920	96.208	940	2.676
2023	46.218	687	2.050	105.708	1.069	***) 2.902

[1]



Erhöhter Bedarf an persönlicher Schutzausrüstung für Einsatzkräfte und Sicherheitspersonal

Einführung

Erhöhter Bedarf an persönlicher Schutzausrüstung für Einsatzkräfte und Sicherheitspersonal



Defizite im Stich- und Schnittschutz



Gelenke, der Hals und der Leistenbereich oft ungeschützt oder nur unzureichend gesichert



vergleichsweise hohes Eigengewicht

Einführung



Defizite im Stich- und
Schnittschutz



Gelenke, der Hals und der
Leistenbereich oft ungeschützt
oder nur unzureichend gesichert



vergleichsweise hohes
Eigengewicht



[3]

Einführung



Defizite im Stich- und Schnittschutz



Forschungsziel

Entwicklung eines leichten und flexiblen Schutzsystem mit
wirksamem Schutz gegen Stich- und Schnittwaffen auf Basis eines
UHMWPE Textils mithilfe additiver Fertigung

Einführung

Entwicklung eines leichten und flexiblen Schutzsystem mit wirksamem Schutz gegen Stich- und Schnittwaffen auf Basis eines UHMWPE Textils mithilfe additiver Fertigung



Anforderungen

Stichfestigkeit: 150 N
gemäß DIN EN 388

Ablösekraft: 30 N
senkrecht

hohe
Flexibilität

Schutzstrukturgeometrie
mit Spaltmaß ≤ 1 mm

bei 60 °C
waschbar

Schnittfestigkeit:
30 N gemäß DIN
EN 388

maximales
Flächengewicht von
2.000 g/m²

Experimentelle Untersuchungen

Materialauswahl

Vorausauswahl anhand von spezifischen Materialeigenschaften

Materialeigenschaften

- hohes Energieabsorptionsvermögen
- hohe Oberflächenhärte
- starke Schichthaftung
- Wärmeformbeständigkeit über 60°C
- chemische Beständigkeit
- UV-Beständigkeit
- Druckbarkeit



Materialien

- PLA
- PETG
- ABS
- ASA
- PA
- PP
- PC
- GreenTec Pro
- PCTG
- HiPS
- HDPE
- TPU
- TPS

Experimentelle Untersuchungen

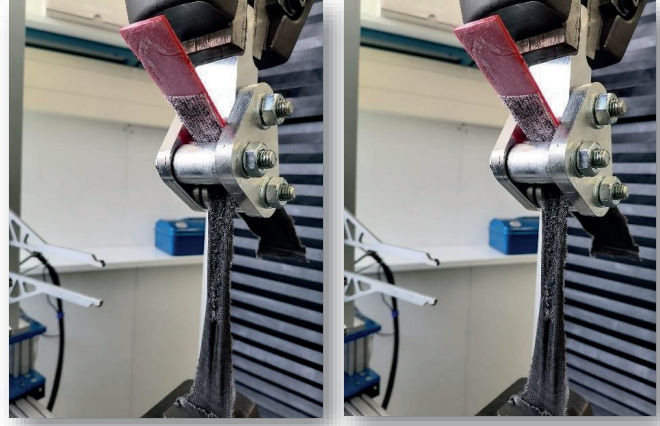
Materialauswahl

Vorauswahl anhand von spezifischen Materialeigenschaften

Quantitative Bewertung der Haftung

DIN EN 1464 „Klebstoffe – Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen – Rollenschälversuch“

Geeignete Werkstoffe: PP, TPU, TPS als Haftwerkstoffe



11 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Materialauswahl

Vorauswahl anhand von spezifischen Materialeigenschaften

Quantitative Bewertung der Haftung

DIN EN 1464 „Klebstoffe – Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen – Rollenschälversuch“

Geeignete Werkstoffe: PP, TPU, TPS als Haftwerkstoffe

Materialkombination von Haftwerkstoff und Schutzwerkstoff

für weitere
Untersuchungen
verwendet:

- PP
- PP – GF
- PP – CF
- TPS – PC-Blend CF

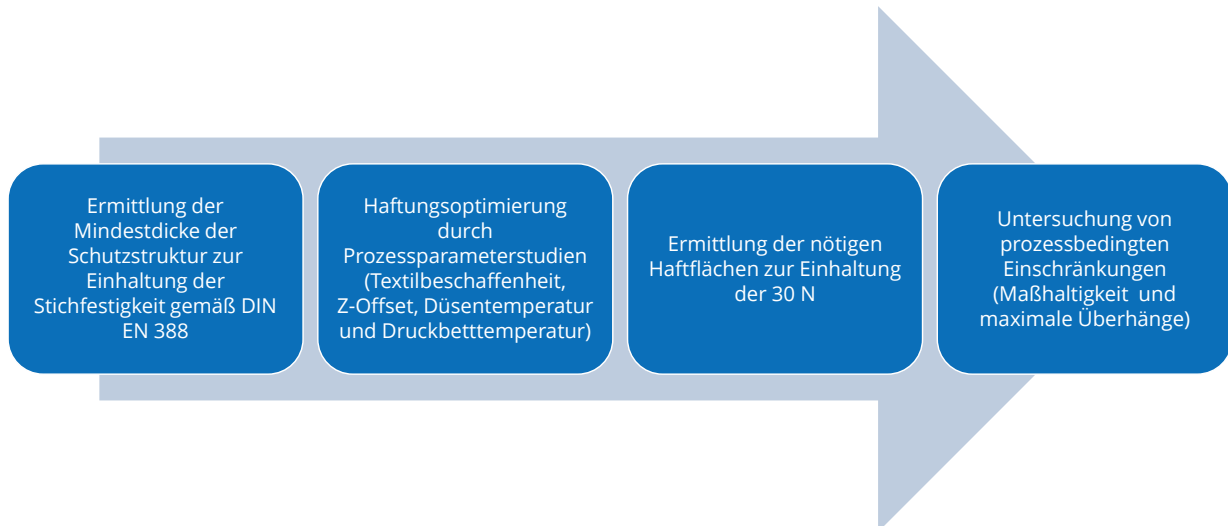
12 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Voruntersuchungen



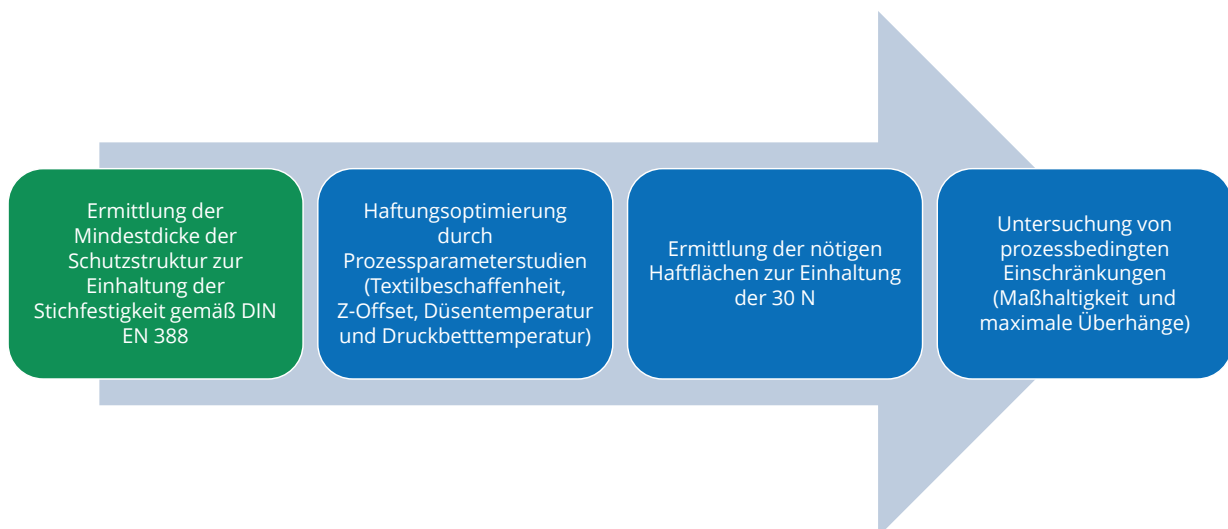
13 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Voruntersuchungen



14 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

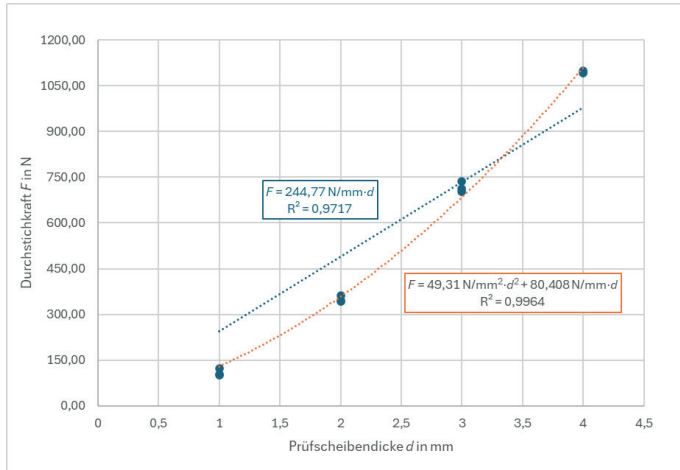
Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Ermittlung der Mindestdicke

Messung der Kräfte, die zum Durchdringen notwendig sind



Aufzeichnung der Maximalkräfte zum Durchdringen der Proben

Erstellung einer linearen und quadratischen Regression

Berechnung der Mindestdicke nach quadratischer Regression

15 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Voruntersuchungen

Ermittlung der Mindestdicke der Schutzstruktur zur Einhaltung der Stichfestigkeit gemäß DIN EN 388

Haftungsoptimierung durch Prozessparameterstudien (Textilbeschaffenheit, Z-Offset, Düsentemperatur und Druckbetttemperatur)

Ermittlung der nötigen Haftflächen zur Einhaltung der 30 N

Untersuchung von prozessbedingten Einschränkungen (Maßhaltigkeit und maximale Überhänge)

16 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Haftungsoptimierung

Spannvorrichtung
für Zugproben



17 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

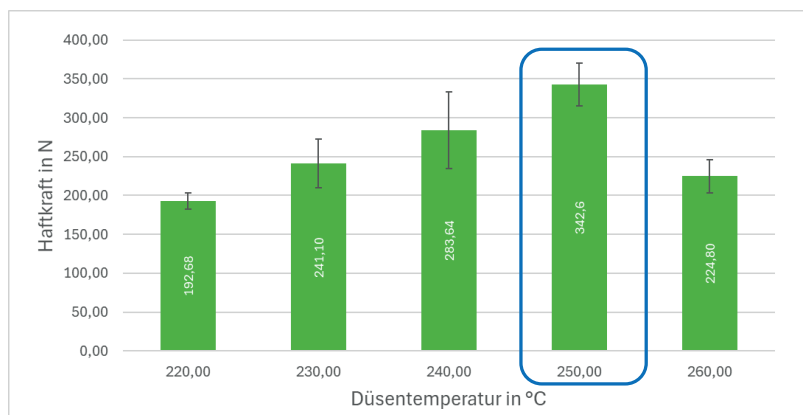
Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften

 HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Experimentelle Untersuchungen

Haftungsoptimierung

Beispiel: Einfluss der Düsentemperatur



0,5 mm
80 °C

18 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften

 HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Experimentelle Untersuchungen

Voruntersuchungen

Ermittlung der Mindestdicke der Schutzstruktur zur Einhaltung der Stichfestigkeit gemäß DIN EN 388

Haftungsoptimierung durch Prozessparameterstudien (Textilbeschaffenheit, Z-Offset, Düsentemperatur und Druckbetttemperatur)

Ermittlung der nötigen Haftflächen zur Einhaltung der 30 N

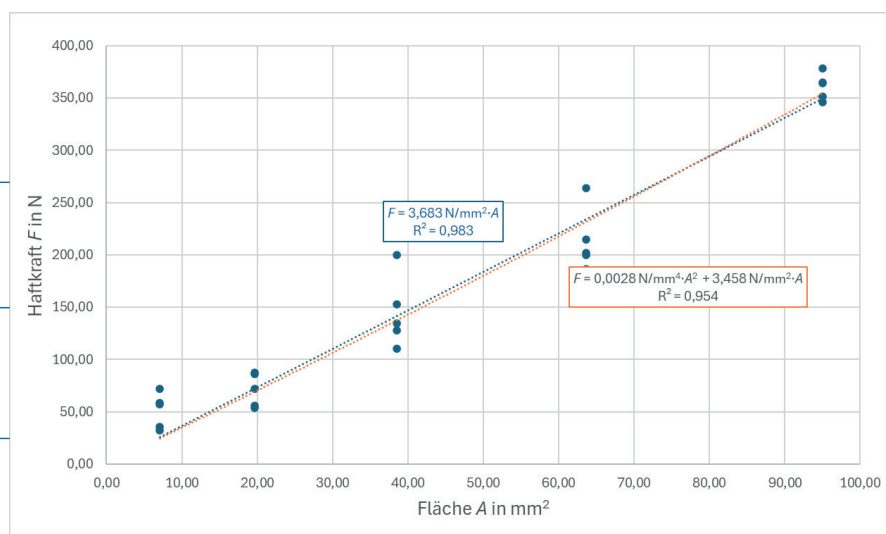
Untersuchung von prozessbedingten Einschränkungen (Maßhaltigkeit und maximale Überhänge)

Experimentelle Untersuchungen

Ermittlung der nötigen Haftflächen

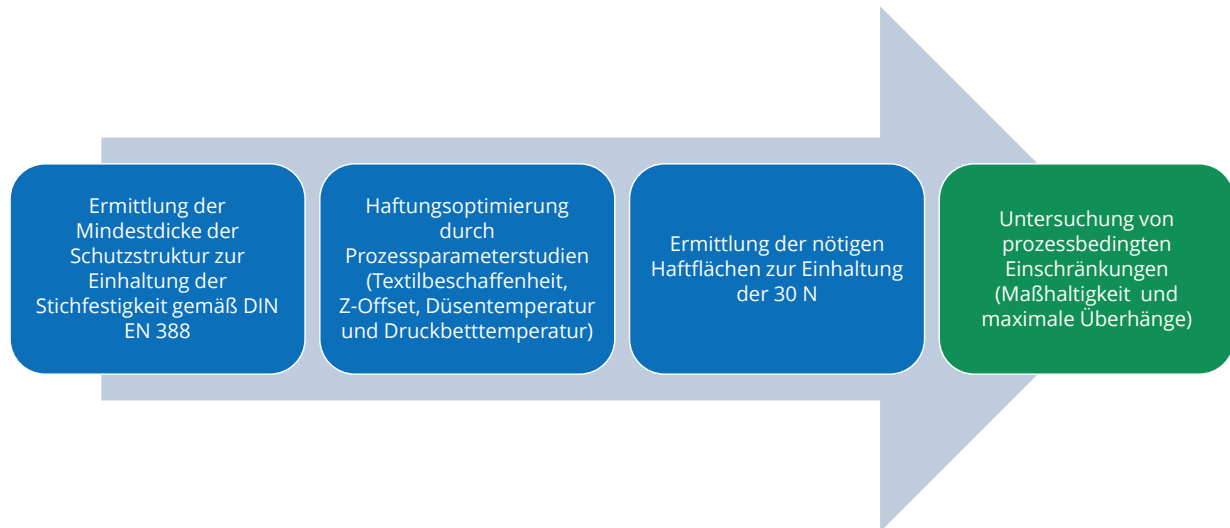
5 Proben je 3, 5, 7, 9 und 11 mm Durchmesser

Lineare Regression zur Berechnung der Mindesthaftfläche



Experimentelle Untersuchungen

Voruntersuchungen



21 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Prozessbedingte Einschränkungen

Minimaler Spalt



22 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

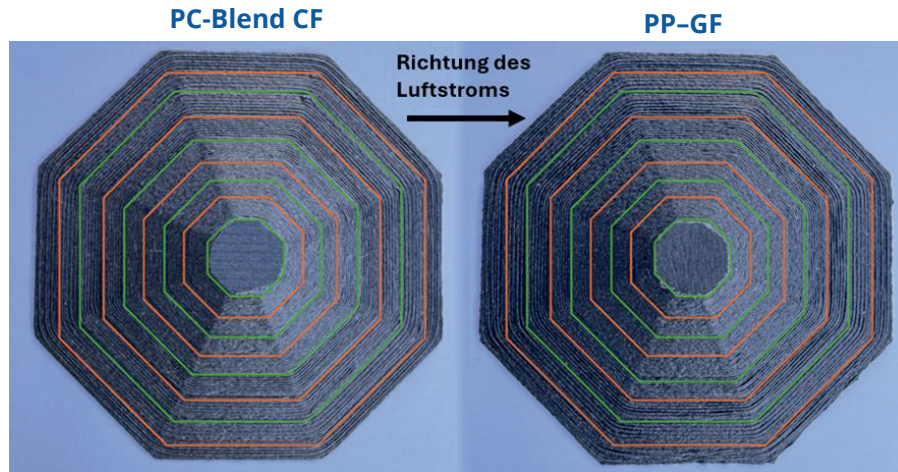
Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Experimentelle Untersuchungen

Prozessbedingte Einschränkungen

Überhänge



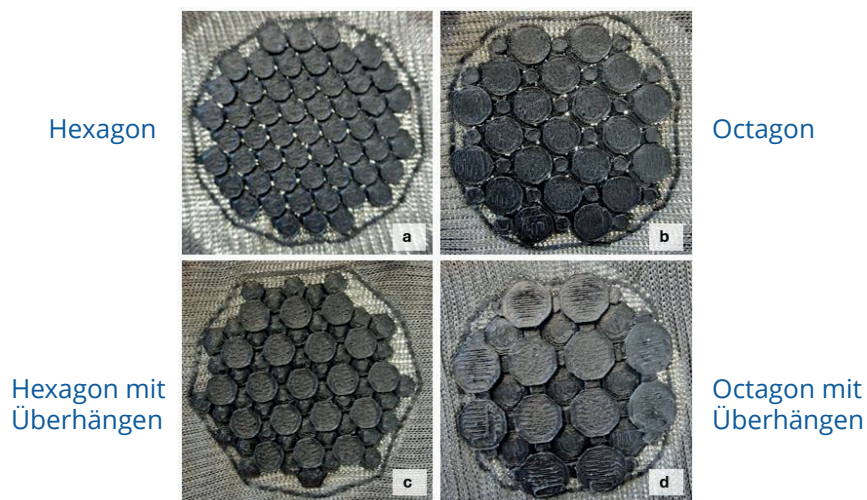
23 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften

**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**

Experimentelle Untersuchungen

Entwicklung einer Schutzstruktur



24 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften

**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**

Ergebnisse

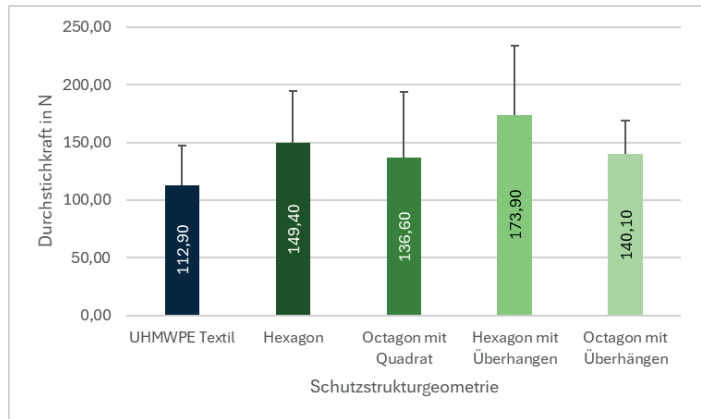
Mindestdicken für bspw. PC-CF von 0,91 mm und für PP-GF 1,10 mm

Haftkraft von Zylindern (\varnothing 10 mm) durch die gezielte Optimierung der Prozessparameter von ursprünglich 229,88 N auf 344,53 N gesteigert

Materialspezifische Haftflächen zur Einhaltung der gewünschten 30 N Haftkraft mittels linearer Regression ermittelt (bspw. für PP-GF 7,84 mm², TPS 9,38 mm²)

Kleinstmögliche Spaltmaße sowie maximale Überhänge für PC-CF und PP-GF bestimmt

minimale Durchstichfestigkeiten der einzelnen Geometrien ermittelt



25 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften
HOCHSCHULE MITTWEIDA

Ergebnisse

Ausschluss der Materialkombination von TPS-PC Blend CF



TPS-PC-Blend CF führte zu deutlichen thermischen Schäden am Textil Erkennbare an der Bildung von Löchern

signifikant reduzierte Reißfestigkeit des Textils

Herstellbarkeit ohne Qualitätsverlust nicht gegeben

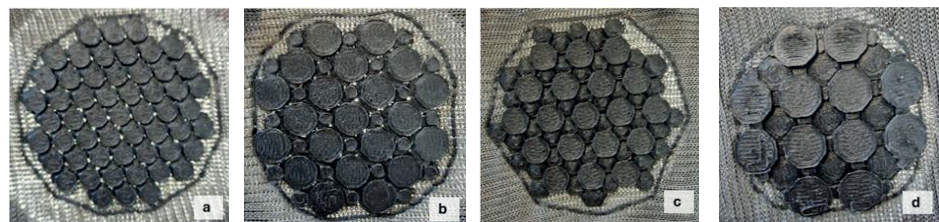
PP-GF als Haft- und Schutzmaterial

26 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften
HOCHSCHULE MITTWEIDA

Ergebnisse

		Hexagon		Octagon mit Quadrat		Hexagon mit Überhängen		Octagon mit Überhängen	
Kriterium	Gewichtung	Bewertung	Teilnutzwert	Bewertung	Teilnutzwert	Bewertung	Teilnutzwert	Bewertung	Teilnutzwert
Durchstichfestigkeit	0,40	3	1,20	1	0,40	4	1,60	2	0,80
Flexibilität	0,25	3	0,75	2	0,50	4	1,00	1	0,25
Gewicht	0,15	3	0,45	2	0,30	1	0,15	4	0,60
Fertigung	0,10	2	0,20	3	0,30	1	0,10	4	0,40
Abdeckungsrate	0,10	2	0,20	3	0,30	4	0,40	4	0,40
Gesamtnutzwert A_i			2,80		1,80		3,25		2,45



Zusammenfassung und Ausblick

Schutzsystem, das die Anforderungen der Leistungsstufe 4 der Durchstichfestigkeit gemäß DIN EN 388 erfüllt

- Verwendung des FLM-Verfahrens
- auf Basis eines UHMWPE Textils
- PP-GF gedruckte Schutzstrukturen
- gute Anpassbarkeit an anatomisch kritische Bereiche wie Hals, Leiste und Gelenken

Ausblick

- Durchführung von Waschtests
- gezielte Tests zur Schutzwirkung gegen Injektionsnadeln nach VPAM KDIW 2004
- Erstellung eines T-Shirts zur Untersuchung von Komfort, Atmungsaktivität und Beweglichkeit
- optimierte Geometrie (größere Strukturen für unflexible Stellen, kleinere für geringe Biegeradien)
- alternative Fixierungsmethoden wie Unterdrucksysteme oder mechanische Spannplatten

Vielen Dank!

Fabian Jonas Müller, M. Eng.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

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

muelle24@hs-mittweida.de



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

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

Quellen

- [1] Bundeskriminalamt, „bka.de,“ [Online].
https://www.bka.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Jahresberic hteUndLagebilder/GewaltGgenPVB/GewaltGegenPVBBundeslagebild2023.p df?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 26.11.2024].
- [2] Polizei Sachsen, Jahresüberblick 2023, [online].
<https://www.polizei.sachsen.de/de/dokumente/Landesportal/XPkSXJahresXberblickX2023.pdf> [15.01.2025].
- [3] Armadillo Tex GmbH, „armadillo-tex.com,“ [online].
<https://www.armadillo-tex.com/shop-default/produkt/stichschutzweste-profi/> [15.04.2025].

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

Funktionalisierung additiv gefertigter Bauteile mittels Wire Encapsulation Additive Manufacturing (WEAM)

Funktionsintegration

Mechanisch

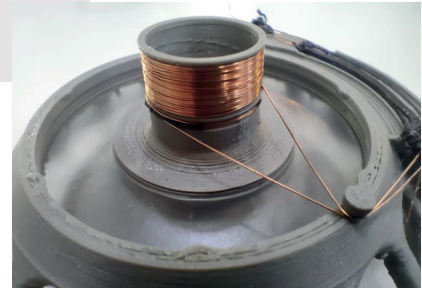
- Bewegungsstrukturen (z. B. integrierte Gelenke oder flexible Bereiche)
- Montagepunkte (z. B. Bohrungen oder Clips)
- Fluidkanäle (z. B. für Kühlung oder Luftführung)
- Strukturoptimierung / Leichtbau (z. B. Gitterstrukturen oder Topologieoptimierung)



Funktionsintegration

Elektrisch

- Sensoren (z.B. Näherungssensoren oder Dehnungsmessstreifen)
- Aktoren (z.B. adaptive Strukturen durch FGL-Draht)
- Antennen (z.B. für RFID oder NFC)
- Heizstrukturen (z.B. Schaltbare Steifigkeiten im Thermoplast oder Flächenheizungen)



Seite

Additive Verfahren zur elektrischen Funktionsintegration

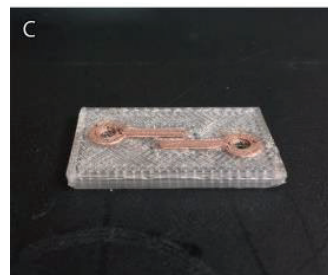
Filamente mit leitenden Additiven

- Niedrige Material- und Anlagenkosten
- geringe Leitfähigkeit

leitende Tinten und Pasten (Jet-Dispens und Aerosol Druck)

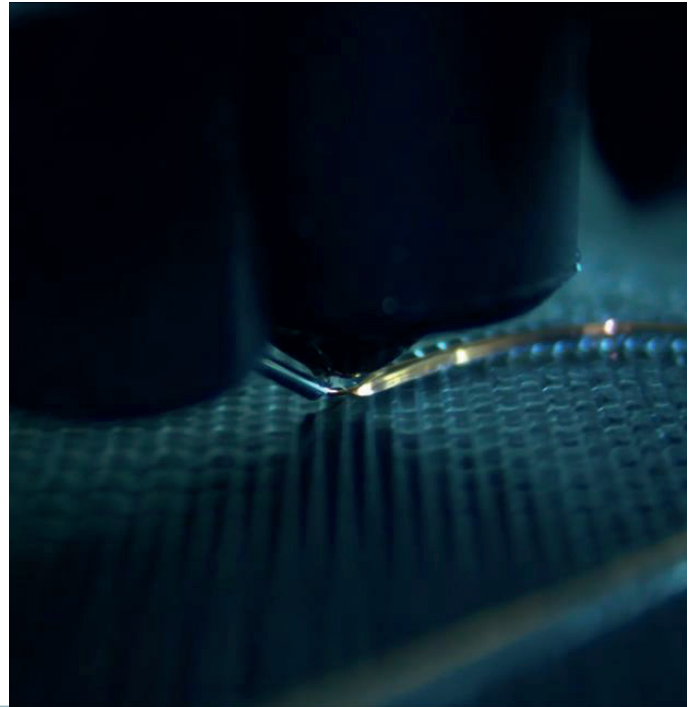
- Minimale Featuregrößen von 10 μm
- Aufhärten/Sintern nötig
- hohe Materialkosten

Drahtdruck



Drahtdruck

- Bessere elektrische Eigenschaften
 - Bessere mechanische Eigenschaften
 - Deutlich preisgünstigere Materialkosten
 - Große Materialfreiheit
 - Geringere Präzision gegenüber Jet-Dispens und Aerosol Druck (50µm Drähte)
 - Hoher Steuerungsaufwand
- Ein Vertreter ist das WEAM-Verfahren



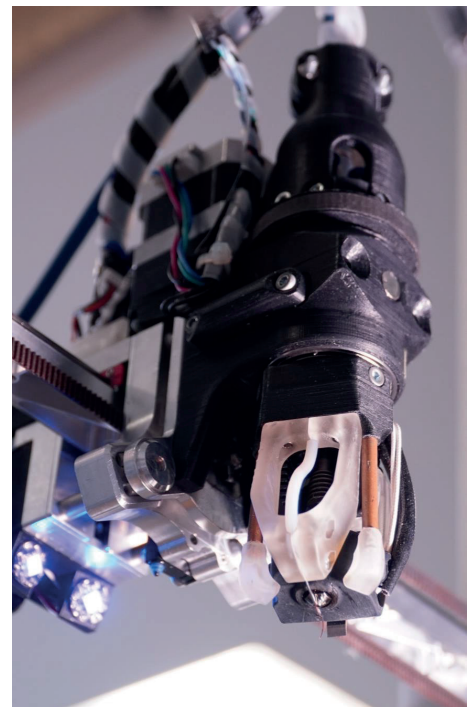
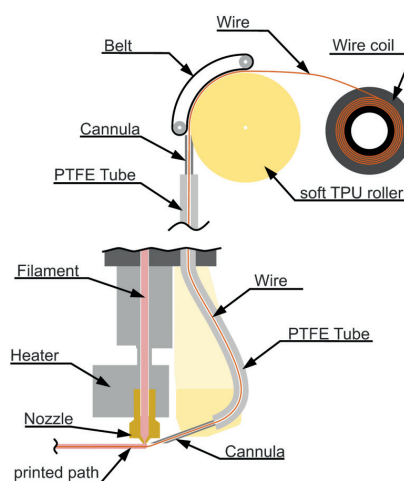
Seite

Fraunhofer
IWU

WEAM Technologiebeschreibung

Funktionsweise

Das WEAM-Verfahren basiert auf der Fused Filament Deposition und ermöglicht das vollautomatisierte Ablegen und Anbinden verschiedenster Leitungselemente auf unterschiedlichen Substraten. Dabei kommen Standard-Einzeldrähte oder Litzen zum Einsatz, die unterhalb einer Extrusionseinheit zugeführt und durch ein Mantelpolymer elektrisch isoliert und mechanisch angebunden werden.



Seite 6

29.09.2025

© Fraunhofer IWU

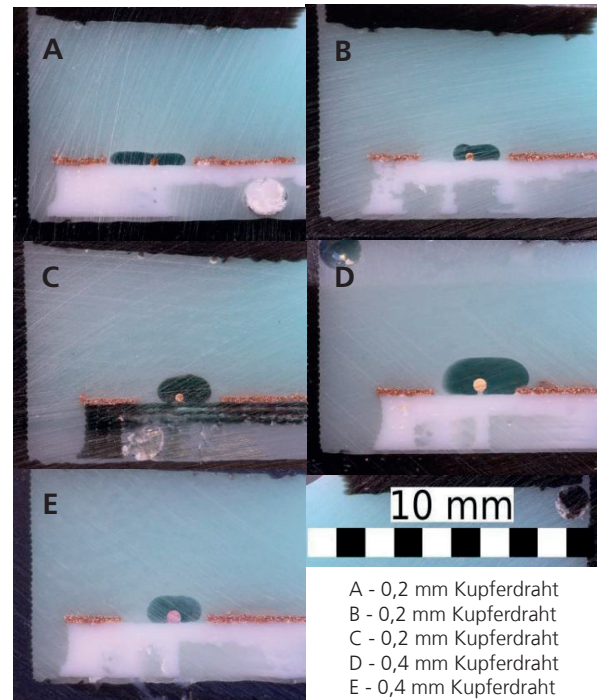
Fraunhofer
IWU

WEAM

Prozesscharakteristik

Erzielbare Querschnitte:

- Draht wird durch das Polymer auf den Untergrund aufgedrückt
- Draht ordnet sich **mittig an der Unterseite** der Extrusion an
- Mantelmaterial haftet am Draht an und **umschließt** diesen
- **Variation möglich** betreffend:
 - Leiterstärke
 - Mantelstärke
 - Mantelhöhe / -breite

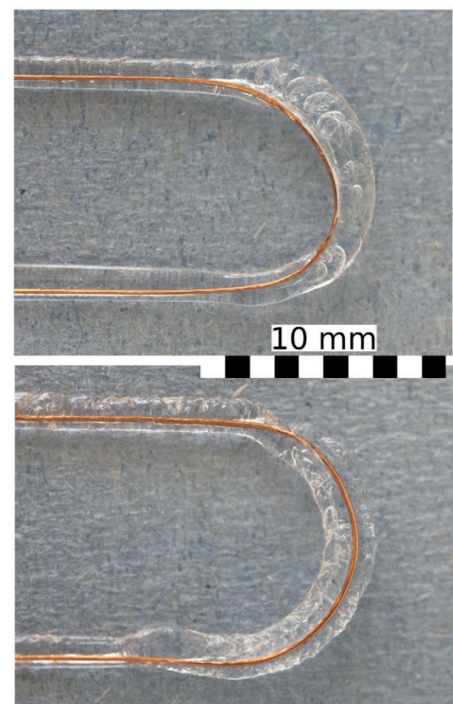


WEAM

Prozessabweichungen / Prozessgeschwindigkeit

Positionsabweichung von Drähten im viskosen Polymer:

- Bei Richtungsänderung kommt es zur **Abweichung der Drahtposition** durch Eigensteifigkeit des Materials
- Erstarrung des Polymers ist zeitabhängig
- Durch **Anpassung der Vorlaufposition** kann die Viskosität des Mantels gezielt genutzt werden, um die Drahtposition zu optimieren
- Anpassung erfolgt in einem **automatisierten Script**

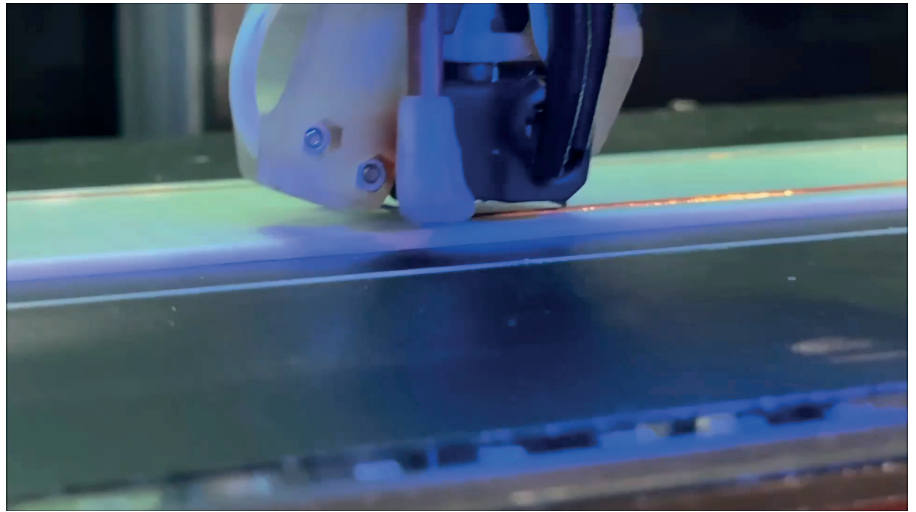


WEAM

Prozessabweichungen / Prozessgeschwindigkeit

Druckprozess (Formnext 2022):

- Aufdruck auf **PLA-Probenkörper** zu Demonstrationszwecken
- **Ø 0,2 mm** Kupferlackdraht mit **PLA** Mantelmaterial
- Prozessgeschwindigkeit: **50mm/s**
- Abgelegte Drahtlänge **1,2m**

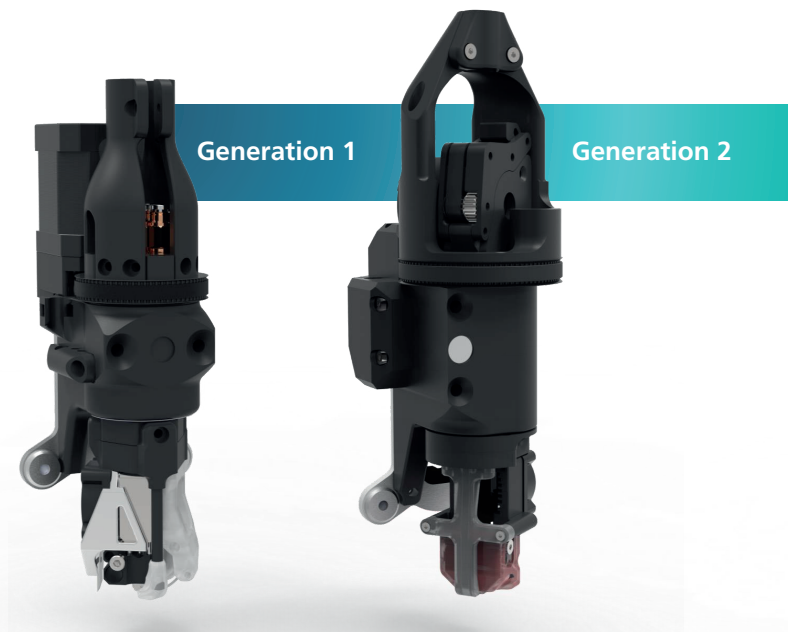


WEAM

Anlagentechnik

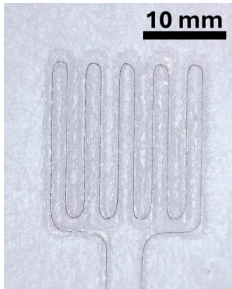
Werkzeugkopf im Toolchanger-System

- Geteiltes System mit Endeffektor und Zuführsystem
- **Werkzeugkopf:**
endlos rotierbar | 60mm breit | <500g
- **Zuführeinheit:**
statisch | Bereitstellung von Draht, Polymer |
elektrische Schnittstelle zur Anlage
- Arbeitstemperaturen bis **500°C**
- Zuführung von Drähten **Ø 0,05 – 0,8 mm**
- Ablagegeschwindigkeit bis **180mm/s**



WEAM

Ausgewählte Projektergebnisse



Dehnungsmesstreifen auf Trägervlies / integriert in Klebeschicht

50 µm NiTi Draht mit TPU auf Glasfaservlies zur Überwachung von Klebeverbindungen



Individualisierte Spulen-Geometrien

Induktionsspulen und Antennenstrukturen mit individualisierter Geometrie ab Stückzahl 1



Beheizte Linsenhalter

Teleskop-Linsenhalter mit integriertem Heizdraht um die Linsenfassung zur Verhinderung des Beschlagens der Linse bei hoher Luftfeuchtigkeit



Vollautomatisiert gefertigte Automobil-Kabelsätze

Anheften von bis zu 4 0,35 mm² FLRY-Kabeln durch spottweises umspritzen am Bauteil sowie anschließender Kontakierung

Seite 13

29.09.2025

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer
IWU

WEAM

Technologieausblick

WEAM ist im Labormaßstab validiert,

ABER wo liegen die Grenzen der Übertragbarkeit?

Aktuelle Entwicklungsfelder

- Miniaturisierung: Drahtdurchmesser Ø 50 µm um kleiner
- Leistungssätze: Leiterdurchmesser Ø 1 – 4 mm
- Funktionsmaterialien:
 - Optische Faser | Verstärkungsfaser | Schläuche
- Matrixmaterialien:
 - Harze | Keramiken | Klebstoffe | Pasten



Seite 15

29.09.2025

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer
IWU

Anwendungsfall Orthetik / Projekt AdaptBrace

AdaptBrace

Ziel

Produkt

- Patientenspezifisch
- Reversible Formänderung für sich verändernde Randbedingungen
- Thermoformen ohne Zeitlimits
- Integrierte Polster-Strukturen

Prozess

- Hoher Automationsgrad
- Kurze Produktionszeit



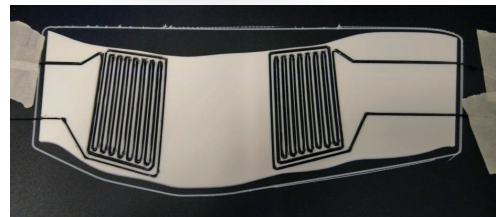
AdaptBrace

Idee

- Thermoplast Backbone mit hoher Steifigkeit bei gleichzeitig niedriger Erweichungstemperatur (Höchsttemperatur zur Vermeidung von Verbrennungen nach ISO13732-1: 60°C unter 1 min; 48°C unter 10min)
- Integration einer weichen Polster-Schicht zur Erhöhung des Tragekomforts sowie der Isolation während der thermischen Anformung
- Fertigung im zweidimensionalen Zustand dadurch optimale Festigkeit in der Schicht im FFF-Prozess, geringer Platzbedarf für Versand
- Heizmäander aus NiCr-Draht in 6 Zonen, zur gezielten Erweichung einzelner Bereiche mit maximaler Spannung von 60V DC (IEC 60479), gefertigt mit WEAM-Verfahren

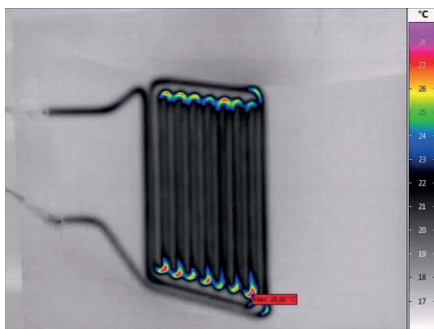


Copyright: Franziska Hagenauer

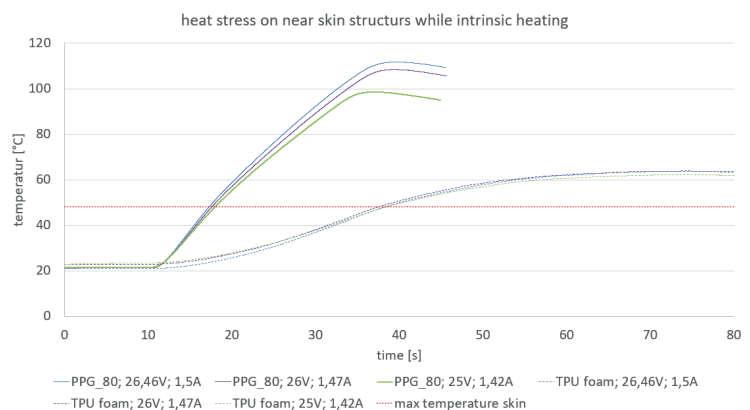


AdaptBrace

Thermisches Design



➤ Wärmeverteilung im Heizfeld



➤ Wärmeverluste durch Polsterstruktur

AdaptBrace

Material

Backbone

- Raise Premium PLA (Polylactide - PLA)
 - Glasübergangstemperatur 50-60°C
- Facilan Ortho (Polyester - PE)
 - Wärmeformbeständigkeitstemperatur 57°C
- Facilan C8 (PE-PLA-Blend)
 - Wärmeformbeständigkeitstemperatur 55°C

Polster Schicht

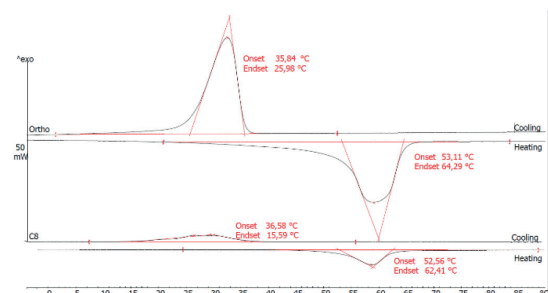
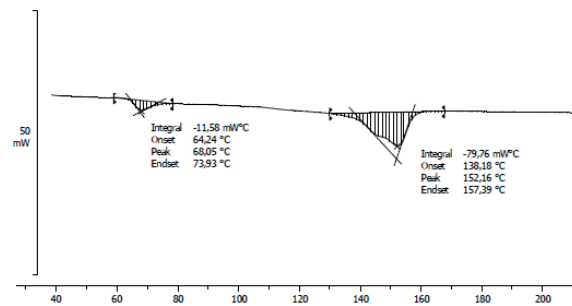
- Colorfabb Varioshore TPU (aufschäumendes Thermoplastisches Polyurethan)
 - Shore Hardnes 92A – 55A
 - Gedruckt mit Gyroid Infill

AdaptBrace

Material

DSC Messungen (DIN EN ISO 11357-3)

- Raise Premium PLA
 - Phasenumwandlung bei 68°C
- Facilan Ortho und C8
 - Phasenumwandlung bei 60°C
 - Erstarrung versetzt unter 40°C

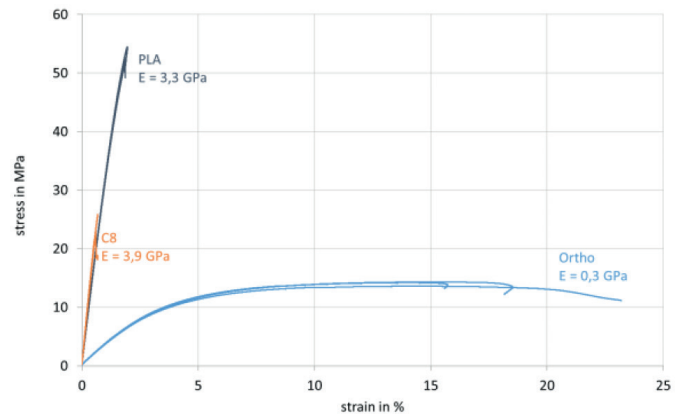


AdaptBrace

Material

Zugversuch (DIN EN ISO 527-2:2012)

- PLA und Facilan C8
 - E-Modul > 3,0 GPa
 - Beide Materialien nutzbar
- Facilan Ortho
 - Deutlich flexibler
 - Ausgeschlossen von zukünftigen Versuchen

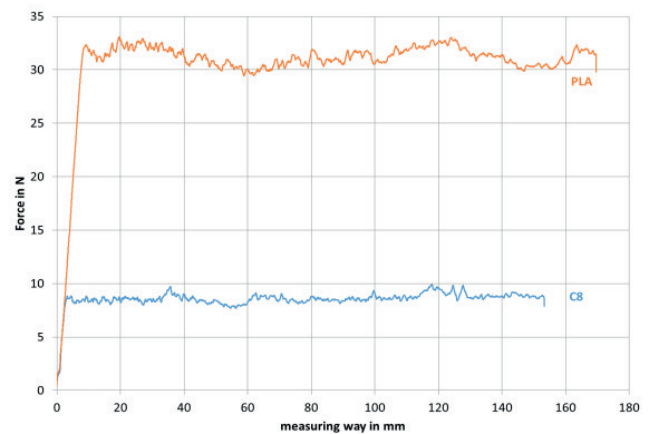
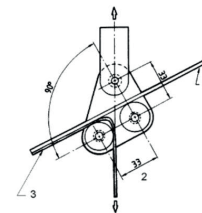


AdaptBrace

Material

Rollschälversuch (DIN EN 1464:2010)

- Proben aus aufgeschäumten TPU mit aufgedrucktem PLA und Facilan C8
 - PLA zeigt sehr gute Anhaftung
 - Facilan C8 ausreichende Anhaftung
- Auswahl Facilan C8



AdaptBrace

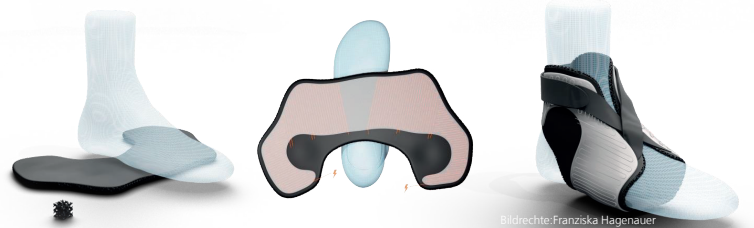
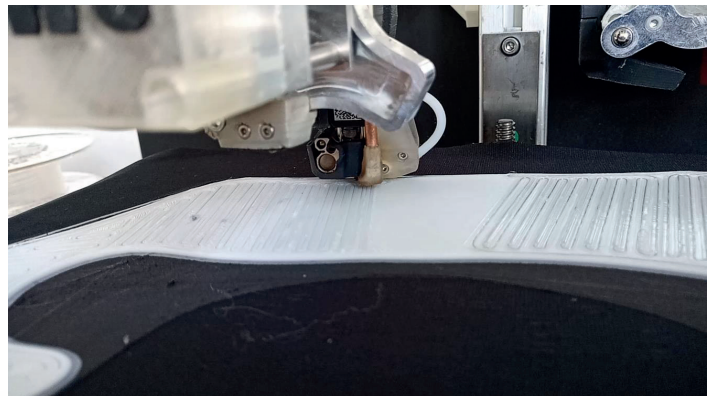
Umsetzung

Herstellung des Rohlings

- Schäumbares TPU mit Gyroid-Struktur für Polsterung zum Patienten (Druckzeit ca. 4h)
- Kompaktes, nicht-flexibles Thermoplast für Stabilisierungsfunktion (Druckzeit ca. 0,2h)
- Drahtintegration für schaltbare Steifigkeit mittels WEAM (Prozesszeit ca. 0,5h)

Anformung an den Patienten durch Erwärmung mittels Bestromung

- 2 min Aufheizzeit
- Anformung
- 5 min Erstarrungszeit



Bildrechte: Franziska Hagenauer

AdaptBrace

Ergebnis

- 1 Automatisierbare Herstellung von ebenen Rohlingen in on-demand patientenspezifisch oder in Konfektionsgrößen
- 2 Die intrinsische Erwärmung ermöglicht eine präzise Temperaturregelung und somit die Arbeit an Patienten ohne Zeitlimit
- 3 Anpassbarkeit bei veränderten Rahmenbedingungen (Schwellungen, Druckzonen)



Kontakt

Valentin Mauersberger

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Funktionalisierungstechnologien

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
IWU, Nöthnitzer Straße 44, 01187 Dresden, Germany

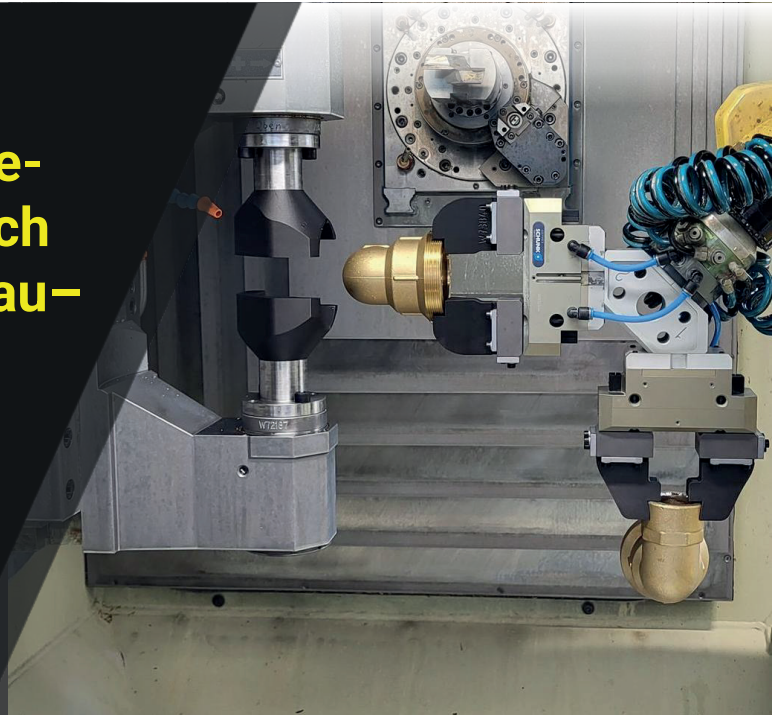
Telefon +49 351 4772-2230

Valentin.Wilhelm.Mauersberger@iwu.fraunhofer.de

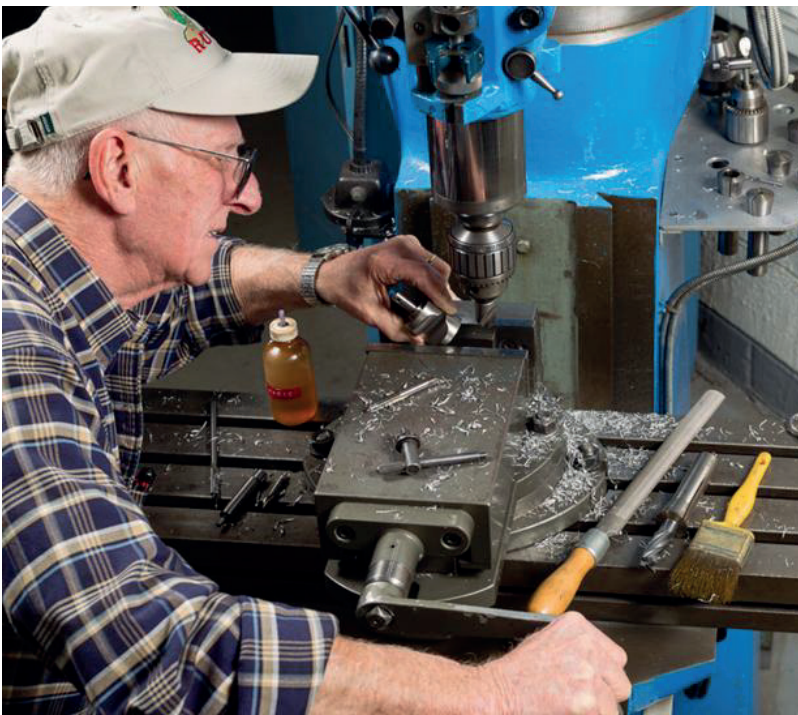


Können mechanisch gefertigte Bauteile wirklich durch 3D-gedruckte Bauteile ersetzt werden?"

Joachim Kasemann
Mark3D GmbH



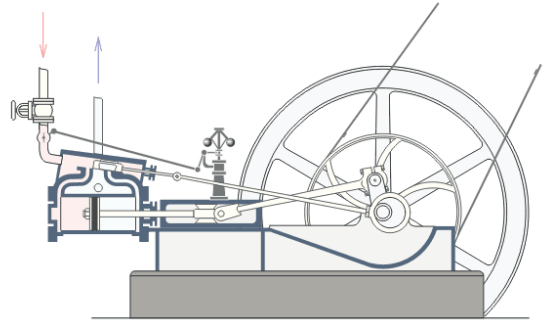
 Markforged  Mark3D
THE Markforged Experts



3D Druck ... die **ideale**
Ergänzung zur
mechanischen Fertigung!

Um den Mehrwert der Dampfkraft
wirklich zu nutzen, mussten die
Fabrikbesitzer...

umdenken!

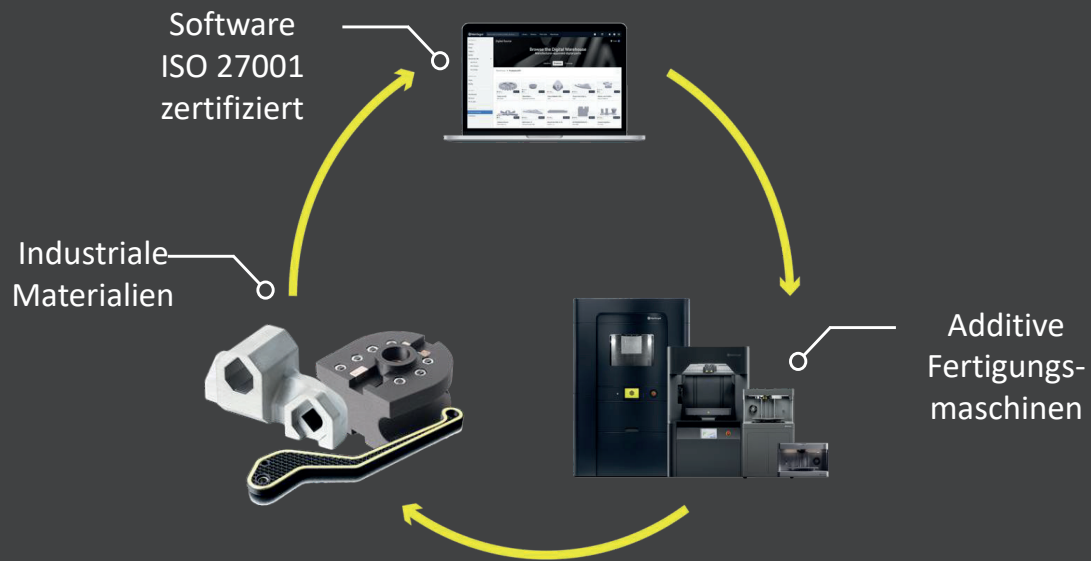


Easy to go ...

- Fachkräftemangel
- Plug-&-Play auf
industriellem Niveau



Die digitale Bäckerei



5 13.08.2025

 Markforged  Mark3D
THE Markforged Experts

Verfügbarkeit



Unabhängigkeit



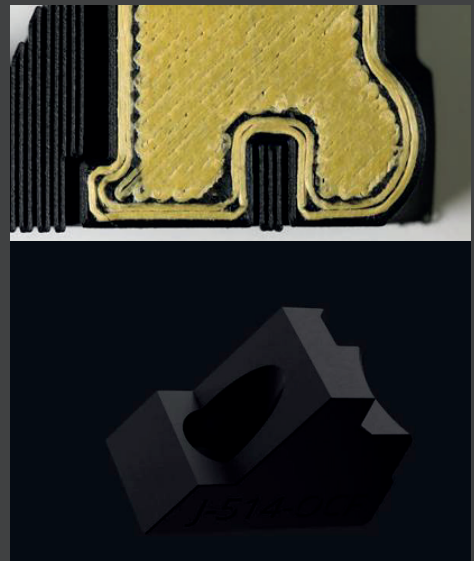
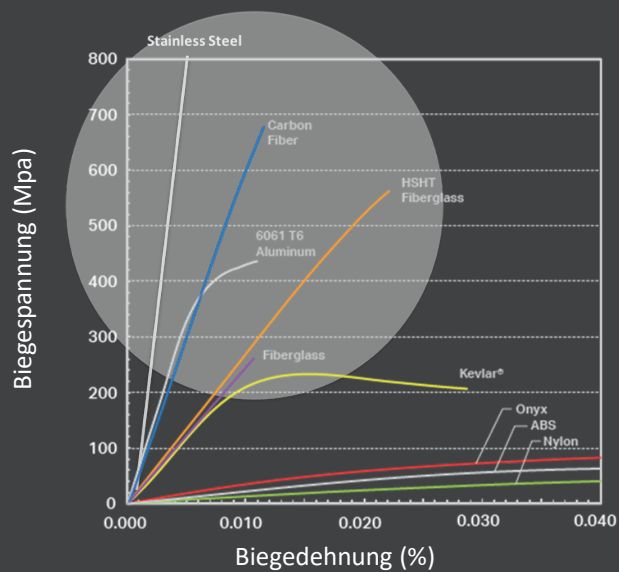
Innovation



6 13.08.2025

 Markforged  Mark3D
THE Markforged Experts

Carbon – stabiler als Aluminium



7 13.08.2025

Markforged **Mark3D**
THE Markforged Experts

Matrix Materialien



Onyx

Nylon PA6 mit Carbonkurzfasern.
145°C Wärmeformbeständigkeit.



Onyx FR

Sämtliche Eigenschaften wie Onyx und brandklassifiziert nach UL94 V-0.



Onyx ESD fähig

Oberflächenwiderstand $10^5 - 10^7 \Omega$.
Elektrisch ableitende Eigenschaften

8 13.08.2025

Markforged **Mark3D**
THE Markforged Experts

Zwei Düsen für zwei Materialien

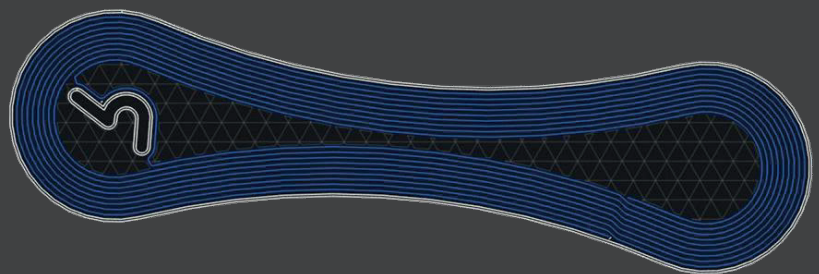


9 13.08.2025

Markforged Mark3D
THE Markforged Experts

Ein Bauteil. Tausende Endlosfasern.

Continuous Filament Fabrication (CFF) ist eine **patentierte Technologie**, mit welcher Markforged Kunden 3D gedruckte Bauteile in extremer Festigkeit fertigen können.

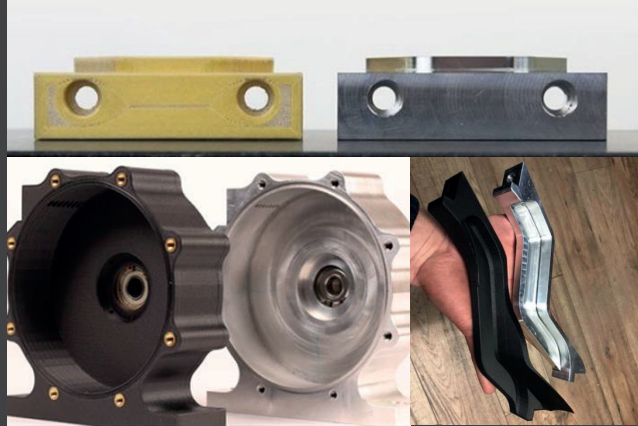


10 13.08.2025

Markforged Mark3D
THE Markforged Experts

Umdenken beginnt im Kopf!

Mit Endlosfasern verstärkte, 3D gedruckte Bauteile können viele **Aluminiumbauteile** direkt **ersetzen**.



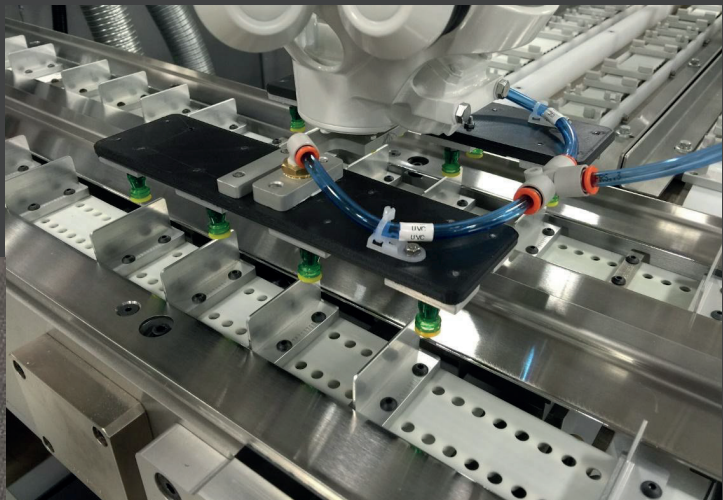
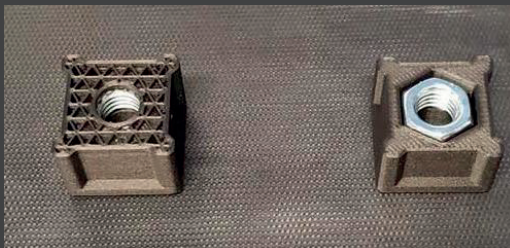
11 13.08.2025

 Markforged  Mark3D
THE Markforged Experts

Eingebettete Bauteile und um-die-Ecke-Bohren!

Integrierte Bauteile erweitern das Einsatzspektrum Ihrer gedruckten Bauteile.

Kombinieren Sie 3D-Druck mit DIN- und Normteilen



12 13.08.2025

 Markforged  Mark3D
THE Markforged Experts

Bauteil: Robotergreifer

3D gedruckt

Druckkosten: € 28,50

Druckzeit: 10 Stunden

Material: Onyx und Glasfaser

Mechanisch gefertigt

Kosten: € 273,00

Lieferzeit: 72 Stunden

Material: Stahl



Bauteil: Sauggreifer

3D gedruckt

Druckkosten: € 100,00

Druckzeit: 24 Stunden

Material: Onyx und Carbon

Gewicht: 189 g

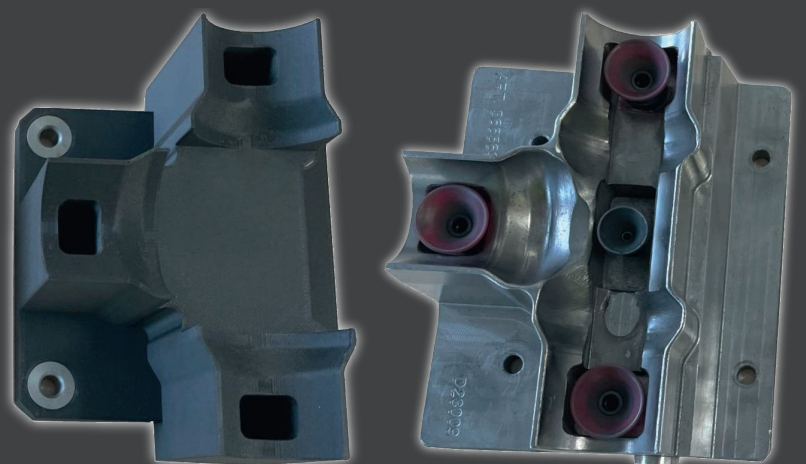
Mechanisch gefertigt

Kosten: € 1.145,00

Lieferzeit: 4-6 Wochen

Material: Stahl

Gewicht: 3,2 kg



Bauteil:

Spannbacken

3D gedruckt

Druckkosten: € 350

Druckzeit: 48 Stunden

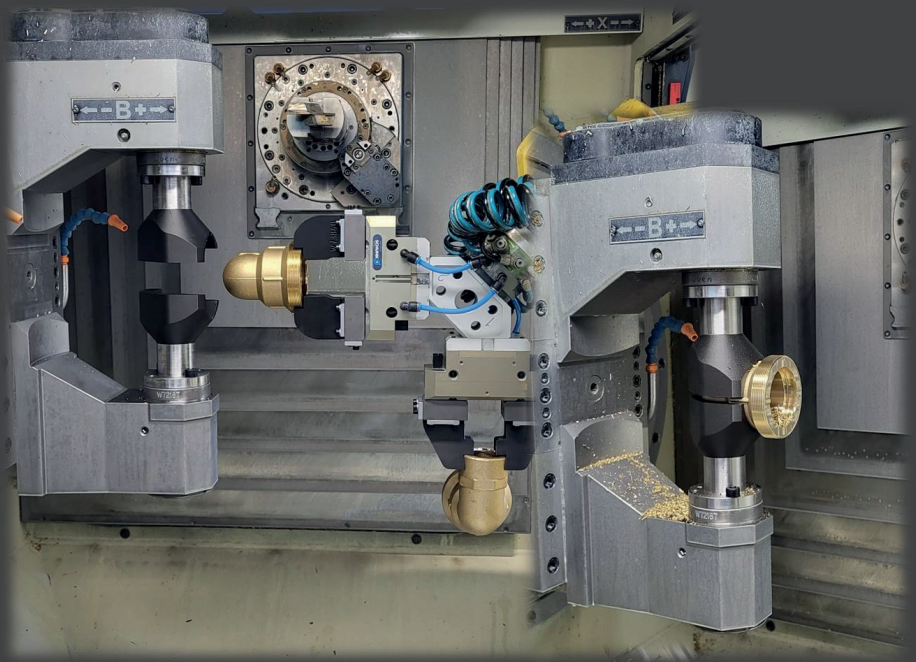
Material: Onyx, Carbon

Mechanisch gefertigt

Kosten: € 723

Lieferzeit: 4 Wochen

Material: Stahl



15 13.08.2025

  THE Markforged Experts**Bauteil:**

Laserschweißvorrichtung

3D gedruckt

Druckkosten: € 150

Druckzeit: 12 Stunden

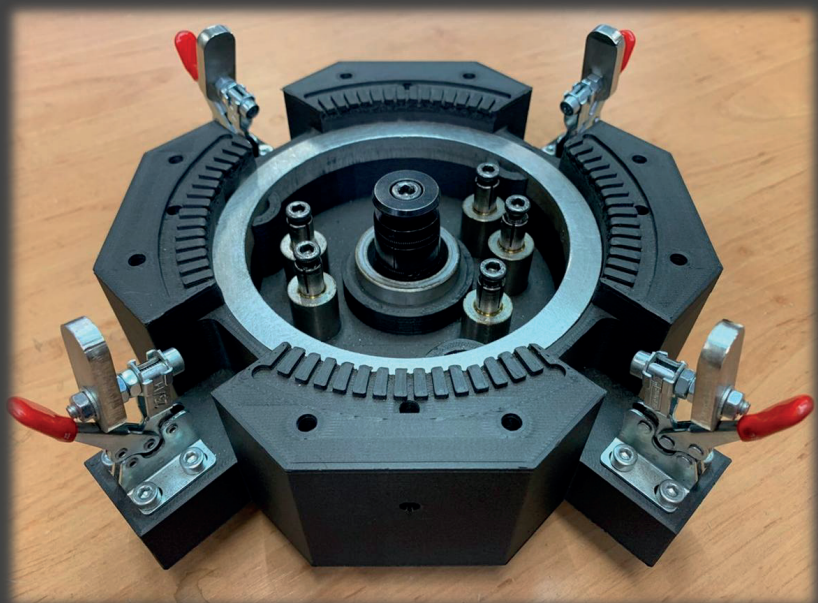
Material: Onyx und Glasfaser

Mechanisch gefertigt

Kosten: € 1.200

Lieferzeit: 3-4 Wochen

Material: Stahl



16 13.08.2025

  THE Markforged Experts

Bauteil: Robotergreifer

3D gedruckt

Druckkosten: € 1,65
Druckzeit: 36 Minuten
Material: Onyx

Mechanisch gefertigt

Kosten: € 20,00
Lieferzeit: 4 Tage
Material: Aluminium



17 13.08.2025

 Markforged  Mark3D
THE Markforged Experts

Bauteil: Läuferscheibe

3D gedruckt

Druckkosten: € 16,00
Druckzeit: 13,5 Stunden
Material: Onyx

Mechanisch gefertigt

Kosten: € 58,00
Lieferzeit: 2 Wochen
Material: Stahl und Kunststoff



18 13.08.2025

 Markforged  Mark3D
THE Markforged Experts

Bauteil: Messvorrichtung

3D gedruckt

Druckkosten: € 330,00

Druckzeit: 3 Tage

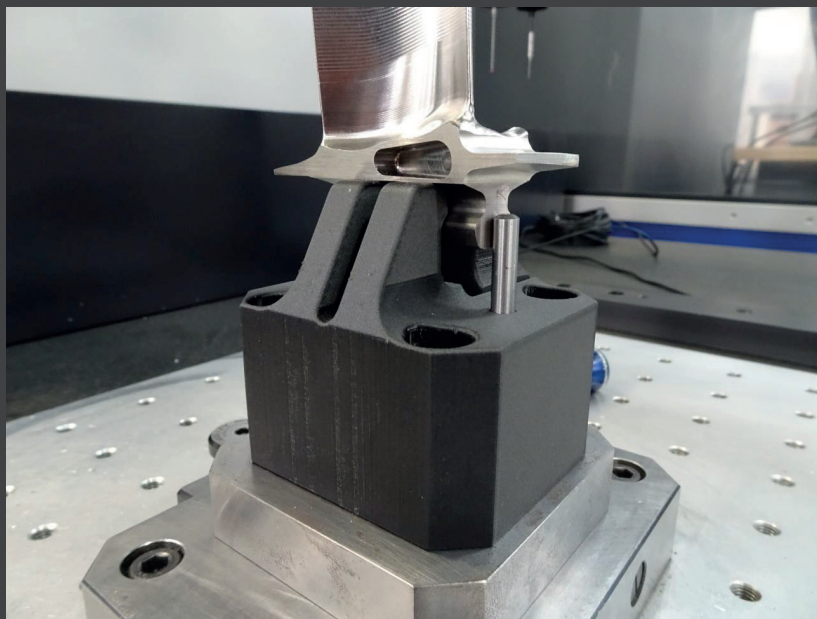
Material: Onyx und Carbon

Mechanisch gefertigt

Kosten: € 1.590,00

Lieferzeit: 10 Tage

Material: Stahl



Bauteil: Reibschweißbacke

3D gedruckt

Druckkosten: € 48,00

Druckzeit: 11 Stunden

Material: Onyx

Mechanisch gefertigt

Kosten: € 1.200,00

Lieferzeit: 21 Stunden

Material: Stahl



Bauteil: Magnetgreifer für Montageanlage

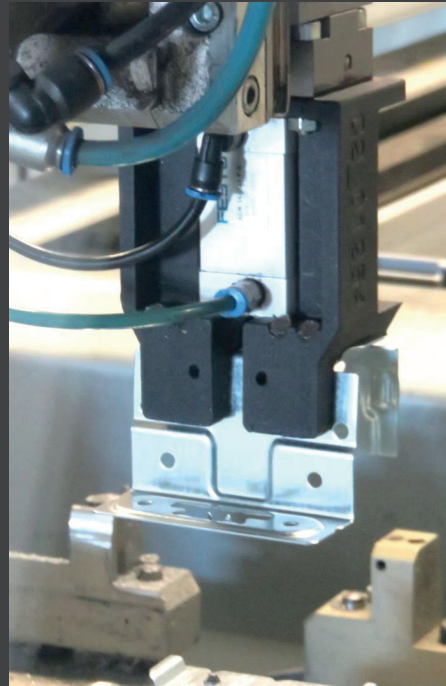
3D gedruckt

Druckkosten: € 38,05
Druckzeit: 13 Stunden
Material: Onyx

Mechanisch gefertigt

Fertigungskosten: € 217,00
Material: Aluminium

Deutlich **weniger Störungen** und Stillstandszeiten



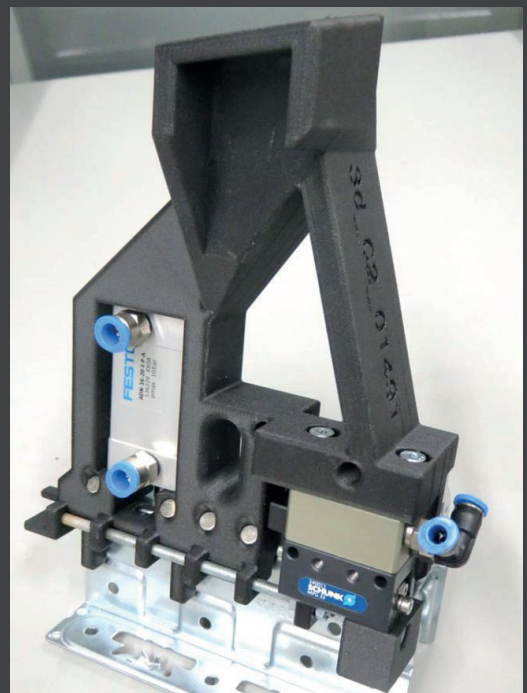
Bauteil: Magnetgreifer

3D gedruckt

Druckkosten: € 71,20
Druckzeit: 24 Stunden
Material: Onyx

Mechanisch gefertigt

Fertigungskosten: Bauteil ist nicht herstellbar



Bauteil:

Vorrichtung

3D gedruckt

Druckkosten: € 95,50

Druckzeit: 2 Tage, 21 Stunden

Material: Onyx

Mechanisch gefertigt

Fertigungskosten: € 1.329,00

Lieferzeit: 2 Wochen

Material: Stahl



23 13.08.2025

Markforged Mark3D
THE Markforged Experts

Markforged brems Library Devices Print Jobs

Beispiel Motorrad Bremsgriff (1) Ferdinand Bunte Copy Part Update STL Get Support

Part Details

Add Description...

Dimensions
197.2mm x 55.3mm x 14.0mm

Print Time
3h 53m

Material Cost
5.75 USD

Final Part Mass
28.09g

Plastic Volume
21.92 cm³

Fiber Volume
0.19 cm³

Versions

Part Settings
Review and modify your settings for printing.

General Settings Infill

Reinforcement

Fill Pattern
Triangular Fill

Fill Density
25 37% 55

Roof & Floor Layers 0.50mm
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Wall Layers 0.80mm
1 2 3 4

Save
Internal View
Print

24 13.08.2025

Markforged Mark3D
THE Markforged Experts

brems

Library

Devices

Print Jobs

Beispiel Motorrad Bremsgriff (1)

Ferdinand Bunte

Part Stats (up to layer 37)

Print Time

2h 54m / 7h 20m

Onyx

9.78 / 19.48 cm³

Carbon Fiber

5.42 / 16.45 cm³

Material Cost

18.45 / 53.64 USD

Final Part Mass

19.09g / 45.98g

Get Support

Visibility

2D

3D

Editing Layer: 37 / 112

Use Fiber

Fiber Fill Type

Isotropic Fiber

Concentric Fiber Rings

3

Start Rotation Percent

0

Fiber Angle

0

Pause After Layer

Scan After Layer

Revert

Save

Part View

Print

Editing Layer: 37 / 112

4.625mm

Materials

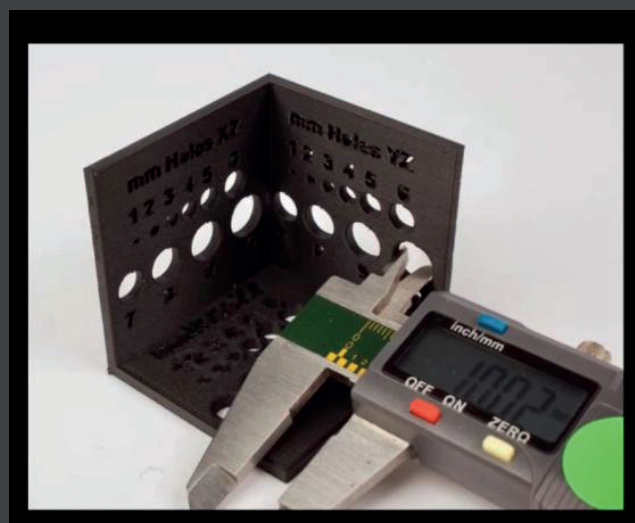
25

13.08.2025

Toleranzen

... abhängig von der Geometrie

Bauteil			
20 mm	10 mm	12 mm	170 mm
gemessen			
19,99	9,94	11,96	170,08
20	10,02	11,92	170,04
19,97	10,02	11,96	169,95
19,95	9,96	11,98	169,98
19,92	10,01	11,98	169,98
19,91	10,02	12	169,92
19,97	9,99	11,97	169,95
19,96	10,07	11,89	169,95
19,97	10,03	11,93	169,95
19,97	9,97	11,97	169,93
20,03	10,08	11,97	169,94
19,96	10,06	11,96	169,96
19,9	9,96	11,99	169,98



Serienfertigung?

Markforged Printfarm

- 40 Maschinen
- Bis zu **15.000+ Teile** im Monat
- 1 Bediener



27 13.08.2025



Herzlichen Dank



Joachim Kasemann
CEO
jk@mark3d.de
+49 170 6987722



Materialinnovationen und hybride Lösungen

Untersuchung der Kunststoff-Metall-Haftung bei der additiven Fertigung hybrider Spritzgussformen

Thomas M. Wendt, Alexander Dierle

Offenburg University of Applied Sciences, Badstraße 24, 77652 Offenburg

Zur Herstellung hybrider Spritzgussformen wird die Haftung verschiedener 3D-Druck-Filamente auf Metallmodulen untersucht. Mit einem modifizierten FFF-Drucker und roboterbasierter Abzugsprüfung wird die Verbindung bewertet. PA12+CF15 zeigte die besten mechanischen Eigenschaften und haftet am besten in Kombination mit Metallkleber auf Polychloropren Basis. Zukünftig soll das Verfahren auf ein robotergestütztes Mehrachs-System übertragen und um einen mechanischen Haftungsmechanismus ergänzt werden, um temperaturbedingte Haftkraftverluste auszugleichen.

Einleitung

Die Umsetzung kleiner Spritzgussserien erfordert flexible, schnelle und kostengünstige Herstellungsverfahren, um eine wirtschaftliche Fertigung variabler Werkzeuggeometrien zu ermöglichen. Konventionell gefertigte Formen bestehen aus Stahl oder Aluminium und werden spanend hergestellt. Für Kleinserien von 10 bis 2.000 Teilen ist dieser Ansatz jedoch kosten- und ressourcenintensiv und zudem zeitaufwendig. [1]

Spritzgussformen aus additiver Fertigung werden insbesondere für Anwendungen im Rapid Tooling genutzt. Abhängig vom Anwendungsfall kommen unterschiedliche Verfahren und Materialien zum Einsatz, etwa PolyJet mit Digital ABS, Stereolithografie (SLA) mit hochfesten Harzen wie Rigid 10K Resin oder Fused Filament Fabrication (FFF) mit Hochleistungspolymeren wie PEEK. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine kosteneffiziente Herstellung von Spritzgussformen, ist jedoch durch eine begrenzte Standzeit eingeschränkt. [2]

Einen weiteren Ansatz stellen hybride Spritzgusswerkzeuge dar, bei denen additiv gefertigte Strukturen mit metallischen Modulen kombiniert werden [3]. Hier wird die thermische Stabilität und Robustheit klassischer Metallformen mit der Gestaltungsfreiheit, Flexibilität und Kosteneffizienz additiver Verfahren verbunden [3]. Untersuchungen zeigen, dass sich die Herstellungszeit und -kosten insbesondere für Kleinserien um bis zu 30 % reduzieren lassen, wenn gleich die Standzeit im Vergleich zu Stahlformen begrenzt bleibt (~1,3 %) [3]. Ergänzend verdeutlichen Forschungsprojekte wie rapidFORMtool, dass hybride Prozessketten – bestehend aus additiver Fertigung, partieller Nachbearbeitung und Oberflächenbehandlung – die Genauigkeit, Oberflächengüte und mechanischen Eigenschaften von Rapid-Tooling-Werkzeugen weiter verbessern können [4].

Methodik

Zur Untersuchung der Haftungseigenschaften wird ein FFF-3D-Drucker (Prusa MINI) so modifiziert, dass Kunststoff gezielt auf vorbereitete Probenkörper aus Warmarbeitsstahl 1.2343 extrudiert werden kann. Diese werden in eine ebenfalls aus 1.2343 gefertigte Grundplatte eingesetzt, die auf dem Heizbett des 3D-Druckers aufliegt und über Magnete fixiert wird. Bei der Filamentauswahl wird darauf geachtet, dass keine aufwändigen Umgebungsbedingungen wie eine beheizte Druckkammer erforderlich sind. So lassen sich die Ergebnisse auf industrielle Anwendungen übertragen, insbesondere auf den direkten 3D-Druck mit Industrierobotern, bei denen eine vollständige Einhausung kaum wirtschaftlich realisierbar ist. Eingesetzt werden daher PETG, ASA und PA12+CF15 (siehe [5]), die sowohl kostengünstig als auch ausreichend temperaturbeständig sind.

Zur Verbesserung der Adhäsion wurden zwei Ansätze verfolgt: (i) die Modifikation der Metalloberfläche (Polieren, Schleifen, Walzen) sowie (ii) der Einsatz von Haftvermittlern, darunter Sprühkleber, Metallkleber (Basis Polychloropren), 2K-Epoxidharzkleber oder eine Plasmaaktivierung. Der modifizierte Drucker ermöglicht den Überlappungsdruck auf Metallproben, die in die Grundplatte eingesetzt sind (vgl. Abb. 1). Um eine geschlossene Auflagefläche zu schaffen, wird neben den Prüfkörpern ein Platzhalter aus Stahl eingesetzt, der mit Malerband überklebt ist. Das Band sorgt dafür, dass das Filament dort temporär aufliegt, sich jedoch nach dem Druck rückstandsfrei ablösen lässt. Nach Entfernen des Platzhalters kann die Haftung ausschließlich an der Grenzfläche zwischen Prüfkörper und Filament untersucht werden. Zentrale Herausforderungen stellen die präzise Justierung des Düsenabstands sowie die exakte Temperaturführung des Druckbetts dar, da beide Parameter die Anbindung und Benetzung des Extrudats maßgeblich beeinflussen.

In einer systematischen Versuchsreihe werden verschiedene Kombinationen von Düsenabstand, Düsen- und Betttemperatur untersucht, um einen Parametersatz zu ermitteln, der eine reproduzierbare und homogene Haftung gewährleistet.

Die Temperaturkontrolle des Druckbetts ist ein kritischer Faktor. Messungen mit einem Infrarotthermometer zeigen, dass die tatsächliche Oberflächentemperatur zunächst von der Solltemperatur abweicht und sich erst nach einer Haltezeit von rund fünf Minuten stabilisiert. Diese Haltezeit stellt sicher, dass Temperaturgradienten minimiert und die Proben homogen durchwärmt werden.

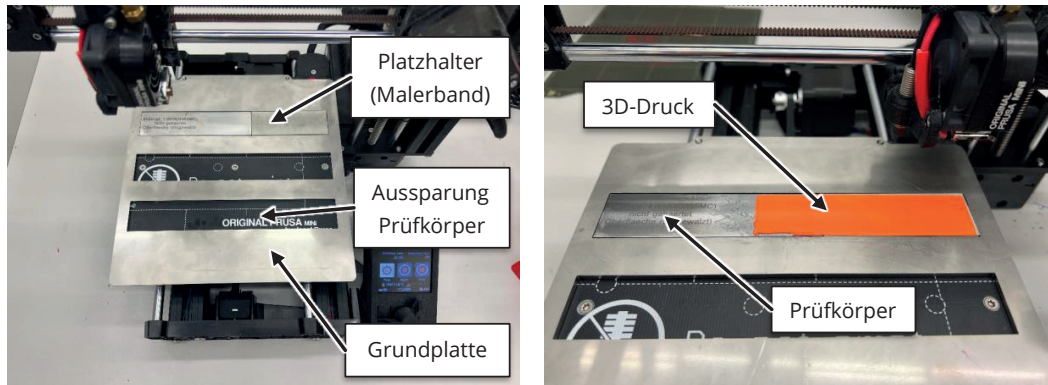


Abbildung 1: Versuchsaufbau für den Überlappungsdruck – eingesetzter Prüfkörper aus Stahl 1.2343 und Platzhalter (überklebt mit Malerband) in der Grundplatte

Zur Bestimmung der Haftkräfte wird eine roboterbasierte Messeinrichtung bestehend aus einem KUKA iisy, einer Kraftmessdose und einer Einspannvorrichtung eingesetzt (vgl. Abb. 2). Der Roboter verfährt mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 150 mm/min in negativer z-Richtung, bis die Verbindung zwischen Filament und Probenkörper versagt. Um Materialbruch auszuschließen und eine eindeutige Trennung der Grenzfläche zu gewährleisten, werden zusätzliche Stabilisierungsstrukturen integriert. Auf diese Weise kann die tatsächliche Haftkraft bestimmt werden. Die Versuche werden sowohl bei Raumtemperatur (23 °C) als auch bei erhöhter Temperatur (100 °C) durchgeführt, um die Temperaturabhängigkeit der Haftung zu bewerten.

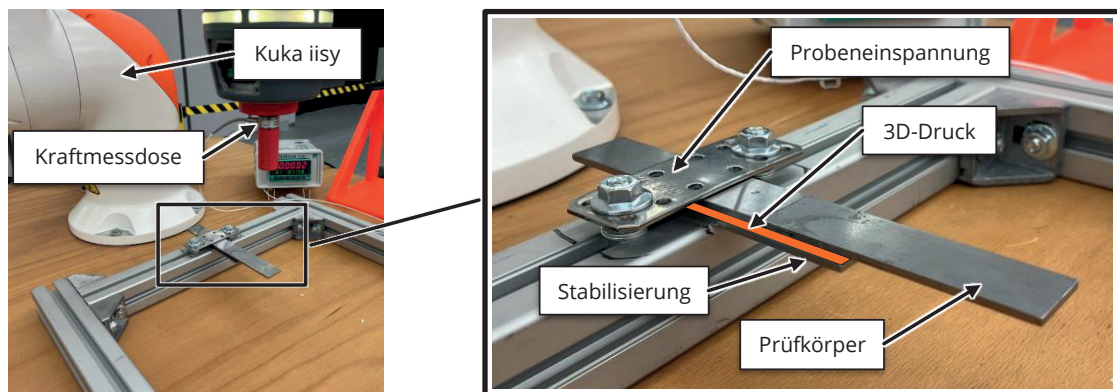


Abbildung 2: Roboterbasierter Prüfaufbau zur Bestimmung der Haftkräfte mit KUKA iisy, Kraftmessdose und Probenhalterung (Detailansicht mit Stabilisierung und Prüfkörper)

Ergebnisse

PETG erzielt als einziges Filament eine messbare Haftung auf geschliffenen und angerauten Oberflächen (Körnung 120 und 180). Die maximale Haftkraft beträgt 9,9 N bei 23 °C. Bei 100 °C sinkt die Haftkraft jedoch ab, sodass sich die Proben ohne äußere Krafteinwirkung lösen. Zudem treten thermische Deformationen auf, sodass PETG für den angestrebten Anwendungsfall ungeeignet ist.

ASA weist eine höhere Temperaturstabilität auf und erreicht bei 100 °C noch messbare Haftkräfte. Ohne Haftvermittler ist die Anbindung an die Metalloberfläche jedoch unzureichend, die Proben lösen sich bereits bei der Entnahme. Mit Metallkleber werden maximale Haftkräfte von 92,1 N bei 100 °C erzielt.

PA12+CF15 verfügt über die besten mechanischen Eigenschaften der untersuchten Filamente (Zugfestigkeit ca. 120 MPa, Temperaturbeständigkeit bis 170 °C), zeigt jedoch die geringste Eigenhaftung [5]. Unabhängig von der Oberflächenbearbeitung bildet sich ohne Haftvermittler keine Verbindung zum Metall. Mit Metallkleber werden die höchsten Haftkräfte aller untersuchten Proben erzielt (160,6 N bei 23 °C). Der Einsatz von 2K-Kleber führt in Kombination mit der rauen, faserverstärkten Filamentoberfläche zu 35 N. Plasmaaktivierung verbessert zwar die Benetzung, ermöglicht aber keine dauerhaft belastbare Verbindung.

Alle untersuchten Filamente zeigen eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit: Bei 23 °C werden die höchsten Haftkräfte erreicht, während bei 100 °C eine Reduktion von bis zu 50 % auftritt. Ursache sind thermisch bedingte Materialerweichung sowie veränderte Grenzflächeninteraktionen. Unabhängig vom eingesetzten Filament konnte ohne Haftvermittler keine belastbare Anhaftung erzielt werden, da das Extrudat zu zähflüssig ist, um in die angeraute Oberfläche einzudringen und sich mechanisch zu verzahnen. Eine Erhöhung der Verarbeitungstemperatur führte hierbei zu keiner nennenswerten Verbesserung.

Fazit und Ausblick

Die Haftungseigenschaften von 3D-gedruckten Filamenten auf Metall sind stark vom eingesetzten Material, der Temperatur sowie dem Einsatz geeigneter Haftvermittler abhängig. PETG ist aufgrund der geringen Temperaturbeständigkeit und ausgeprägten Deformationen für den industriellen Einsatz ungeeignet. ASA weist eine bessere thermische Stabilität auf, erfordert jedoch zwingend zusätzliche Oberflächenbehandlungen oder Haftvermittler. Das faserverstärkte PA12+CF15 erreicht in Kombination mit Metallklebern die höchsten Haftkräfte, weist zugleich die besten mechanischen Eigenschaften auf und stellt damit die vielversprechendste Lösung für den vorgesehenen Anwendungsfall dar.

Im nächsten Schritt wird das Verfahren auf ein robotergestütztes Mehrachs-System übertragen, um den Prozess auch für komplexe Geometrien nutzbar zu machen. Darüber hinaus soll ein mechanischer Haftungsmechanismus entwickelt werden, der temperaturbedingte Haftkraftverluste kompensiert und eine dauerhaft belastbare Verbindung sicherstellt. Langfristig eröffnet dies die Möglichkeit, additiv gefertigte Spritzgussformen in industriellen Anwendungen effizienter und flexibler einzusetzen.

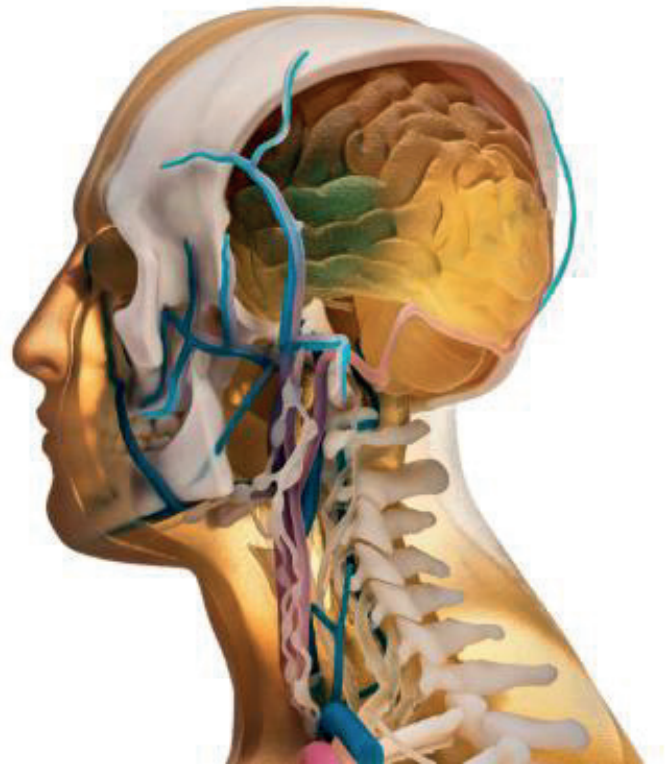
Referenzen

- [1] G. Schuh, G. Bergweiler, G. Lukas, und J. A. Abrams, „Feasibility and Process capability of polymer additive injection molds with slide technology“, *Procedia CIRP*, Bd. 93, S. 102–107, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.03.057
- [2] D. Jimenez-Acosta, „Comparison of additive manufacturing technologies for injection molding“, Juni 2023, Zugriffen: 19. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://hdl.handle.net/10171/66665>
- [3] C.-C. Kuo und X.-Y. Pan, „Development of a Rapid Tool for Metal Injection Molding Using Aluminum-Filled Epoxy Resins“, *Polymers*, Bd. 15, Nr. 17, S. 3513, Jan. 2023, doi: 10.3390/polym15173513.
- [4] „Additive-based, hybrid manufacturing of advanced, rapid tooling for metal forming“, SMART. Zugriffen: 19. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smarteureka.com/projects/additive-based-hybrid-manufacturing-of-advanced-rapid-tooling-for-metal-forming/>
- [5] Fiberlab S.A., „Technical Data Sheet Nylon PA12+CF15“. Zugriffen: 7. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2022/12/FIBERLOGY_NYLON_PA12CF15_TDS.pdf

Next Level Additive Manufacturing: Stratasys News - neue Materialien und Technologien

Mittweida, 15. Oktober 2025

Michael Anton
Material Business Manager EMEA



Make additive work

AGENDA



1. Vorstellung
2. Stratasys Überblick
3. Neue Entwicklungen und Technologien 2025
Technologien
Anwendungen
Software



Michael Anton

Berufsausbildung mit Abitur
• Robotron in Sömmerda



Dipl.-Ing. Elektrotechnik
IHS Mittweida (Sa.) (1988-1993)



- AE Objet / Benchmarkcenter in Rheinmünster (2009)
- Presales AE (2013)



- Servicetechniker **SLA** (1995)
- Applikationsingenieur **SLS** (2002)



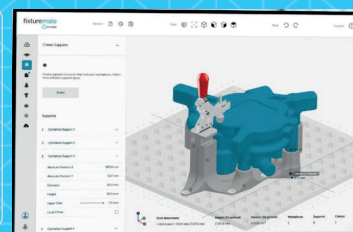
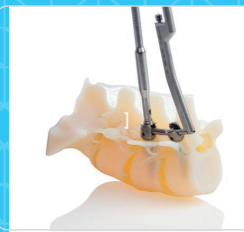
- Material Business Manager EMEA (2016)
- Komplettes Materialportfolio
- Alle EMEA Reseller & Direktkunden
- Kommerzielle Programme
- Neue Produkte



Make additive work for you™

Stratasys

Be the first-choice polymer 3D printing provider at every stage of the product life cycle, with multiple technologies and complete solutions for superior application fit, across design, manufacturing, and healthcare.



Make additive work for you™



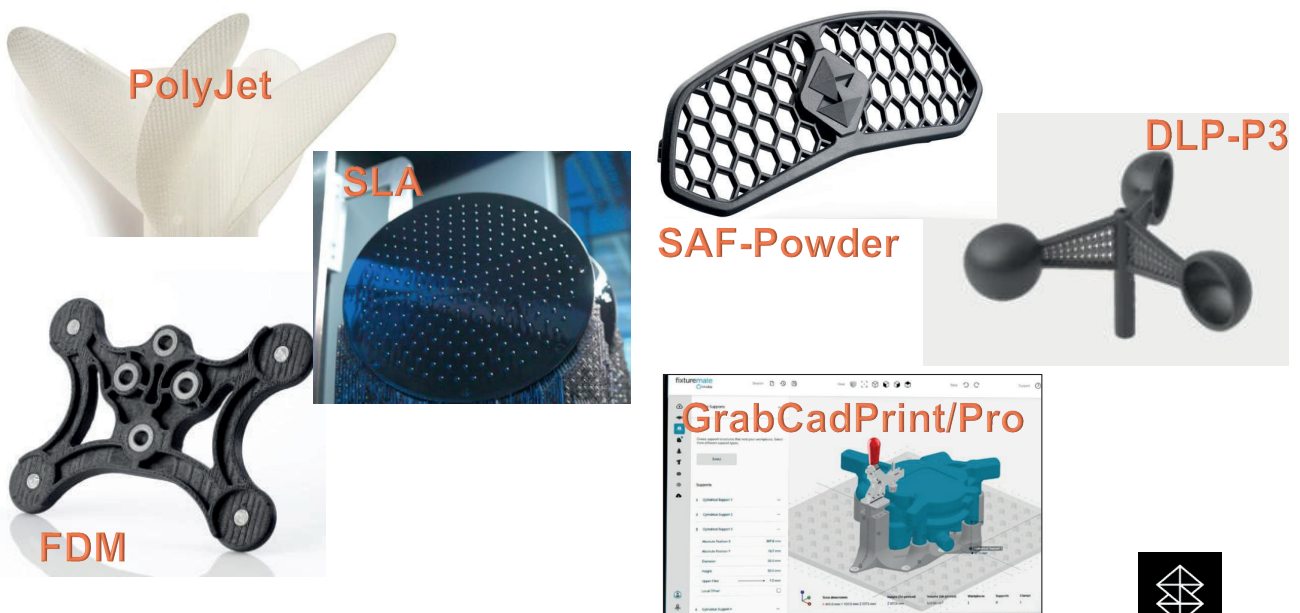
Stratasys = Systems + Materials + Software + Service



Make additive work for you™

5

Stratasys Überblick - Technologien

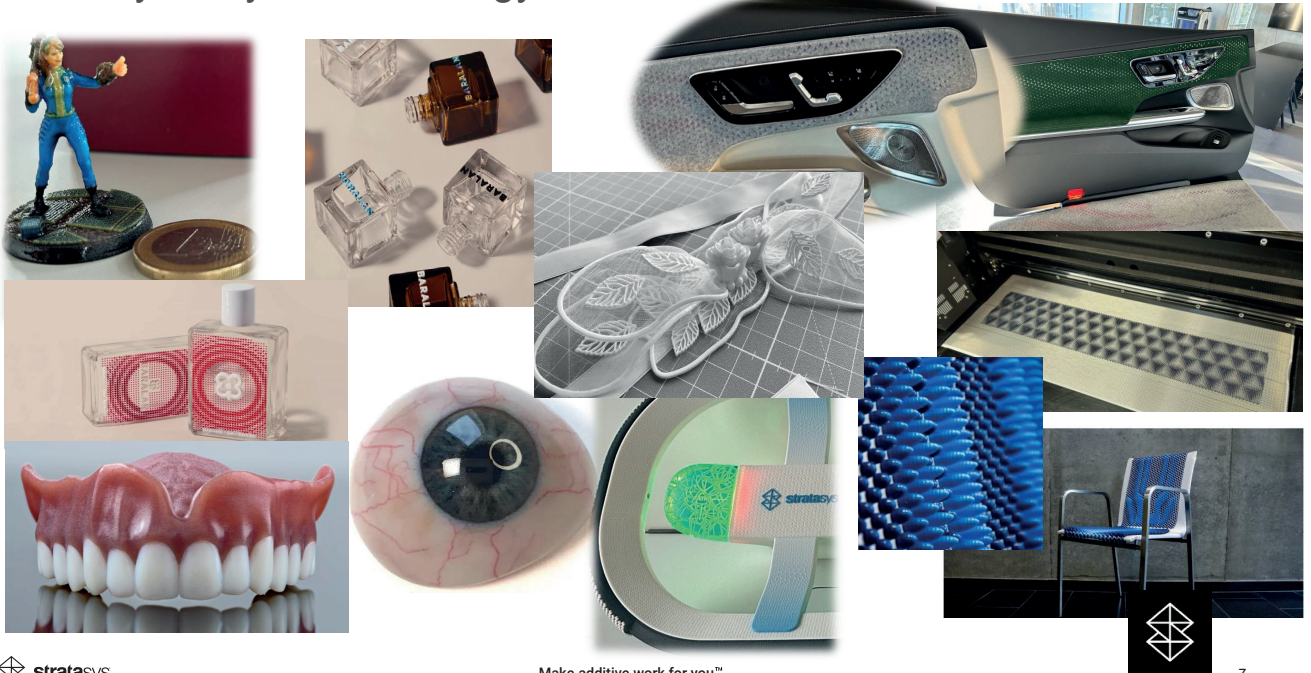


Make additive work for you™



6

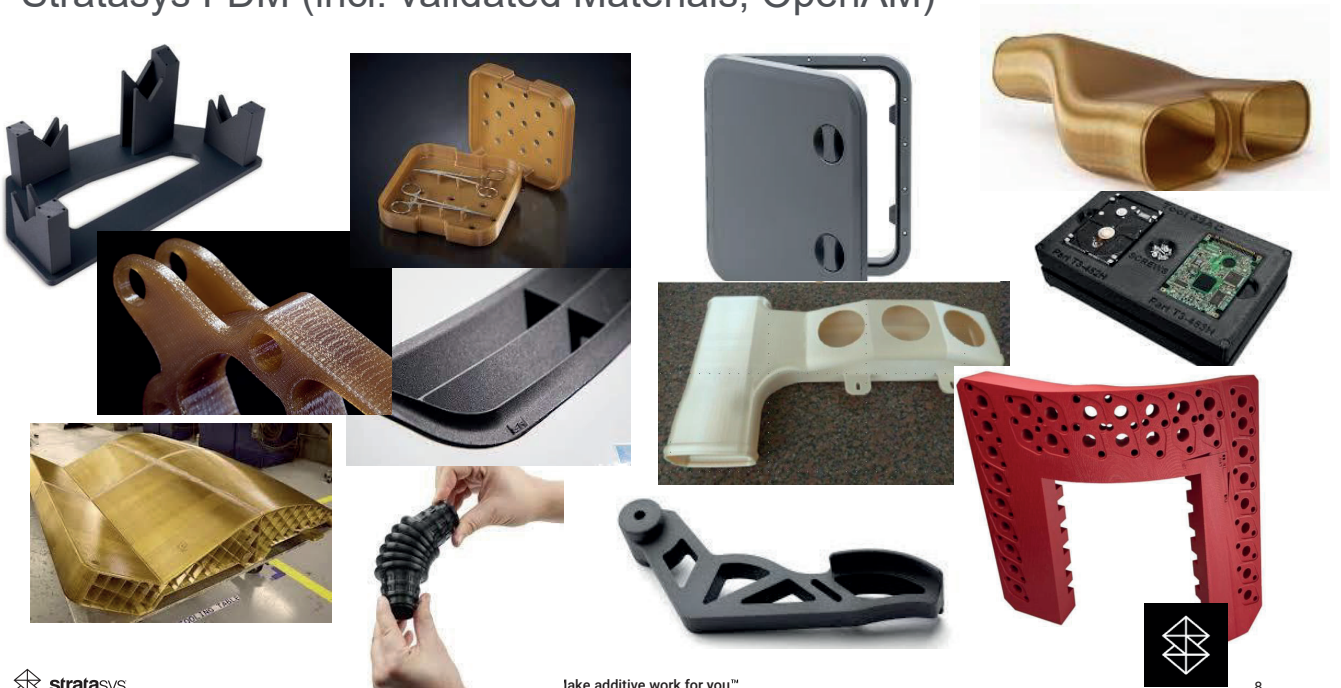
Stratasys PolyJet Technology



Make additive work for you™

7

Stratasys FDM (incl. validated Materials, OpenAM)



Make additive work for you™

8

Stratasys SLA (NEO und NEO+)

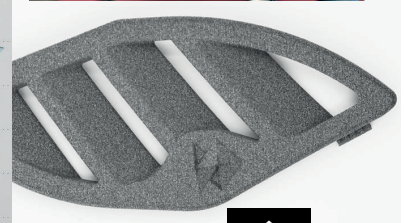
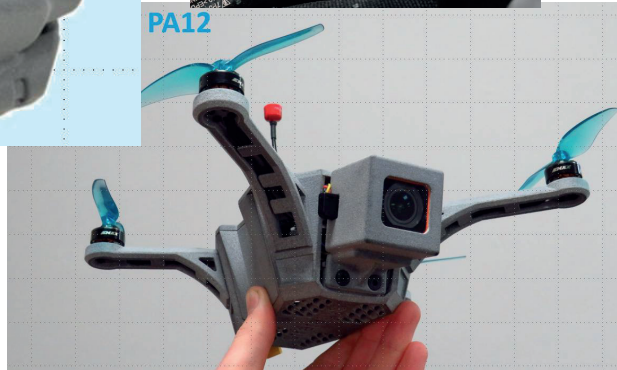


9

Stratasys OriginOne and Two – P3 DLP



Stratasys SAF - Powder



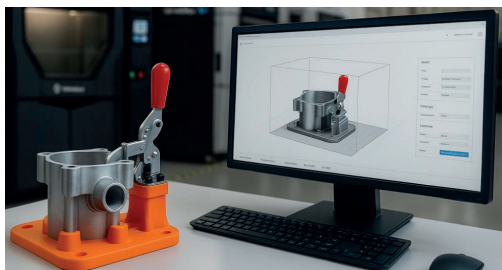
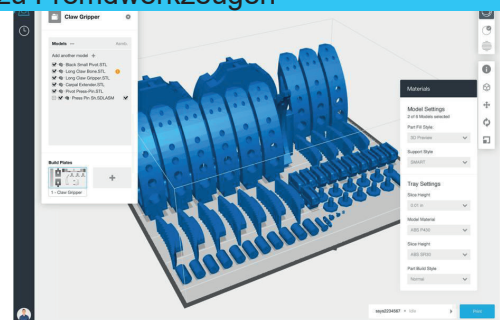
11

Stratasys – GrabCad Software

Eine Software bedient alle Technologien und bietet Links zu Fremdwerkzeugen

GrabCAD Print™

- Druckvorbereitung für alle Technologien
- Einlesen und Reparatur aller CAD-Formate
- Farbauswahl und Textur
- Druckzeit- und Materialberechnung
- Drucküberwachung



GrabCAD Print Pro™

- Erweiterte Druckvorbereitung, Texturierung und Multitechnologie-Unterstützung
- Fixturemate-Integration - Automatisierte Vorrichtungskonstruktion ohne CAD-Kenntnisse
- OpenAM™ Materialparameter-Tuning und erweiterte Anpassung



12

AGENDA



1. Vorstellung

2. Stratasys Überblick

3. Neue Entwicklungen und Technologien 2025
Technologien
Anwendungen
Software



Make additive work for you™

13

PolyJet ToughONE™

Launched:
June 10th, 2025

- Funktionales Material
- Prototyping - next level!
- Funktions und End-Use-Teile
- + niedrigere Kosten pro Teil



Snap fits



Thin walls, pins



Living hinges



Crack free drilling



Self-tapping screws

Make additive work for you™

14

FDM TPU 92A Red

Launched:
July 7th, 2025

Ordering P/N: 333-70001

Format: 60ci (984 cc)



[Stratasys Website Link](#)



- Hochkomplexe Elastomer-Teile in gut sichtbaren Farben
- Benutzerfreundlich und zuverlässig produziert

Red = Remove Before Flight

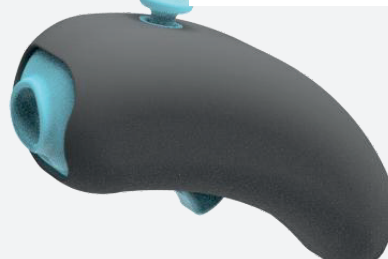


Make additive work for you™

15

Silikon in Shore A25 (Shin-Etsu)

Das erste von Origin – P3 validierte ECHTE industrielle Silikonmaterial



[To read more click here.](#)

UL94-V0
2.56 mm

UL94-V0
2.56 mm
-50°C .. 200°C

TRUE
SILICONE
PROPERTIES

BIO – Comp.
Cytotoxicity
ISO 10993-5



Make additive work for you™

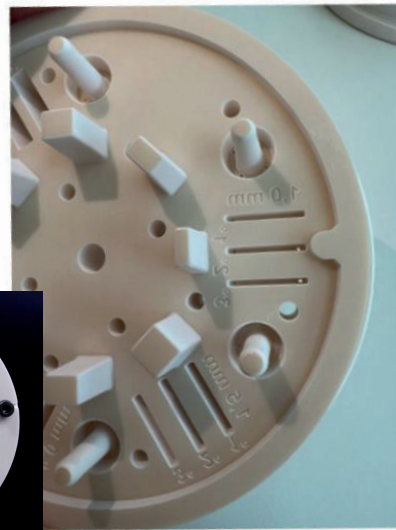
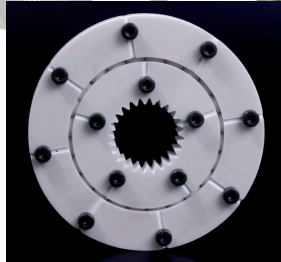
16

Ultracur3D® RG 3280 validated for OriginOne, OriginTwo

The first Origin validated ceramic material

Spezifische Anwendungen durch hohen Füllgrad

- Spritzgießwerkzeuge, Blowmoldingwerkzeuge
- Windtunnel
- Extrusionswerkzeuge
- Lagerschalen



High stiffness
(10.6 GPa)

High abrasion
resistance

High part
accuracy

Temperature
resistance
(>280 °C HDT)



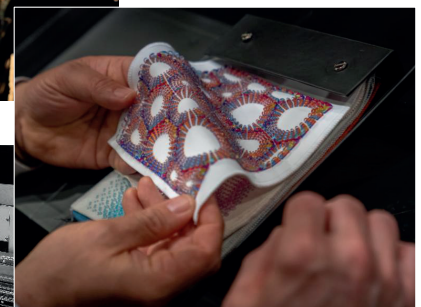
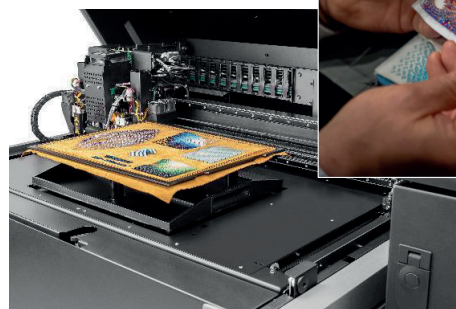
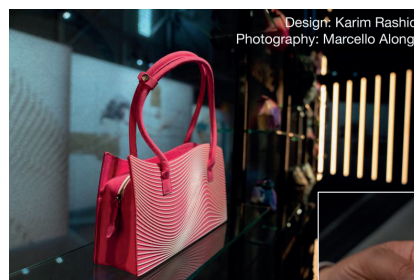
Make additive work for you™

17

Fashion

TechStyle™ 3D Printing

- Entwickelt für den Direktdruck auf eine Vielzahl von Stoffen und Kleidungsstücken, darunter Denim, Baumwolle, Polyester, Leinen und Leder.
- Über 600.000 einzigartige Farben mit verschiedenen Shore-Werten simulieren unterschiedliche Texturen und Oberflächen.
- Volumina von Einzelstücken bis zu Zehntausenden Stück



Make additive work for you™

18

Innovation?

Neues Verfahren - neue Maschine - neues Material?

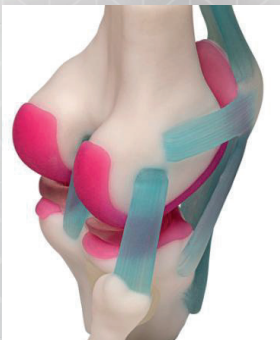
Innovation zeigt sich oft versteckt, kleine Änderung, aber oft mit großen Auswirkungen für unsere Kunden und deren Produktion in abgestimmten Prozessen (Kosten, Qualität, Durchsatz, Druckergebnisse)!

Bei Stratasys:

- Neue Düse die die Produktionsgeschwindigkeit verdoppelt, Qualität aber bleibt gleich,
- Ein Material das unsere Kunden auf ihrem System vermissten,
- Neues SW-Feature das die Vorbereitung deutlich verkürzt oder vereinfacht,
- Funktionen hinzufügen die Fremdsoftware unnötig machen (Kosten reduzieren),
- Wünsche unserer Kunden in GrabCad umzusetzen, Prozesse vereinfachen,
- Trainingsangebote erweitern, Sprachen hinzufügen, Service erweitern,

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

[Explore Industrial 3D Printing Solutions | Stratasys Additive Printing](#)



THANK
YOU



Make additive work for you™

Untersuchungen zum selektiven Laserstrahlschmelzen von Aluminiumoxid für die direkte Herstellung oxidkeramischer Bauteile

Laura Römer, M.Sc.

-Additive Fertigung-



www.laser.hs-mittweida.de

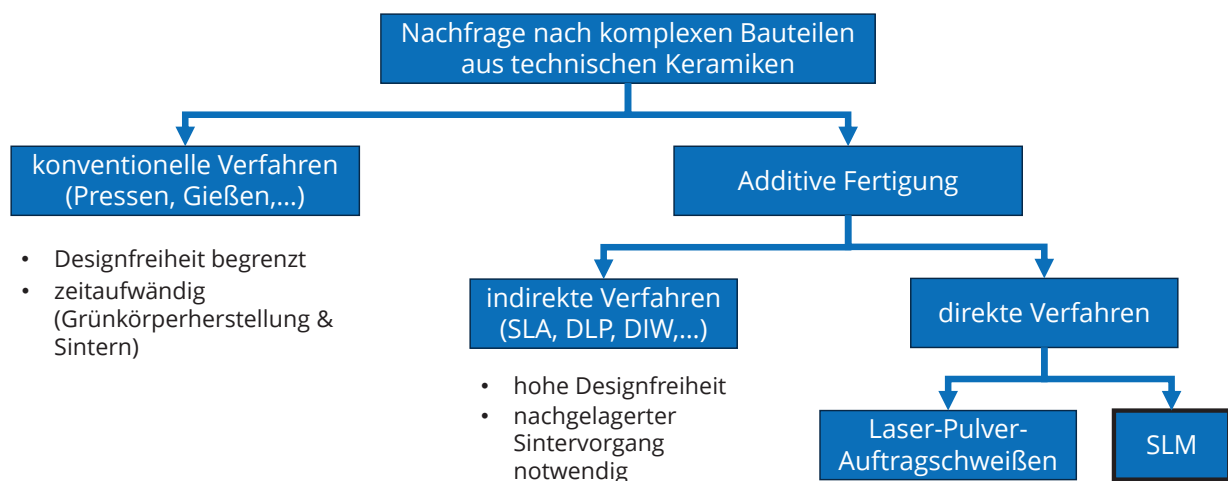


Kofinanziert von der Europäischen Union



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Motivation – warum Keramik-SLM?



Problematisken Keramik-SLM: hohe Schmelztemperaturen, geringe Thermoschockbeständigkeit, Rissbildung
→ Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid (Al_2O_3) mittels CO_2 -Laser

Anlagentechnik und Pulvermaterial

CO₂ - Laser

$P_{\max} = 300 \text{ W}$

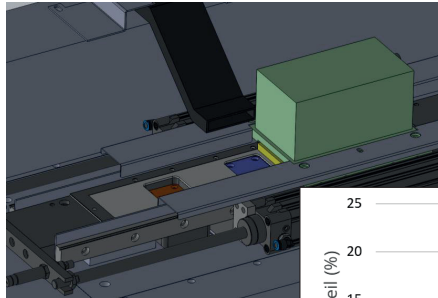
$\lambda = 10,6 \text{ }\mu\text{m}$

$f = 300 \text{ mm}$

Fokus = 520 μm

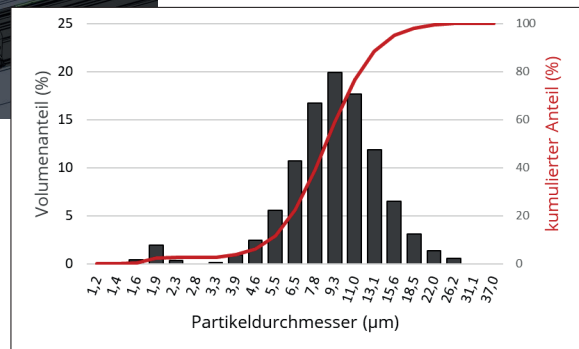
Druckbeschichter

Bauraum: 40x40 mm



genutzter Druckbeschichter

Korngrößenverteilung des Pulvermaterials



3 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Laserinstitut
Hochschule Mittweida

HOCHSCHULE
MITTWEIDA

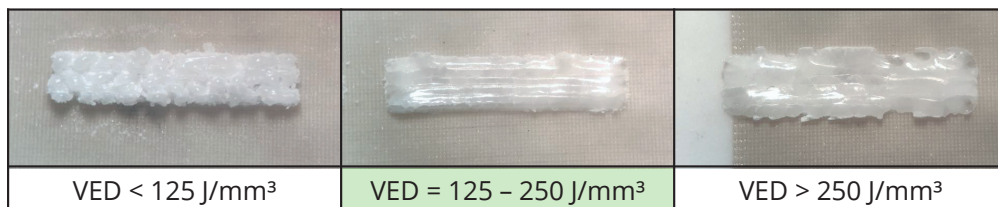
Prozessentwicklung mit CO₂ - Laser

Vorgehen:

- erste Versuche zur Eingrenzung geeigneter Prozessparameter
- Bestrahlen von je 5 Vektoren über eine geringe Schichtanzahl
- Schichtdicke konstant ($l_z = 30 \text{ }\mu\text{m}$)

Ergebnisse:

$$VED = \frac{P_{av}}{v_s \cdot h_s \cdot l_z}$$



→ Ausgangspunkt für Aufbau von Volumenkörpern

4 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Laserinstitut
Hochschule Mittweida

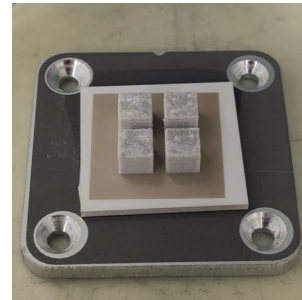
HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Einfluss der Prozessparameter auf Bauteildichte und Rissbildung

Vorgehen:

- Aufbau von Volumenkörpern (Würfel 5x5 mm)
- Substrat: Al_2O_3 (1,5 mm Dicke)

Parameter	Untersuchter Bereich
Laserleistung P_{av}	10 – 60 W
Scangeschwindigkeit v_s	5 – 50 mm/s
Hatch h_s	100 – 400 μm
Schichtdicke I_z	10 – 40 μm
Scanstrategie	bidirekt. Linienbestrahlung
Drehung pro Schicht	139°



- Querschliffherstellung für die bildanalytische Dichtemessung und Rissanalyse

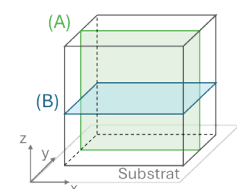
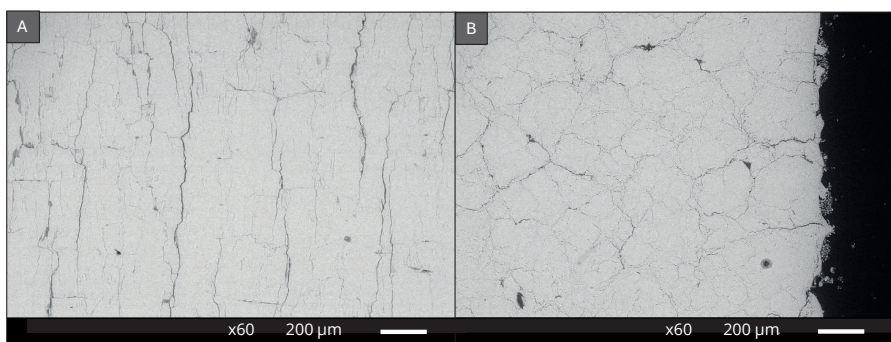
5 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung
oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Einfluss der Prozessparameter auf Bauteildichte und Rissbildung

Rissbildung:

- Betrachtung von zwei Querschliffebenen: A – in Aufbaurichtung; B – Schichtebene
- alle Proben rissbehaftet



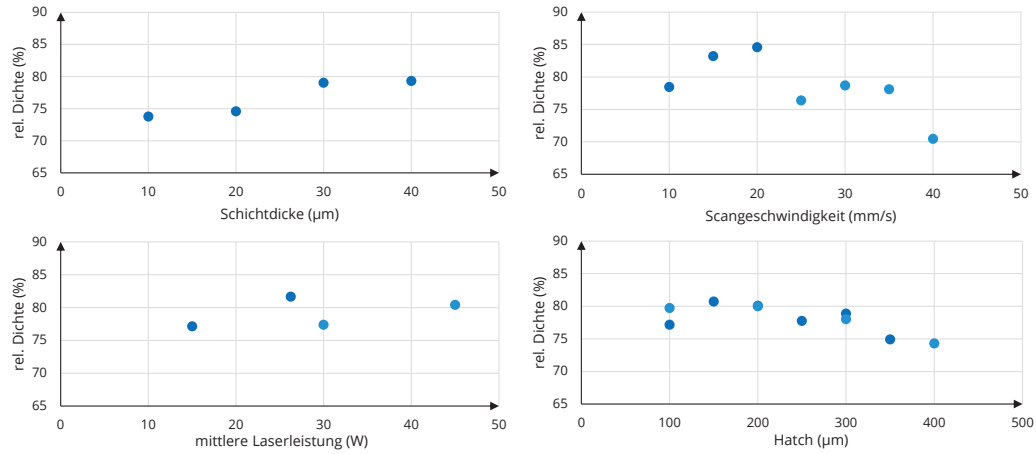
→ Bauteildichte hauptsächlich durch Rissanzahl und -größe bestimmt

6 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung
oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Einfluss der Prozessparameter auf Bauteildichte und Rissbildung

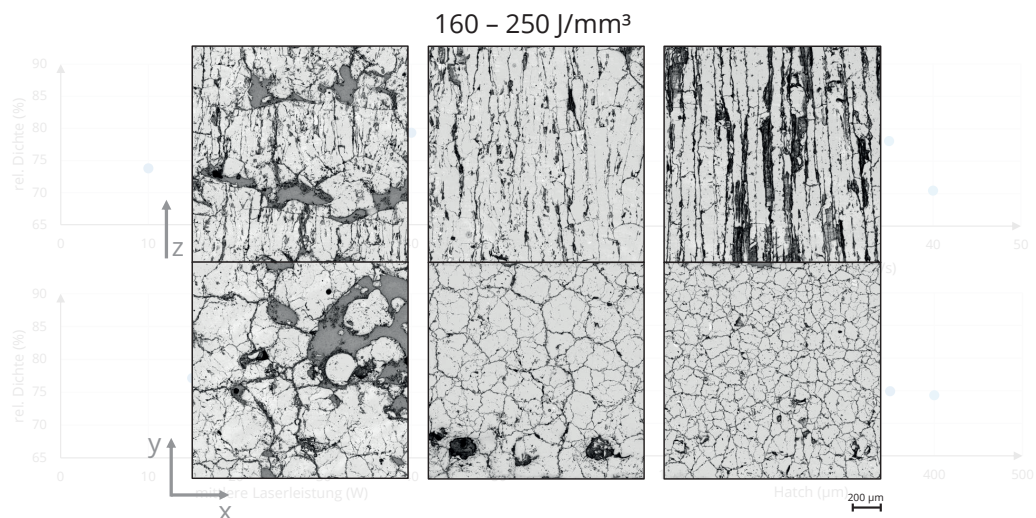
- rel. Bauteildichten im Bereich 70 – 85 %



7

Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung
oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Einfluss der Prozessparameter auf Bauteildichte und Rissbildung

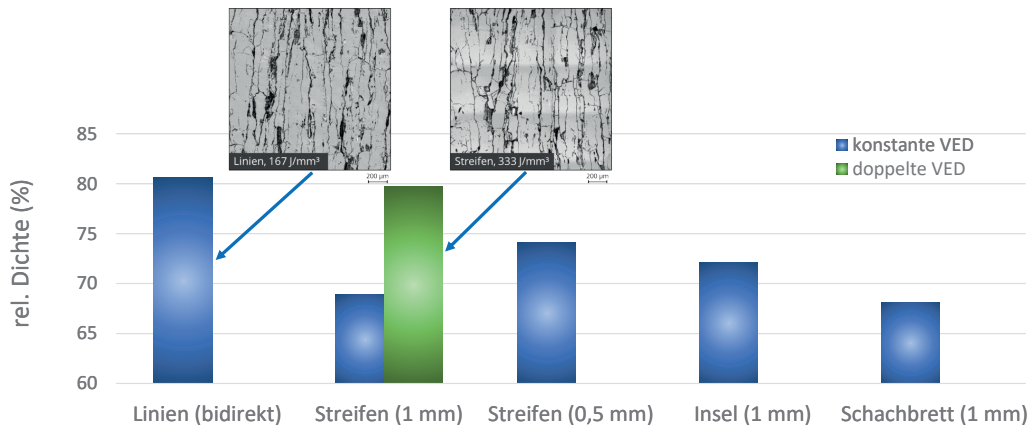


8

Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung
oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Scanstrategien

- neben bidirektionaler Linienbestrahlung weitere Scanstrategien untersucht



→ keine Verbesserung der Bauteildichte durch alternative Scanstrategien

9 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

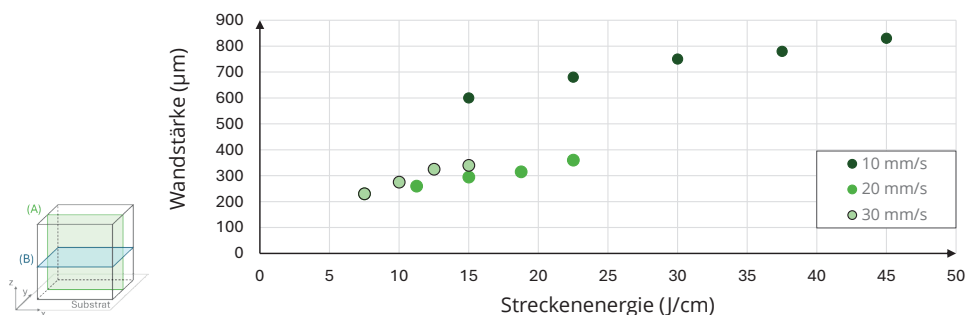


Strukturauflösung

Vorgehen:

- Aufbau freistehender Einzelwände unter Variation von Laserleistung und Scangeschwindigkeit
- Schichtdicke konstant ($l_z = 30 \mu\text{m}$)
- Messung der Wandstärken anhand von Querschliffen

Ergebnisse:



10 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

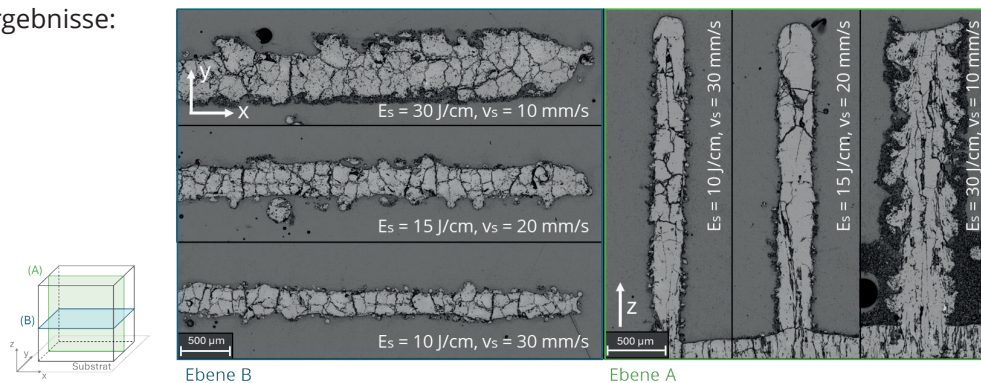


Strukturauflösung

Vorgehen:

- Aufbau freistehender Einzelwände unter Variation von Laserleistung und Scangeschwindigkeit
- Schichtdicke konstant ($l_z = 30 \mu\text{m}$)
- Messung der Wandstärken anhand von Querschliffen

Ergebnisse:



- bei $v_s < 20 \text{ mm/s}$: Pulveranhaftungen mit Dicken bis zu $100 \mu\text{m}$
- gleichmäßigere, glattere Wandseiten bei $v_s \geq 20 \text{ mm/s}$ → relevant für Outlineparameter

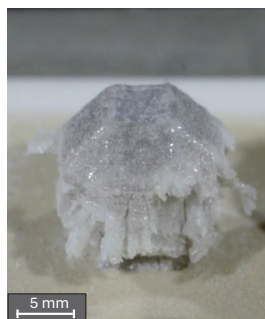
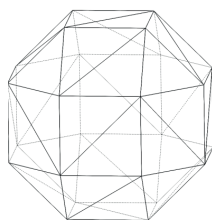
11 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

LHM Laserinstitut
Hochschule Mittweida

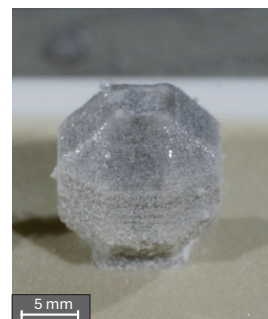
HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Übertrag auf komplexe Bauteile

- maximale Dichte & geringste Rissbildung bei VED von $160 - 250 \text{ J/mm}^3$
 - glattere Wandseiten bei $v_s \geq 20 \text{ mm/s}$ (Verwendung als Outlineparameter)
 - mit zunehmender VED häufiger Spannungsrisse in Randbereichen von Bauteilen
- Bau von Rhombenkuboktaedern (45° -Überhänge)



Säulenartiges Ausbrechen
an Überhängen



durch Parameter-
anpassung behoben

12 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

LHM Laserinstitut
Hochschule Mittweida

HOCHSCHULE
MITTWEIDA

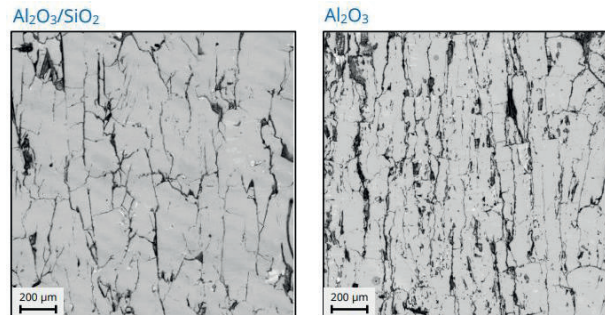
Stoffsystem $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$

Vorgehen:

- erhöhter Glasphasenanteil in Bauteilen soll zur Rissminderung beitragen
- Aufbereiten eines Pulvermaterials aus 80 gew.-% Al_2O_3 und 20 gew.-% SiO_2
- Herstellung von Volumenkörpern unter Variation von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch

Erste Ergebnisse:

- max. relative Dichte von 91,6 %
- geringere Laserleistungen notwendig
- ähnliche Spannungsrisse in Randbereichen der Proben bei hohen VED

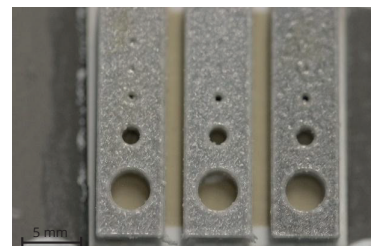
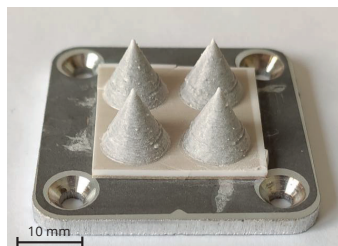
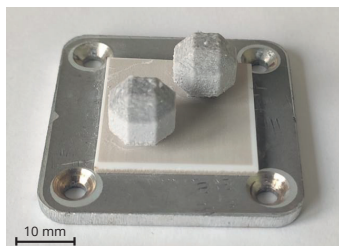


13 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Zusammenfassung

- prinzipiell ist die direkte Herstellung von Bauteilen aus Al_2O_3 mittels SLM möglich
- Bauteildichten bis 84 % erreicht
- enges Parameterfenster → Abwägung zwischen hoher Dichte und Spannungsrissen in Randbereichen
- Beheben von Rissbildung an Überhängen durch Parameteroptimierung
- Vergleich von Scanstrategien: bidirektionale Linienbestrahlung ergibt höchste Bauteildichten
- Erhöhung der max. Bauteildichte auf 91,6 % bei Verwendung des Stoffgemisches $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$



14 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxidkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Vielen Dank



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

Laura Römer

Laserinstitut Hochschule Mittweida
Technikumplatz 17 | 09648 Mittweida

T +49 (0) 3727 58-1911
roemer2@hs-mittweida.de
www.laser.hs-mittweida.de

Laserinstitut Hochschule Mittweida | Raum 42-204
Schillerstraße 10 | 09648 Mittweida



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch
Steuermittel auf der Grundlage des vom
Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

www.laser.hs-mittweida.de

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

3D-Druck mit Wasserglas – Ein nachhaltiger Ansatz zur laserbasierten additiven Fertigung

Hassel-Schmidt, R.^{1,2}, Barz, A.¹; Bliedtner, J.¹; Rädlein, E.²

¹ Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

² Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Straße 6, 98693 Ilmenau

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt | Ernst-Abbe-Hochschule Jena

AG Bliedtner

AG Fertigungstechnik und -automatisierung

- Prof. Dr. Jens Bliedtner
- 4 Laboringenieure
- 45 wissenschaftliche/techn. Mitarbeiter
- davon 10 Doktoranden

AGbliedtner



Forschungsschwerpunkte

- Lasermaterialbearbeitung
- Optiktechnologie
- Additive Technologien (3D-Druck)

Durchführung von

- öffentlich finanzierten und bilateralen Forschungsprojekten
- Studien zu neuen Technologien und Entwicklungsleistungen
- Mitarbeiterqualifizierung und Weiterbildung im Bereich der Laser-/ Optiktechnologien



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Thüringer Aufbaubank

Gliederung

1. Einführung

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

2.2 Problemstellungen und Lösungsansätze

3. Fazit und Ausblick

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

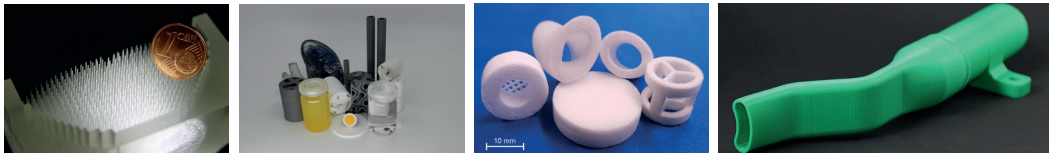
3

1. Einführung

Additive Fertigung

Vorteil

- Materialeffiziente und flexible Herstellung komplexer, individueller Bauteile durch zahlreiche Verfahrensansätze



Demonstratoren der additiven Verfahren VPP, L-PBF und MEX (Quelle: AG Bliedner an der EAH Jena)

Nachteile

- verfügbare Ausgangsmaterialien ...
 - (1) sind oft sehr teuer (z. B. SLA-Polymere > 150 €/kg)
 - (2) sind oft nicht nachhaltig bzw. wiederverwertbar
 - (3) weisen Defizite bzgl. der Beständigkeit (thermisch/chemisch/UV) auf

→ großes Potenzial haben anorganische, **silicatische Werkstoffe**

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

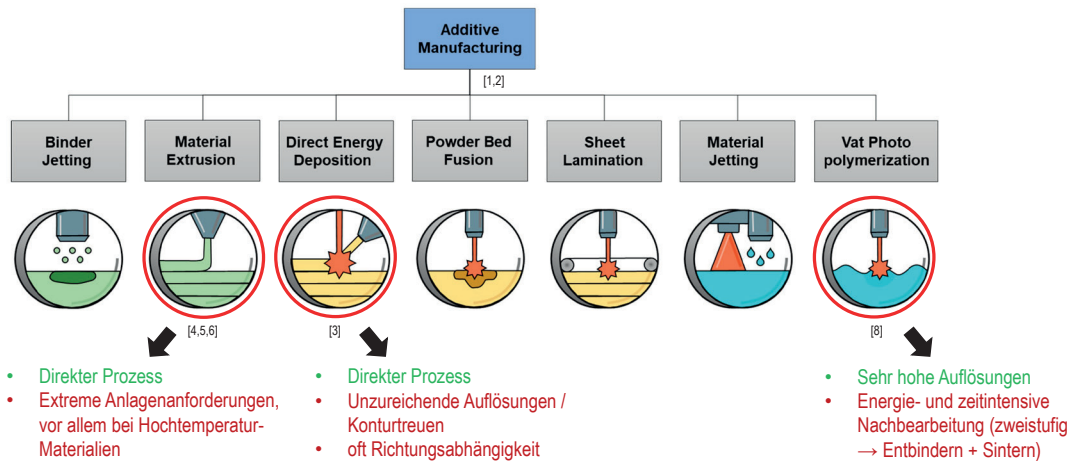
www.eah-jena.de

4

1. Einführung

Additive Fertigung

- für jede Verfahrensgruppe existieren Ansätze auf Basis von Glaswerkstoffen
- oft mit erheblichen Nachteilen verbunden (Auflösung, Nachbearbeitung, etc.)



15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

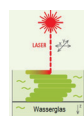
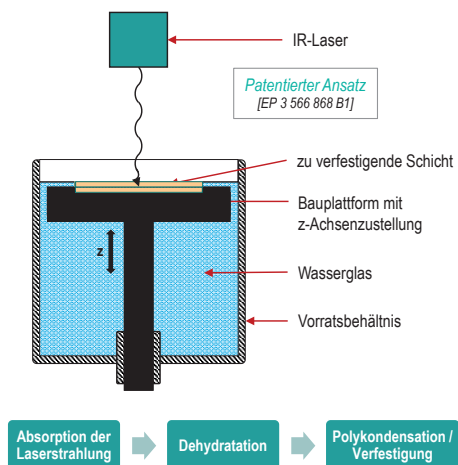
www.eah-jena.de

5

Lösungsansatz

Additive Fertigung auf Basis von Wasserglas:

Ziel: neue Material- und Verfahrenslösung für den 3D-Druck durch schichtweise Verfestigung flüssiger Alkali-Silicate (Wassergläser) durch Dehydratation mittels IR-Laserstrahlung



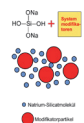
direkter badbasierter 3D-Druck + Werkstoff Wasserglas

- Hochaufgelöste 3D-Bauteile analog der Stereolithografie
- Bauteile mit hoher thermischer, chemischer und UV-Beständigkeit



Verwendung von anorganischem Wasserglas (Kosten ca. 15 €/kg)

- Etablierung einer kostengünstigen und nachhaltigen Fertigung
- Suche nach Methoden zur Wiederaufbereitung der Materialien



Einbringen von anorganischen Additiven in das Materialsystem

- Gezielte Eigenschaftsmodulation bzgl. Festigkeit, Farbe, etc.
- z. B. Metalloxide oder Recyclate aus Glasindustrie (Kieselglas etc.)

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

6

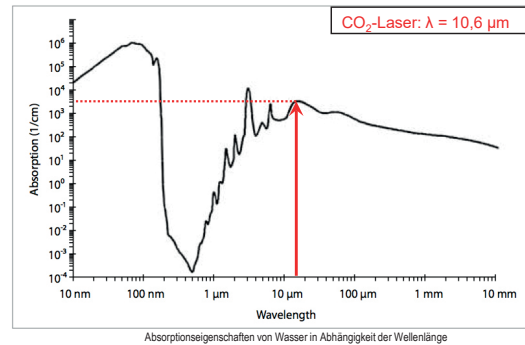
2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

Materialien

- zwei Natrium-Wassergläser unter Verwendung von CO₂-Laserstrahlung (10,6 µm)

	NaWg40/42	NaWg44
Alkalimodul M	3,21	2,85
Feststoffgehalt	36,86 %	44,33 %
Viskosität (dyn)	200 mPa·s	2670 mPa·s
Dichte	1,35-1,65 g/cm ³	1,44 g/cm ³
pH-Wert	11 - 12	11 - 12



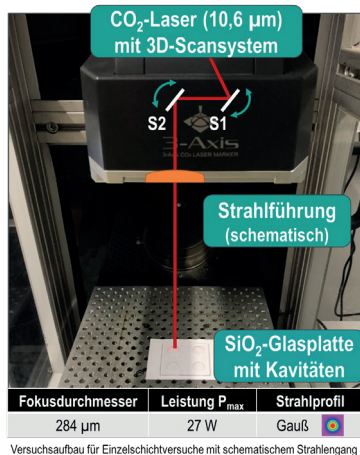
Ansatz „Dehydratation“

- Absorptionseigenschaft der Laserstrahlung in Wasser ist relevant

2. Additive Fertigung - Wasserglas

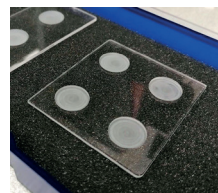
2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

Versuchsaufbau - Einzelschichten



Versuchsaufbau für Einzelschichtversuche mit schematischem Strahlengang

Eigenschaften	Keyence ML-Z9520W
Wellenlänge	10,6 µm
Leistung	$P_{max} = 30 \text{ W (27 W)}$
Brennweite der Optik	300 mm
Fokusbereich	300 µm (280 µm)
Einfache Rayleighlänge	5,452 mm
Scangeschwindigkeit	$v_{max} = 6 \text{ m/s}$

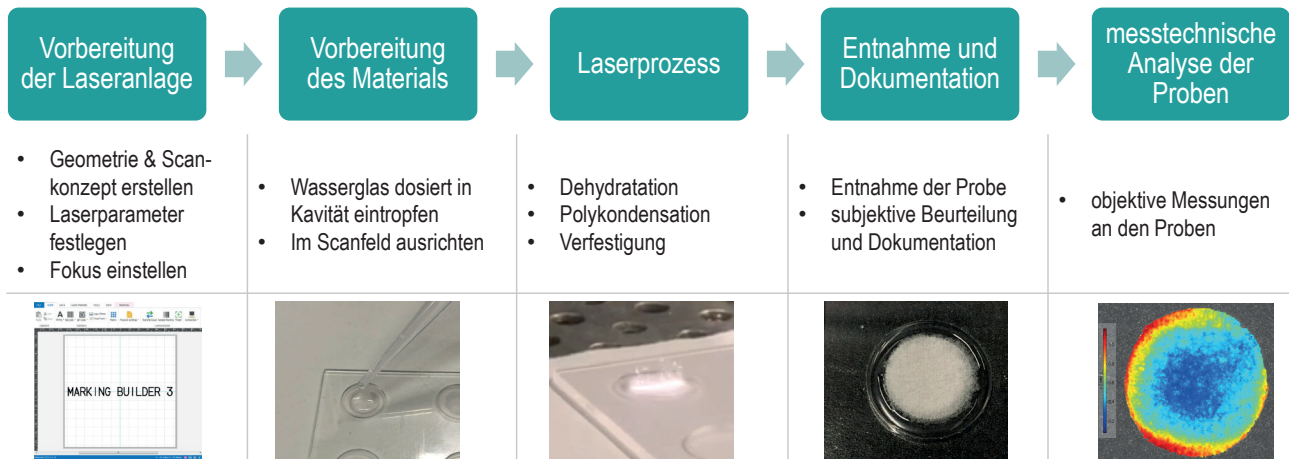


SiO₂-Grundplatte mit Kavitäten

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

Verfahrensprinzip - Einzelschichten



15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

9

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

Ermittlung Scankonzept

- Wahl zwischen „Linienscan“, „Kreuzscan“ und „Spiralscan“
- ein x-y-Kreuzmusterscan (bidirektional) mit konstantem Linienabstand (LA) führt zu homogenen Schichten

Mäander / Linien	Kreuz	Spirale
		
<ul style="list-style-type: none"> - Richtungsabhängigkeit - Vernetzung nur in einer Richtung - Formgenauigkeit unzureichend 	<ul style="list-style-type: none"> - generell geeignet - weniger richtungsabhängig - Vernetzung / Homogenität besser 	<ul style="list-style-type: none"> - ungeeignet - Energiestau in der Mitte der Schicht - Defekte / Anhaftungen an Plattform
		

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

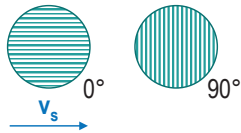
10

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

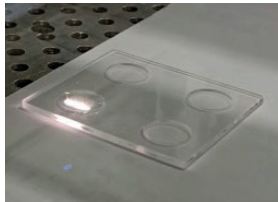
Prozessgrenzen - Einzelschichten

- Einfache Kreiskontur (d = 10 mm)



P = 27 W (100%)
LA = 100 µm
n = 6 (3 scans per direction)

v_s variabel
(1700 - 4100 mm/s)



(1) Entnahme verfestigte Schicht

(2) Messung Schichtdicke

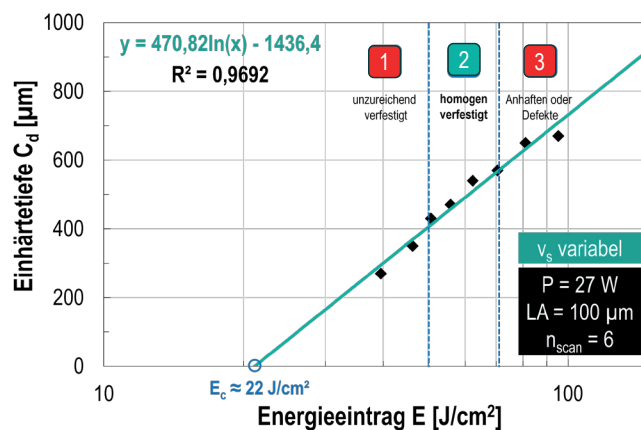
→ Aushärtetiefe in Abhängigkeit der eingestrahlt Flächenenergie („Arbeitskurve“) zur Ableitung möglicher Auflösungen (Schichtdicken)

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

Prozessgrenzen - Einzelschichten

- Laserleistung 27 W, Kreuzmusterscan, Scangeschwindigkeit zw. 1700 und 4100 mm/s

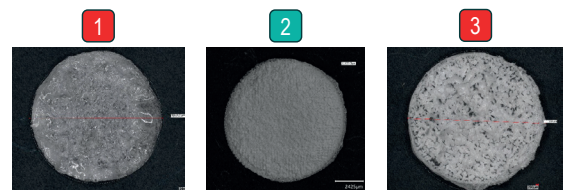


Einhärtetiefe der Einzelschichten in Abhängigkeit der eingestrahlt Flächenenergie für Natronwasserglas 40/42

$$(1) \quad E_{max} = \frac{P}{v_s \cdot LA}$$

$$(2) \quad C_d = l_\alpha \cdot \ln \left[\frac{P}{v_s \cdot LA \cdot E_c} \right]$$

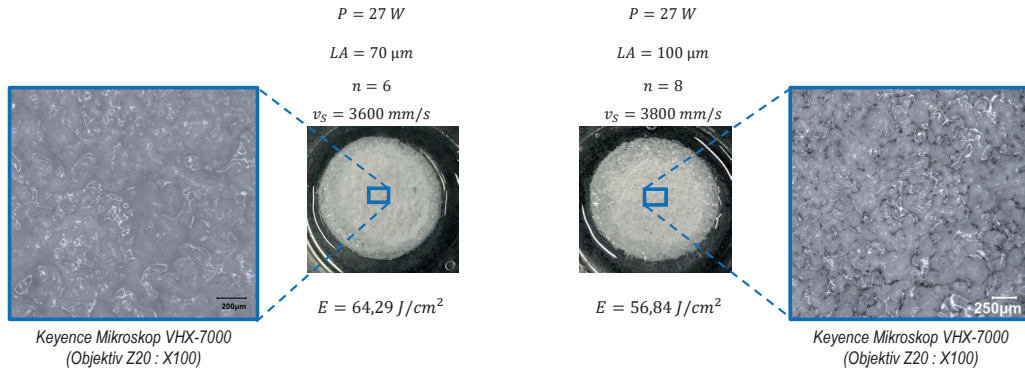
Berechnung von Flächenenergie (1) und Einhärtetiefe (2) nach [Geb16]



2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

Analyse des Linienabstands

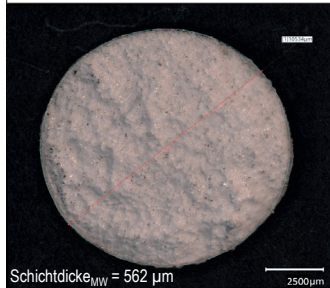
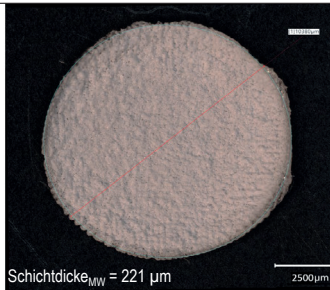


→ Einfluss des Linienabstandes auf den Grad der Verfestigung

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

Einfluss des Feststoffgehalts auf die erforderliche Flächenenergie

Natron-Wasserglas 40/42 (Feststoffgehalt 36,8 %)	Natron-Wasserglas 44 (Feststoffgehalt 44,3 %)
$P = 27 \text{ W}$, $LA = 60 \mu\text{m}$, $v_s = 4000 \text{ mm/s}$, $n = 1$ Resultierende Flächenenergie $E = 90 \text{ J/cm}^2$	$P = 27 \text{ W}$, $LA = 120 \mu\text{m}$, $v_s = 3200 \text{ mm/s}$, $n = 2$ Resultierende Flächenenergie $E = 29 \text{ J/cm}^2$
	
Schichtdicke _{MW} = 562 μm	Schichtdicke _{MW} = 221 μm

Vergleich zwischen zwei laserbasiert verfestigten Schichten aus NaWg40/42 (links) und NaWg44 (rechts)

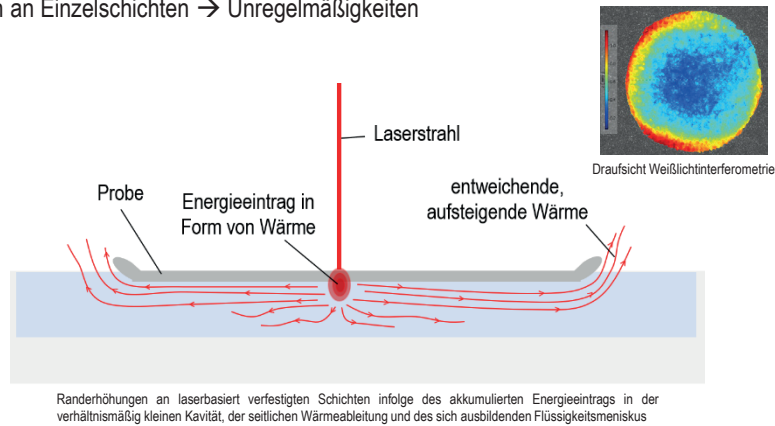
- höherer Feststoffgehalt → weniger Energie erforderlich
- geringerer Energieeintrag → Bessere Ebenheit und geringere Schichtdicken

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.2 Derzeitige Problemstellungen

➤ resultierend aus dem derzeitigen Versuchsaufbau

- Randerhöhungen an Einzelschichten → Unregelmäßigkeiten



15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

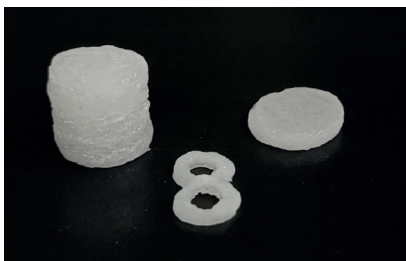
15

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.2 Derzeitige Problemstellungen

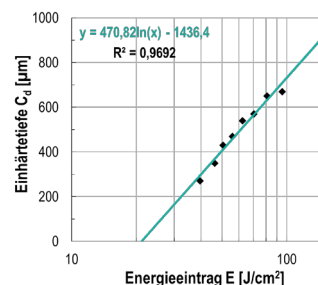
➤ resultierend aus dem derzeitigen Versuchsaufbau

- Unzureichende Form- und Maßhaltigkeit sowie Reproduzierbarkeit durch händisches Vorgehen



v.a. einfache Mehrschichtsysteme weisen Unregelmäßigkeiten durch das „händische“ Vorgehen auf und sind nur bedingt reproduzierbar

- Unzureichende Auflösung (axial/Schichtdicke)



Schichtdicken in Abhängigkeit der eingestrahnten Flächenenergie für NaWg 40/42

- Langwellige Strahlung
→ Fokussdurchmesser ↑
- Händisches Vorgehen
(≠ Achssystem in z-Richtung)
- Materialapplikation nicht ausreichend reproduzierbar

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

16

2. Additive Fertigung - Wasserglas

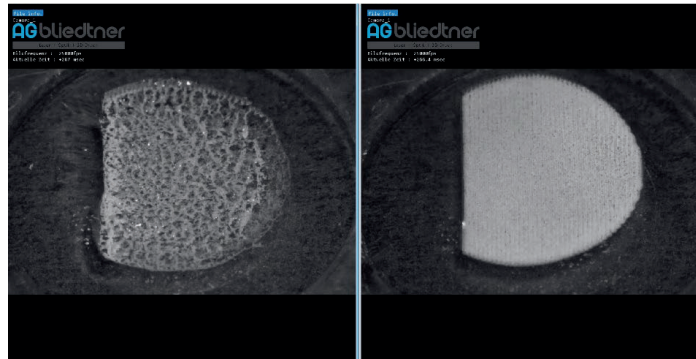
2.2 Derzeitige Problemstellungen

➤ resultierend aus dem derzeitigen Versuchsaufbau

- Einfluss des CO₂ der Umgebungsluft auf das Material

NaWg40/42

(gleiche Parameter, links: direkt nach Einfüllen des Materials; rechts: 3 Minuten nach Einfüllen des Materials)

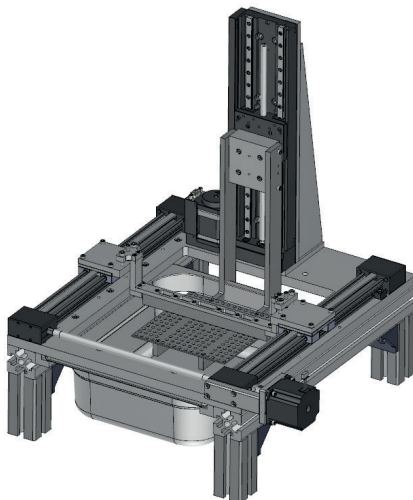


Hochgeschwindigkeitsvideo der laserbasierten Verfestigung im Zeitraffer
→ CO₂ der Umgebungsluft bewirkt teilweise natürliche Abbindevorgänge und beeinflusst daher die Viskosität des Materials

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.2 Lösungsansätze

1 Teilautomatisierte Anlagentechnik



Übersichtsbild des neuen Anlagenkonzepts für den 3D-Druck auf Basis von Wasserglas

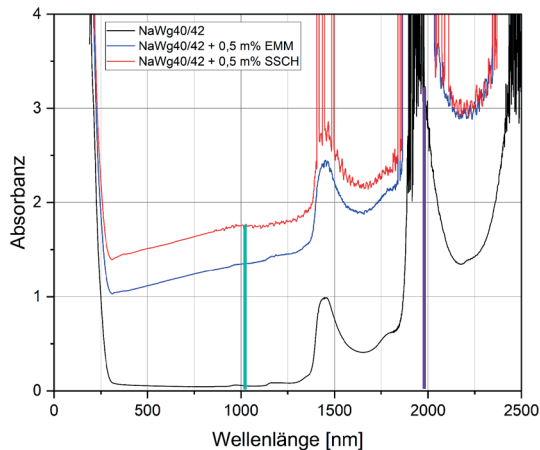
- großes, alkalisch beständiges Materialbehältnis
→ bessere Wärmeableitung & Schichtebenheit
- hochgenaue automatisierte z-Achse mit Bauplattform
→ reproduzierbare und hochaufgelöste Schichten
- mittels Zahnriemenantrieb verfahrbare Recoater
→ Homogenisierung der Badoberfläche / Schichten
- Integration von Sensorik (Luftfeuchtigkeit, Temperatur, CO₂)
- Optikdesign (dynamische Fokus-Anpassung; Strahlprofile)
- ggfs. Abschirmung von Umgebungsluft?

→ Reproduzierbarkeit und Genauigkeit ↑

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.2 Lösungsansätze

2 Verwendung von NIR-Laserstrahlung



- bessere Fokussierbarkeit als im MIR-Bereich ($d_{\text{fokus}} \downarrow$)
- Absorption entscheidend!

verfügbar an EAH Jena:

100 W - Faserlaser (1064 nm)

perspektivisch Thulium-Laser (1950 nm)

Zugabe von absorptionserhöhenden Additiven ins NaWg40/42 (0,5 m%)

(1) Spinellschwarz Nr. 42 (Cu-Cr-O)

(2) Eisen-Mangan-Mischoxid (Fe,Mn)₂O₃

2. Additive Fertigung - Wasserglas

2.2 Lösungsansätze

3 Materialoptimierung und -wiederverwertbarkeit

- Mischungen (Na-, K- und Li-Wasserglas) zur Verbesserung der Wasserbeständigkeit
- Zugabe von Additiven / Derivaten zur Erhöhung der Festigkeit (SiO₂, Kieselsole)
- Weitere absorptionserhöhende Additive zur Nutzung von NIR-Laserstrahlung
 - Glimmerpigmente (Alkali-Erdalkali)
 - evtl. Zinnoxid oder Titanoxid, Eisenoxid
 - Recyclate aus Glasindustrie
- Wiederaufbereitung von gedruckten Formkörpern (Mahlen → Zuschlagsstoff) und von im Behälter zurückbleibendem Material

3. Fazit und Ausblick

Additive Fertigung auf Basis von Wasserglas

- Schichtweise Verfestigung ist prinzipiell mit IR-Laserstrahlung möglich
- um Anforderungen des 3D-Druckes gerecht zu werden, sind Anpassungen notwendig (Anlage, Laser, Material)

1 Neue Anlagentechnik

- höhere Qualität und Reproduzierbarkeit durch Teilautomatisierung, Sensorik, etc.
- perspektivisch für verschiedene Laseranlagen nutzbar

2 Auswahl Laserquelle

- MIR-Laserstrahlung (CO_2 , $10,6 \mu\text{m}$) → Optikdesign (Fokusanpassung, Strahlprofil)
- NIR-Laserstrahlung (Faserlaser 1064 und 1950 nm) → Untersuchungen mit (absorptionserhöhenden) Additiven

3 Materialmodifikation und -wiederverwertbarkeit

- Gezielte Anpassung von Schicht- / Bauteileigenschaften durch Additive (Beständigkeit, Festigkeit, Farbe, etc.)
- Untersuchungen zur Wiederverwertbarkeit der wasserglasbasierten Materialsysteme

3. Fazit und Ausblick

Potenzielle Anwendungsgebiete

- Beständige Prototypen / Designmodelle im Produkt-Entwicklungs-Prozess (PEP)
- Halterungen, Fassungen und Gehäuseteile in der Feinmechanik / Optomechatronik
- Formkörper mit definierter Porosität für bspw. Sensor- / Filteranwendungen
- ...

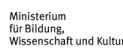
Forschungsgruppe „AddGlas“

Projektlaufzeit: 01.01.2025 - 31.12.2027

Die Forschungsgruppe „**AddGlas** - Additive Fertigungsverfahren auf Basis anorganischer wasserglasbasierter Materialsysteme - ressourceneffizient, recycelbar und hoch flexibel“ (FGR 2024 0057) wird gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds Plus (ESF+) mit der Vorhabensnummer 2024 FGR 0057/0058.

Wir bedanken uns herzlich für die finanzielle Förderung im Rahmen der o.g. Forschungsgruppe.

Richtlinie FTI-Thüringen Personen - Forschungsgruppen



Kofinanziert von der Europäischen Union

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

23

Quellen

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung (2022). *DIN EN ISO / ASTM 52900 – Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie*, EN ISO / ASTM 52900:2022-03.
- [2] Ron, T., et al. (2023). *Additive Manufacturing Technologies of High Entropy Alloys (HEA): Review and Prospects*. *Materials*, 16(6), 2454. <https://doi.org/10.3390/ma16062454>
- [3] Luo, J., et al. (2018). *Additive manufacturing of transparent fused quartz*. *Optical Eng.* 57(4), 041408. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.4.041408>
- [4] Inamura, C., et al. (2018). *Additive Manufacturing of Transparent Glass Structures*. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 5(4), 269-283. <https://doi.org/10.1089/3dp.2018.0157>
- [5] Mader, M., et al. (2021). *Melt-Extrusion-Based Additive Manufacturing of Transparent Fused Silica Glass*. *Adv. Sci.* 2021, 8, 2103180. <https://doi.org/10.1002/advs.202103180>
- [6] Micron3DP (2016). <https://www.3dnatives.com/de/micron3dp-glas-3d-druck-121220161/>
- [7] Toombs, J., et al. (2022). *Volumetric Additive Manufacturing of Silica Glass with Microscale Computed Axial Lithography*. *Science* 376, 380-312. <https://doi.org/10.1126/science.abm6459>
- [8] Kotz, F., et al. (2017). *Three-dimensional printing of transparent fused silica glass*. *Nature*. 2017, 544(7650), 337-339. DOI 10.1038/nature22061
- [9] Bliedtner, J., et al. (2021). *Verfahren zum dreidimensionalen additiven Aufbau eines Formkörpers aus Wasserglas (EP3566868B1)*. Europäisches Patentamt. <https://patents.google.com/patent/EP3566868B1/>
- [10] Pavlowsky, J., et al. (2005). *Wasserglasgebundene Formstoffe? – Untersuchungen zum Einfluss des Silikatmoduls und der Verdünnung auf die Struktur und die Festigkeitseigenschaften von Wasserglaslösungen und zur Kinetik des Härtingsprozesses*. *Giesserei-Praxis* 2005, Nr. 3, 1-7

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

24



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!**

Kontakt:

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Telefon: 03461 205 963
E-Mail: robin.hassel-schmidt@eah-jena.de



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Bildung,
Wissenschaft und Kultur



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds Plus (ESF+) mit der Vorhabensnummer 2024 FGR 0057/0058

15.10.2025

M.Eng. Robin Hassel-Schmidt

12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung

www.eah-jena.de

25

Metallbasierte Additive Fertigung für Hoch- leistungsanwendungen

Wolfram-Intergas-Schweißen additiv und konventionell gefertigter Halbzeuge

Daniel Krug, M.Eng., SFI (IWE); Robert Prowaznik; Dr.-Ing. Johannes Günther

Relevanz der additiven Fertigung

Die additive Fertigung ist eine der Schlüsseltechnologien für die zukünftig ressourcenschonende Herstellung von Produkten. Nach aktuellen Erhebungen [FOR25] ist der größte Marktanteil der generierenden Fertigung die Herstellung endkonturnaher Bauteile und Prototypen. Ein weiteres Potenzial welches mit den additiven Verfahren zu erschließen ist, stellt der Sektor der Instandsetzung und die Just-In-Time Ersatzteilbeschaffung dar. Sie bilden eine größere Schnittmenge mit dem nachhaltigen Einsatz von Rohstoffen, der Langlebigkeit von Produkten und Anlagen, sowie der Sicherung vor instabilen globalen Märkten. Durch die generierenden Verfahren wird nahezu ausschließlich das Material eingesetzt, welches nachfolgend am Produkt funktional benötigt wird. Der Einsatz der subtraktiven Fertigung zur Nachbearbeitung ist erst erforderlich, wenn an die Produkte hohe Anforderungen bezüglich Werkstückoberflächen und Toleranzfeldern gestellt werden. Die Additive Fertigung gliedert sich damit nach der Abfallhierarchie (siehe Abb. 1) in der Ebene der Materialwiederverwendung ein und stellt nach der Vermeidung von zu entledigenden Produkten die zweit effizienteste Strategie im Lebenszyklusdenken dar [EUR08].

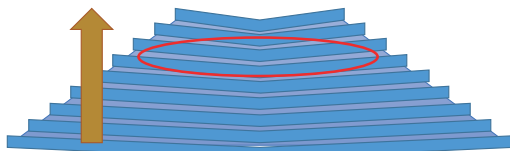


Abb. 1: Abfallhierarchie nach Art. 4 RL 2008/98/EG [EUR08].

Ein Schwerpunkt der additiven Fertigung liegt eindeutig auf der Erzeugung von Bauteilen mit komplexen Konturen. Dies ist vor allem darin begründet, dass die Großserien-Bauteilherstellung mittels konventioneller Fertigungsverfahren deutlich effizienter ist. So ergibt sich beispielsweise beim DED-Arc-Verfahren basierend auf dem Metallschutzgas-Verfahren (MSG) im unteren Leistungsbereich (Kurzlichtbogen) eine Abschmelzleistung von $\dot{V}_t = 5,65 \text{ cm}^3/\text{min}$ (Durchmesser Zusatzwerkstoff $D_Z = 1,2 \text{ mm}$, Vorschub Zusatzwerkstoff $v_Z = 5 \text{ m/min}$).

$$\dot{V}_t = \frac{\pi}{4} * D_Z^2 * v_Z$$

Für die Herstellung eines Rohres, entsprechend der DIN EN 10297-1 mit einer Länge von $l_r = 70 \text{ mm}$, einer Wandstärke von $b = 5 \text{ mm}$ und einem Durchmesser von $D_r = 51 \text{ mm}$, wird bei einer Lagenhöhe von

$t = 1,85 \text{ mm}$, einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 50 \text{ cm/min}$ und einer Abkühlphase $t_A = 30 \text{ s}$ zur Einhaltung der Zwischenlagentemperatur eine Produktivität des Verfahrens von $AP = 2,35 \text{ mm/min}$ erreicht.

$$AP = \frac{l_r}{t_D}, \text{ für: } t_D = \frac{l_r}{t} * (t_A + \frac{\pi * (D_r - b)}{v_f})$$

Nach Brensing et al. [BS19] ist die Produktionsgeschwindigkeit für geschweißte Stahlrohre mit $AP = 100 \text{ m/min}$ um den Faktor $4,93 * 10^4$ produktiver.

Wird die Wirtschaftlichkeitsrechnung zeitunabhängig nach dem spezifischen Energieeintrag betrachtet, wendet sich die Effizienz zu Gunsten der additiven Fertigung. Schlemme et al. [SSA19] weisen eine spezifische Energie von $E_V = 31,14 \text{ J/mm}^3$ ($1,102 \text{ MWh/t}$) für die Herstellung von kaltgewalztem Stahl-Feinblechen aus. Um die Energie der additiven Fertigung der konventionellen Blechherstellung gegenüber stellen zu können, wird die Streckenenergie herangezogen. Anhand der Streckenenergie wird die eingesetzte Leistung und damit der Durchsatz an Zusatzmaterial, sowie die Aufbaurate bestimmt. Der Lichtbogen beim MSG-Prozess erfordert für das Aufschmelzen eines Drahtes $D_Z = 1,2 \text{ mm}$ mit einem Drahtvorschub von $v_Z = 5 \text{ m/min}$ (Kurzlichtbogen) eine Streckenenergie von $E_S = 2,29 \text{ kJ/cm}$ (Stromstärke $I = 108 \text{ A}$; Spannung $U = 17,7 \text{ V}$; Prozessvorschub $v_f = 50 \text{ cm/min}$), woraus eine Leistung von $P = 1.911,6 \text{ W}$ resultiert.

$$P = E_S * v_f, \text{ wobei } E_S = \frac{I * U}{v_f}$$

Durch Bildung des Quotienten aus der eingesetzten Leistung und dem Durchsatz an Zusatzmaterial wird bei einem elektrischen Wirkungsgrad der Schweißstromquelle von $\eta = 0,9$ nach [EPA19] eine spezifische Energie von $E_V = 22,54 \text{ J/mm}^3$ ausgemacht.

$$E_V = \frac{P * 4}{\pi * D_Z^2 * v_Z * \eta}$$

Damit ist der Energiebedarf gegenüber der konventionellen Fertigung um 27,62 Prozent niedriger. Der Einsatz der additiven Fertigung ist somit, sowohl für das Herstellen komplexer Geometrien als auch für die energieeffiziente Produktion von Ersatzteilen von Interesse. Nicht zu vernachlässigen ist an dieser Stelle, dass lediglich der DED-Arc-Prozess basierend auf dem MSG-Verfahren bei dieser Betrachtung mit einbezogen wird.

Paolo et al. [PPM20] analysierten hierzu den gesamten Energieverbrauch der additiven Fertigung, einschließlich des Drahtherstellungsprozesses und der Rohmaterialherstellung und ermittelten eine um den Faktor 3 höhere spezifische Energie gegenüber dem reinen DED-Arc-Schweißprozess.

Ein weiterer Schwerpunkt der additiven Fertigung ist die Verarbeitung einer weitreichenden Palette an Werkstoffen. Dies bedingt die Entwicklung zahlreicher Fertigungsverfahren. Nach [FSK25] umfasst die Bandbreite bereits 42 additive Verfahren, welche sich in der Art des Zusatzwerkstoffs und dessen Zuführung, sowie der Form des Energieeintrages unterscheiden.

Unabhängig von zahlreichen Industrienamen werden gemäß *DIN EN ISO/ASTM 52900* die additiven Verfahren in sieben Prozesskategorien eingeteilt.

- DED - Directed Energy Deposition
- PBF - Powder Bed Fusion
- MEX - Materialextusion
- MJT - Material Jetting
- BJT - Binder Jetting
- VPP - Vat Photo Polymerization
- SHL - Sheet Lamination

Für die Herstellung von metallischen Baugruppen werden nach [FSK25] das DED-, PBF-, MEX- und BJT-Verfahren vorgezogen. Grundsätzlich sind Unterschiede hinsichtlich Wärmeeintrag, der Wärmeabführung, Aufbauraten und Schweißneigung auszumachen, was Auswirkungen auf die Ausprägung des Gefüges und den daraus folgenden Eigenschaften der additiv erzeugten Bauteile hat.

Analyse der Schweißversuche

Um die additive Fertigung auf die Herstellung komplexer Schweißbaugruppen auszuweiten, wurde die Anwendbarkeit von Schweißverfahren untersucht. Ausgangspunkt stellten prozesssichere Parameter zum Lichtbogen-Verbindungsschweißen von konventionell hergestelltem Halbzeug dar. Gemäß der DIN EN ISO 15614 für Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe (Schweißverfahrensprüfung) wird keine konkrete Festlegung getroffen, nach welchem Herstellungsverfahren der Grundwerkstoff von Prüfstücken hergestellt werden soll. Damit schließt die Absolvierung einer Schweißverfahrensprüfung das Verbindungsschweißen additiv gefertigter Bauteile nicht konkret aus.

Zunächst wurden Parameter zum Verbinden warmgewalzter Bleche aus dem Werkstoff AISI 316L (1.4404) verifiziert. Als Fügeprozess wurde das Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) mit Hyperpuls ohne Zusatzwerkstoff gewählt (ISO 4063 – 142).

- Schutzgas nach DIN EN ISO 14175 - II
- Schutzgasmenge $\dot{V} = 18 \text{ L/min}$
- Formiergas DIN EN ISO 14175 – N1
- Impulsschweißen
- Schweißstrom $I_1 = 200 \text{ A}$; $I_2 = 150 \text{ A}$
- Puls-Frequenz $f = 10 \text{ Hz}$;
- Start-Verweilzeit $t_V = 2.150 \text{ ms}$
- Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 24 \text{ cm/min}$

Mit denselben Parametern wurden anschließend unterschiedlich additiv erzeugte Proben mit konventionellen Blechen ($b = 3 \text{ mm}$) gefügt. Die additiven Proben wurden mit dem Verfahren DED-LB(w/p), DED-Arc (basierend auf dem MSG-Verfahren) und PBF-LB hergestellt. Des Weiteren wurden nach einer Parameteranpassung rotationssymmetrische Profile verschweißt ($D_r = 42,4 \text{ mm}$; $b = 3,2 \text{ mm}$). Bei der Analyse der Proben wurden deutlich sichtbare Unregelmäßigkeiten festgestellt:

- Einbrandkerben nach ISO 6520-1-5011
- Nahtüberhöhung nach ISO 6520-1-502
- Abmessung Wurzel nach ISO 6520-1-5042
- Abmessung Wurzel nach ISO 6520-1-5212
- Durchbrand nach ISO 6520-1-510

Je nach additivem Verfahren sind die Unregelmäßigkeiten unterschiedlich stark ausgeprägt. Hybride Schweißverbindungen mit DED-LB(p), d.h., mit pulverförmigem Ausgangswerkstoff, erzeugte Proben weisen die gravierendsten Einbrandkerben (vgl. Abb. 2) und deutlichste Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Wurzelabmessung auf.



Abb. 2: Einbrandkerbe bei hybrider WIG-Schweißnaht, additiv gefertigtes Rohr mittels DED-LB(p), AISI 316L.

Bei den DED-Arc-Proben war ein Verschweißen ohne Durchbrand mit den gleichen Parametern, verglichen mit artgleichen konventionellen Schweißstücken, nicht möglich (vgl. Abb. 3). Durch die Anpassung der Parameter konnten die Unregelmäßigkeiten reduziert, jedoch nicht behoben werden.

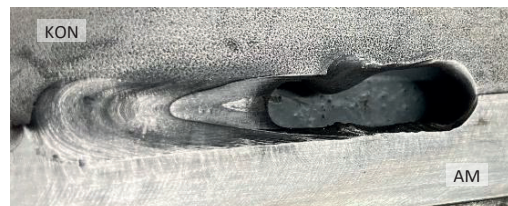


Abb. 3: Durchbrand bei hybrider WIG-Schweißnaht, additiv gefertigtes Blech mittels DED-Arc (MSG), AISI 316L.



Abb. 4: Makroschliff einer hybriden WIG-Schweißverbindung, links DED-LB(p) (AM) und rechts KON, Grundwerkstoff AISI 316L.

Die größte Fragestellung ergab sich beim vorliegenden Wurzelversatz. Für die genaue Ursachenermittlung wurden hier zerstörende Prüfungen der Proben durchgeführt. Durch Schliffpräparationen konnte die Asymmetrie der Schweißnaht deutlich sichtbar gemacht werden (vgl. Abb. 4).

In der Abb. 4 ist auf der linken Seite der additiv gefertigte Grundwerkstoff (AM) mit dem gerichteten Dendritenwachstum zu erkennen. Auf der rechten Seite ist die Walzstruktur des konventionell hergestellten Halbzeugs (KON) und eine ausgeprägte Wärmeinflusszone sichtbar. Auf der additiven Seite ist die Wärmeinflusszone aufgrund des Dendritenwachstums in das Schmelzgut hinein nicht genau identifizierbar. Darüber hinaus lässt sich eine ausgeprägte Dynamik in der Kornstruktur vom Bereich der Einbrandkerbe auf der additiven Seite bis zur Mitte des Schweißgutes feststellen. Dies gab Anlass den Schweißprozess mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Thermografie zu dokumentieren. Die Thermografieaufnahmen haben gezeigt, dass keine asymmetrische Wärmeleitung stattfindet.

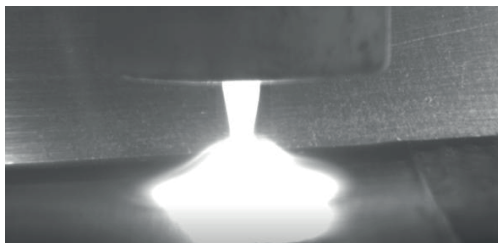


Abb. 5: Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim WIG-Schweißen von hybrid hergestelltem Grundwerkstoff aus AISI 316L.

Bei der Beobachtung des Prozesses mittels Hochgeschwindigkeitskamera (Bildrate 3.600 fps, Auflösung 1024x512) konnte ebenfalls keine Lichtbogenablenkung außerhalb des Werkstoffes ausgemacht werden (vgl. Abb. 5). Jedoch wurde bei den Aufnahmen eine asymmetrische Fließbewegung im Schmelzbad festgestellt, die bereits bei der Sichtprüfung während des Schweißprozesses wahrnehmbar war. Sowohl das Schmelzbad als auch die darauf befindliche Oxidschicht waren einseitig in Richtung des konventionell gefertigten Grundwerkstoffs verlagert (vgl. Abb. 6). In Folge dessen ist geschlussfolgert worden, dass eine Beeinflussung des Schmelzbades stattfindet. Als Indiz wurde der Einfluss von Ablenkungskräften aufgrund eines magnetischen Feldes ausgemacht.



Abb. 6: Asymmetrische Schmelzbadablenkung zum KON-Grundwerkstoff beim WIG-Schweißen von hybridem AISI 316L.

Metallografische Analyse

Eine Analyse der DED-LB(p)-Proben hat ergeben, dass ein deutlich höherer δ -Ferrit-Anteil im Gefüge vorliegt (vgl. Abb. 7 und Abb. 8). Dies führte wiederum zu einem Anstieg der Permeabilität $\gg 1$. Der gleiche Effekt wurde bei allen additiven Proben festgestellt, da ferromagnetische Eigenschaften mittels Dauermagneten ausgemacht werden konnten.

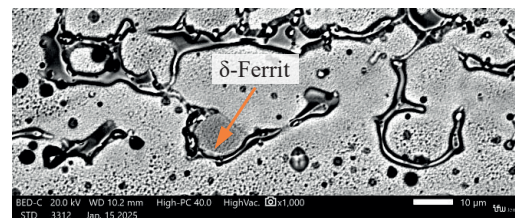


Abb. 7: δ -Ferrit im additiv gefertigten Grundwerkstoff, AISI 316L.

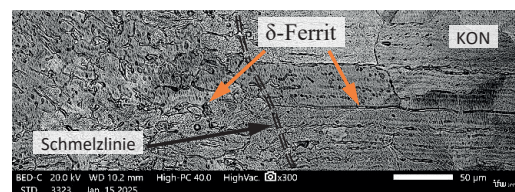


Abb. 8: δ -Ferrit-Ausprägung und Schmelzlinienverlauf, AISI 316L.

Ein weiteres Indiz stellt der Einfluss oberflächenspannungsreduzierender Spurenelemente dar. Marincek [MAR51] analysierte den Einfluss der Oberflächenspannung auf die Ausbildung der Graphitform im Gusseisen. Dabei konnte bereits fundiert gezeigt werden, dass oberflächenaktive Elemente einen signifikanten Effekt auf die inneren Bindungsverhältnisse in der Schmelze haben. Die Oberflächenspannung entsteht durch die gegenseitige Anziehung der Atome. Bei Eisenbasislegierungen besitzen nach Marincek [MAR51] insbesondere Elemente der VI. Hauptgruppe des Periodensystems eine erhöhte Affinität zu Eisenatomen, wodurch die inneren Bindungskräfte geschwächt werden. Gautschi [GAU57] leitete aus diesen Erkenntnissen ab, dass oberflächenspannungsreduzierende Stoffe (inaktiv) die inneren Bindungskräfte schwächen, während kapillaraktive Substanzen diese inaktiven Stoffe aus der Oberfläche verdrängen. Aus metallurgischer Sicht kann die Oberflächenspannung bei Eisenbasislegierungen durch die Behandlung der Schmelze mit Desoxidations- bzw. Entschwefelungsmitteln gezielt verändert werden. Diese Regulierung erfolgt im Rahmen der Sekundärmetallurgie bei der Rohmaterialherstellung.

So zeigen z. B. Aluminium, Calcium und Silizium eine desoxidierende, Calcium und Mangan eine entschwefelnde Wirkung [GAU57]. Nach Mills und Keene [MK90] beeinflussen die gebildeten Sulfide und Oxide die Oberflächenspannung des Metalls nur noch geringfügig. Dass die Reinheit und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Rohmaterialchargen entscheidend sind, wurde durch Untersuchungen von Glickstein et al. [GY77] aufgezeigt. In den 1970er Jahren kam es mit der Einführung des automatisierten Lichtbogenschweißens vermehrt zu Änderungen in der Nahtgeometrie. Ursache dafür waren Schwankungen von Spurenelementen zwischen den Werkstoffchargen.

Während die Reduzierung oberflächenaktiver Elemente ein etablierter Bestandteil der Rohmaterialherstellung ist, hat sich gleichzeitig gezeigt, dass ein gewisser Anteil dieser Elemente für die Verarbeitung von Schweißzusatzwerkstoffen relevant ist. Mills und Keene [MK90, MKB98] forschten experimentell zur Bestätigung der Heiple-Roper-Theorie [HR82A, HR82B, HBR83, HRS83] und konnten zeigen, dass oberflächenaktive Elemente einen maßgeblichen Einfluss auf die Einbrandtiefe haben. Wie von Mills und Keene [MK90, MKB98] beschrieben führt eine niedrige Oberflächenspannung zu einer hohen Schweiß-eindringtiefe. Bestätigt wird dies durch Untersuchungen von Wei et al. [WPM15]. Ein höherer Schwefelgehalt im ppm-Bereich zeigt hier eine positive Wirkung. Eine niedrigere Schweiß-eindringtiefe korreliert wiederum mit einem niedrigen Schwefelgehalt. Dabei steht insbesondere die thermokapillare Konvektion (Marangoni-Effekt) im Fokus, was durch Sahoo et al. [SDM88] bestätigt wurde. Sahoo et al. [SDM88] argumentieren, dass die Oberfläche des Schweißbads einen Temperaturgradienten aufweist: Direkt unter dem Lichtbogen herrscht eine höhere Temperatur als in den Randbereichen. Gleichzeitig liegt laut Kou et al. [KLW11] ein oberflächenspannungsabhängiger Gradient vor, der mit dem Temperaturverlauf korreliert.

Ist die Schweißbadströmung für die Verlagerung der heißen Schmelze relevant, kann sie durch einen Vorzeichenwechsel im Richtungsvektor der Oberflächenspannung umgekehrt werden. Andere Strömungsmechanismen wie elektromagnetische Kräfte, Auftriebskräfte und Strömungswiderstände werden von Mills und Keene als nachrangig gegenüber den thermokapillaren Kräften betrachtet [MK90, MKB98]. Ein entscheidendes Ergebnis, das beim WIG-Schweißen von Mills und Keene festgestellt wurde, ist die asymmetrische Ausbildung der Schweißnaht [MK90, MKB98]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Tinkler et al. [TGM83] beim Verbindungsschweißen zweier Stahlplatten mit Schwefelgehalten von 30 ppm bzw. 90 ppm: Die Schweißnaht war stets zur schwefelärmeren Seite hin exzentrisch ausgebildet. Mills und Keene erklären diesen Effekt durch die Überlagerung der ther-

mokapillaren und diffusiokapillaren Konvektion, basierend auf Temperatur- und Konzentrationsgradienten [MK90, MKB98]. Ein vergleichbares Ergebnis konnte auch beim hybriden Verbindungsschweißen additiv und konventionell gefertigter Halbzeuge am ifw Jena beobachtet werden. Dies gab Anlass, die additiven und konventionellen Proben einer Spektralanalyse zu unterziehen. Die Analyse wies einen deutlichen Unterschied im Schwefelgehalt nach. Die untersuchten additiv gefertigten Proben (DED-Arc, DED-LB(p/w), PBF-LB) verfügen über einen Schwefelgehalt von durchschnittlich 63 ppm. Dem gegenüber weisen die konventionellen Proben (KON) lediglich einen Schwefelgehalt von 6 ppm auf (vgl. Tabelle 1).

	Mn (%)	Si (%)	Al (ppm)	Ca (ppm)	Se (ppm)	S (ppm)
max	2.00	1.00	0	k. A.	k. A.	300
min	0.00	0	2000	k. A.	k. A.	0
KON - Sheet 3 mm	1.10	0.325	10	6	100	6
DED-LB (p)	0.598	0.304	10	3	126	56
DED-Arc	1.54	0.722	15	7	33	73
PBF-LB	1.13	0.841	21	6	112	73
DED-LB (w)	1.68	0.852	25	18	38	77
KON - Pipe 42.4 x 3.2	1.17	0.434	20	4	98	6
PBF-LB	1.30	0.612	109	8	106	27
DED-LB (p)	1.66	0.270	23	7	86	73

Tabelle 1: Gehalt oberflächenspannungsbeeinflussender Elemente im Werkstoff AISI 316L (nach [MK90, MKB98]).

Nach Mills und Keene wird der Kippunkt des entscheidenden Schwefelgehaltes bei 40 ppm ausgemacht. So wird der Temperaturkoeffizienten der Oberflächenspannung dy/dT positiven, wenn der Gehalt bei über 40 ppm liegt [MK90, MKB98].

Die Beeinflussung der Schweiß-eindringtiefe lässt vermuten, dass der festgestellte Wurzelversatz durch eine Ablenkung des Lichtbogens hervorgerufen wird. Die durchlaufende Einbrandkerbe an der additiven Probe kann jedoch - wie von Mills und Keene dargestellt - auf eine Schmelzbadverschiebung infolge thermokapillarer Konvektion zurückgeführt werden [MK90].

Vorversuche zur magnetischen Lichtbogenablenkung

Durch den Einsatz eines Dauermagneten (30 kg Haftkraft, bei einer wirksamen Kontaktfläche von 1000 mm²) war es möglich, beim Verbindungsschweißen eine Schweißnaht ohne Einbrandkerben, Nahtüberhöhung und Wurzelversatz zu erzeugen (siehe Abb. 9 und Abb. 11). Der Magnet wurde dabei auf das additive Material mit einem Luftspalt von 22 mm zur Wolfram-Elektrode positioniert. Hieraus resultiert eine theoretische magnetische Flussdichte von rund 355,5 mT. Nach Füssel genügen bereits 2,5 mT, um einen WIG-Lichtbogen mit $I = 100$ A effektiv mit einem longitudinalen Magnetfeld auslenken zu können [FÜS13]. Die Ausprägung der Fügezone verläuft durch den Einfluss des Magnetfeldes symmetrisch, was wiederum auf eine gleichmäßige Schmelzbadströmung hinweist.

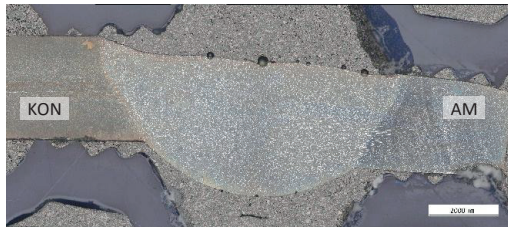


Abb. 9: Magnetisch beeinflusste Schweißverbindung, links KON und rechts DED-LB(p) Grundwerkstoff, AISI 316L.

Wie von Lindenau [LIN06], sowie von Berger [BER06] beschrieben ist die positive Wirkung des Dauermagneten anhand der wirkenden Lorentzkraft zu erklären. Dies führt zu einer Asymmetrie des Schmelzbades. Hieraus lässt sich ableiten, dass die gleichzeitige Wirkung von Marangoni-Strömung und Lorentzkraft die jeweiligen Effekte aufheben kann. Der Einsatz elektromagnetischer Lichtbogenablenkung gilt als vielversprechend. Nach Wang et al. [WCZ17] beeinflusst sie die Mikrostrukturentwicklung und verhindert die Ausbildung zellulärer Dendriten. Ein entsprechender Effekt konnte auch bei der Auswertung der am ifw Jena gefertigten Proben ermittelt werden.

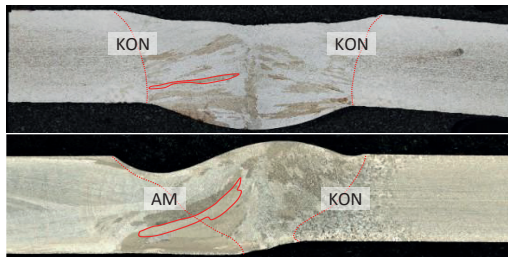


Abb. 10: Kornwachstumsverhalten beim WIG-Schweißen konventioneller (KON/KON, siehe Abb. 10 oben) und hybrider Grundwerkstoffe (DED-LB(p)/KON, siehe Abb. 10 unten) aus AISI 316L.

Während bei den konventionellen Blechproben (KON) kein gerichtetes Dendritenwachstum vom Grundwerkstoff in die Fügezone festzustellen ist (klar abgrenzende Schmelzlinie entlang vertikal verlaufender roter Punktlinie, siehe Abb. 10 oben), ist bei hybriden Schweißverbindungen (AM / KON) diese auffindig zu machen (rot eingerahmter Bereich, siehe Abb. 10 unten). Bei der unter Einsatz eines Dauermagneten geschweißten hybriden Verbindung ist dieser Effekt aufgehoben (vgl. Abb. 11). Die Schmelzlinien verlaufen annähernd symmetrisch (rote Punktlinien, Abb. 11) und der Wurzelversatz ist nahezu ausgeglichen (rote Senkrechten in Nahtmitte, Abb. 11).

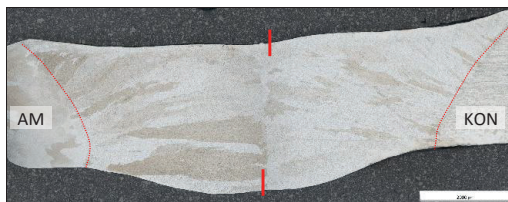


Abb. 11: Symmetrische Fügezone beim durch Dauermagnete beeinflussten WIG-Schweißen eines hybriden Grundwerkstoffs (DED-LB(p) / KON), AISI 316L.

Neben dem Effekt der Schmelzbadstützung, wie er nach Biegler [BIE18] bei elektromagnetischen Schweißbadsicherungen zum Einsatz kommt, kann nach Berger [BER06] durch die im Schmelzbad wirkende Lorentzkraft eine Umorientierung der Schmelzbadströmung gefördert werden – unabhängig von der Lichtbogenablenkung und der daraus resultierenden Änderung des Temperaturgradienten.

Um die am ifw Jena gemachten Ergebnisse nicht anhand einer ausgewählten Blechcharge und einem Werkstoff auszumachen, wurden Vergleichsproben hergestellt. Als alternativer Werkstoff wurde eine Nickelbasislegierung Inconel 718 (2.4668) analysiert. Auch bei der Nickelbasislegierung ist ein deutlicher Wurzelversatz aufgetreten (siehe Abb. 12).

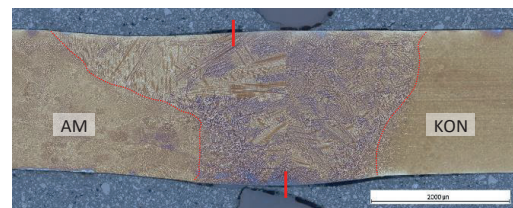


Abb. 12: Wurzelversatz beim WIG-Schweißen einer hybriden Nickelbasislegierung: links DED-LB(w), rechts konventioneller Grundwerkstoff, Inconel 718.

Hierbei ist anzumerken, dass die Differenz im Schwefelgehalt zwischen additiv und konventionell hergestelltem Grundwerkstoff bei der Spektralanalyse deutlich geringer ausfiel (vgl. Tabelle 2) als beim Werkstoff AISI 316L (1.4404). Aufgrund eines Schwefelgehalts über 40 ppm ist zwar nach Mills und Keene eine Umkehr des Vorzeichens des Temperaturkoeffizienten der Oberflächenspannung zu erwarten [MK90, MKB98], jedoch liegen die Gehalte sowohl bei der additiven als auch bei der konventionellen Probe über diesem Wert. Weiterhin wurden die Ergebnisse von Mills und Keene anhand einer Eisenbasislegierung gemacht [MK90]. Mills und Keene verweisen in diesem Zusammenhang auf Untersuchungen von Savage et al. zum Einfluss der Elemente S, P, Si, Mn, Ti und Al auf die Oberflächenspannung bei Inconel 600 [MK90, SNG77]. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass neben Schwefel insbesondere Silizium einen entscheidenden Einfluss ausübt. Vor allem beim gleichzeitigen Vorliegen beider Elemente kann ein positiver Effekt auf die Schweißnahttiefe erreicht werden. Aus Tabelle 2 geht hervor, dass beim Siliziumgehalt eine Differenz von etwa 15 % besteht und beim Schwefelgehalt ein Unterschied von rund 25 % festzustellen ist. Für eine genaue Ursachenidentifikation sind weitere Untersuchungen erforderlich.

	Mn (%)	Al (%)	P (ppm)	Si (%)	Ti (ppm)	S (ppm)
max	0.35	0.80	0	0.35	0.65	150
min	0	0.20	150	0.00	1.15	0
KON - Sheet 3 mm	0.076	0.552	30	0.131	0.863	47
DED-LB (w)	0.111	0.473	21	0.114	0.806	59

Tabelle 2: Gehalt oberflächenspannungsbeeinflussender Elemente im Werkstoff Inconel 718 (nach [MK90, SNG77]).

Ausblick

Die Ergebnisse der Versuche legen nahe, dass weitere Materialien untersucht werden sollten und eine verifizierbare Lösung für das stoffschlüssige Fügen hybrider Verbindungen zu entwickeln ist. Vor allem die chemische Zusammensetzung stellt ein wiederkehrendes Problem dar. Bereits in früheren Untersuchungen traten Herausforderungen aufgrund von Unterschieden zwischen konventionellen Rohmaterialchargen auf – beim Verbindungsschweißen hybrid gefertigter Baugruppen zeigt sich diese Problematik erneut.

Mit der erfolgreichen Umsetzung des Forschungsvorhabens lässt sich eine Bandbreite an Potenzialen erschließen, um die Effizienz der Produktherstellung nachhaltiger zu gestalten. Im Rahmen des Mass Customization kann eine Rohstoffeinsparung durch gezielten Materialeinsatz oder der Substituierung von konventionellem Material umgesetzt werden. Dies dient zum Beispiel einer funktionsoptimierten Festigkeitssteigerung oder Verschleißschutz. Es wird ermöglicht einen Dienstleistungsmarkt zur effizienten Produktinstandsetzung zu generieren. Hier liegt der Fokus vor allem auf der Intensivierung einer „ausfallbedingter“ Instandsetzung, um daraufhin Just-In-Time additive Ersatzteile zu generieren oder aber defekte Baugruppen instand zu setzen. Auch die Ersatzteilbeschaffung bereits eingestellter Produkte können ein entscheidender Faktor sein. Dies ermöglicht zum Beispiel die Erhaltung von produktivem Maschinenbestand. Grundsätzlich ist das Ziel additive Bauteile auf dem Markt effizient einzusetzen. Die Technologieoffenheit zum Fügen additiver Bauteile ist hierzu essenziell. Daher wird die Anwendung von marktetablierten konventionellen Verfahren, wie das MSG- und WSG-Schweißen als erforderlich angesehen.

Die nachfolgende Projektgestaltung zielt dabei auf folgende Rahmenbedingungen ab:

- Die additive Fertigung von Proben soll möglichst mit gleichem Draht und Pulvercharge ausgeführt werden. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Proben.
- Ergänzend sollen Chargen von konventionellen Blechen mit unterschiedlichem Gehalt an oberflächenaktiven Elementen miteinander gefügt werden.
- Das Verbindungsschweißen mit dem MSG-Lichtbogenprozess soll mit Drähten mit unterschiedlichem Gehalt an oberflächenaktiven Elementen ausgeführt werden.
- Die Prozessstabilität durch eine reduzierte Lichtbogenablenkung soll auf Basis eines WIG-Verfahrens mit magnetisch bewegtem Lichtbogen („WIG-185“ angelehnt an ISO 4063) erprobt werden.

Hierzu wird ein hierauf ausgerichtetes Forschungsvorhaben am ifw Jena vorbereitet.

Primärliteratur

[BER06] – **BERGER, P.:**

Laserstrahlschweißen mit magnetischer Beeinflussung. Universität Stuttgart Institut für Strahlwerkzeuge, 2006.

[BIE18] – **BIEGLER, M.:**

Laserstrahl- und Hybridschweißen : mit elektromagnetischer Schmelzbadunterstützung. Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, 2018.

[BS19] – **BRENSING, K.-H.; SOMMER, B.:**

Herstellverfahren für Stahlrohre. Mannesmannröhren-Werke AG; Mühlheim an der Ruhr Germany, 2019.

[EUR08] – **EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT:**

Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der EU L 312, Kapitel 1, Artikel 4, 2008.

[FOR25] – **FORTUNE BUSINESS INSIGHTS PVT. LTD.:**

Marktgröße, Anteil und Branchenanalyse für 3D-Druck, nach Komponente (Hardware, Software, Dienstleistungen), nach Technologie (FDM, SLS, SLA, DMLS/SLM, Polyjet, Multi Jet Fusion, DLP, Binder Jetting, EBM, CLIP/CDLP, SDL, LOM), nach Anwendung (Prototyping, Produktion, Proof of Concept, andere), nach Endbenutzer (Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt und Verteidigung, Gesundheitswesen, Architektur und Bauwesen, Konsumgüter, Bildung, andere) und regionale Prognose, 2024- 2032. Maharashtra, India, 2025.

URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/industrie-be-richte/markt-f-r-3d-druck-101902>
22.07.2025

[FSK25] – **FSKZ e. V.:**

Überblick der Technologien für additive Fertigungsverfahren. FSKZ e. V.; Würzburg Germany, 2025.
URL: <https://www.skz.de/forschung/prozess/ueberblick-additive-fertigungsverfahren>
22.07.2025

[FÜS13] – **FÜSSEL, U.:**

Wirtschaftliches WIG-Fügen durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens. Technische Universität Dresden, AIF -Forschungsvereinigung, IGF-Vorhaben 16.779 BR, 2013.

[GAU57] – **GAUTSCHI, R.:**

Die Oberflächenspannung des flüssigen Gusseisens und ihr Einfluss auf die Graphitform. Eidgenössische technische Hochschule in Zürich, Verlag P. G. Keller Winterthur, 1957.

[EPA19] – **Hackl, H.:**

Stromquellen zum MIG und WIG-Schweißen. EPA Schweisstechnik GmbH, Wels Thalheim, Germany, 2019.

[LIN06] – LINDENAU, D.:

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen.
Universität Stuttgart; Stuttgart Germany, 2006.

[MK90] – MILLS, K. C.; KEENE, B. J.:

Factors affecting variable weld penetration.
The Institute of Metals and ASM International,
In: International Materials Reviews, Vol. 35, No. 4,
1990.

**[MKB98] – MILLS, K. C.; KEENE, B. J.;
BROOKS, R. F., CHIRALO, A.:**

Maragani effects in welding.
Centre for Materials, Measurement and Technology,
National Physical Laboratory, Teddington UK,
In: Philosophical transactions of the Royal Society,
No. 356, 1998.

**[PPM20] – PRIARONE, P. C.; PAGONE, E.;
MARTINA, F.; CATALANO, A. R.; SETTINERI, L.:**

Multi-criteria environmental and economic impact
assessment of wire arc additive manufacturing.
In: CIRP Annals, Manufacturing Technology,
Vol. 69, Issue 1, S. 37, 2020.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.010>
22.07.2025

**[SSA19] – SCHLEMMER, J.; SCHIMMEL, M.;
ACHTELIK, CH.:**

Energiewende in der Industrie - Potenziale und
Wechselwirkungen mit dem Energiesektor.
In: Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie.
Navigant Energy Germany GmbH, 2019.

**[WCZ17] – WANG, CH.; CHEN, H.; ZHAO, Z.;
CAO, L.; JIANG, P.; MI, G.:**

Influence of axial magnetic field on shape and micro-
structure of stainless steel laser welding joint.
In: The International Journal of Advanced Manufac-
turing Technology, Springer Verlag, 2017.

**[WPM15] – WEI, H. L.; PAL, S.; MANVATKAR, V.;
LIENERT, T. J.; DEBROY, T.:**

Asymmetry in steel welds with dissimilar amounts of
sulfur. The Pennsylvania State University, 2015.

Sekundärliteratur

[GY77] – GLICKSTEIN S. S.; YENISCAVICH, W.:

A Review of Minor Element Effects on the Welding
Arc and Weld Penetration.
In: Welding Research Council bulletin, No. 226,
1977.

[HR82A] – HEIPLE, C.R.; ROPER J. R.:

Effects of minor elements on GTAW fusion zone
shape. Proc. Conf. In: Trends in Welding Research in
the United States, the American society for metals,
Metals Park, Ohio : The Society, S. 489, 1982.

[HR82B] – HEIPLE, R. C.; ROPER, J. R.:

Mechanism for minor elements effect on GTA fusion
zone geometry. In: Welding Research Council bulletin,
S. 97, 1982.

**[HBR83] – HEIPLE, R. C.; BURGHARDT, P.;
ROPER, J. R.; LONG, J. L.:**

The effects of residual impurity and microalloying el-
ements on weldability and weld properties.
The Welding institute, Abington Cambridge,
Paper 36, 1983.

**[HRS83] – HEIPLE, R. C.; ROPER, J. R.;
STAGNER, R. T.; ADEN, R. J.:**

Surface active element effects on the shape of GTA,
Laser, and Electron Beam Welds : The results of ex-
perimentation confirm the surface tension driven
fluid flow model for the effect of minor elements on
GTA weld pool shape. In: Welding Research Council
bulletin, S. 72, 1983.

**[KLW11] – KOU, S.; LIMMANEEVICHITR, C.;
WIE, P. S.:**

Oscillatory Maragani Flow : A fundamental study by
conduction-mode Laser spot welding.
In: Welding Research Council bulletin,
Vol. 90, No. 12, S. 229, 2011.

[MAR51] – MARINCEK, B.:

Beitrag zur Herstellung von Gusseisen mit Kugelgra-
phit. In: Gesellschaft der Ludwig-von-Roll'schen Ei-
senwerke, Von-Roll-Mitteilungen 10, 14/44, 1951.

**[SDM88] – SAHOO, P.; DEBROY, T.;
MCNALLAN, M. J.:**

Surface tension of binary metal : surface active solute
systems under conditions relevant to welding metal-
lurgy. In: Metallurgical and Materials Transactions B,
Vol. 19, No. 2, S. 483, 1988.

**[SNG77] – SAVAGE, W. F.; NIPPES, W. F.;
GOODWIN, G. M.:**

Effect of minor elements of hot-cracking tendencies
of Inconel 600.
In: Welding Journal, vol. 56, S. 126, 1977.

**[TGM83] – TINKLER, M. J.; GRANT, I.; MIZUNO, G.;
GLUCK, C.:**

Welding 304L stainless steel tubing having variable
penetration characteristics.
The Welding Institute, Abington Cambridge,
Paper 29, 1983.



Laserinstitut
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE
MITTWEIDA
University of Applied Sciences

Entwicklung additiv gefertigter Mikro- Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718

Florian Heinrich, M.Sc.



www.laser.hs-mittweida.de



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch
Steuermittel auf der Grundlage des vom
Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

1. Motivation und Zielsetzung
2. Überblick zu TPMS-Strukturen
3. Stand der Forschung
4. Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen
5. Wärmetauscher-Design und Tests
6. Zusammenfassung und Ausblick



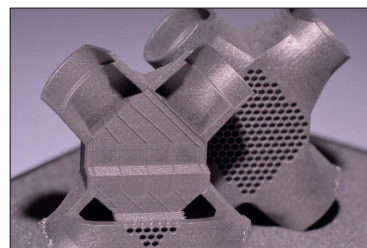
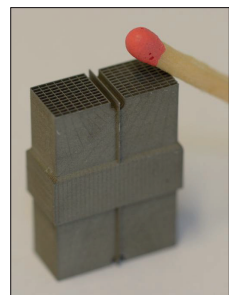
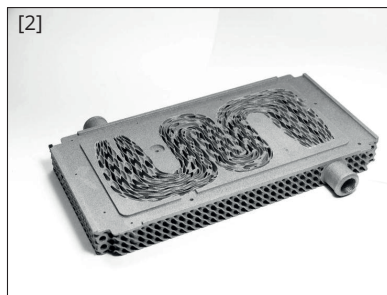
Laserinstitut
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Motivation und Zielsetzung

Motivation und Zielsetzung



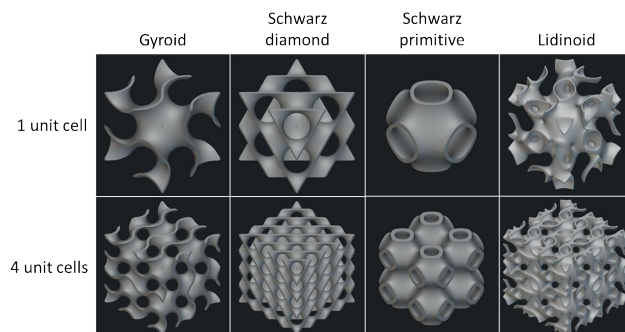
4

Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

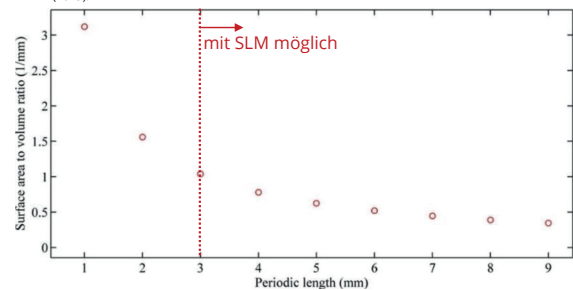
Überblick zu TPMS-Strukturen

Überblick zu TPMS-Strukturen

TPMS (engl. *triply periodic minimal surfaces*) sind Strukturen, die sich in **allen drei Raumrichtungen periodisch wiederholen** und durch **mathematische Formeln** beschrieben werden können.



Peng, H.; Feng G.; and Hu, W.: "Design, modeling and characterization on triply periodic minimal surface heat exchangers with additive manufacturing." Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (2019).



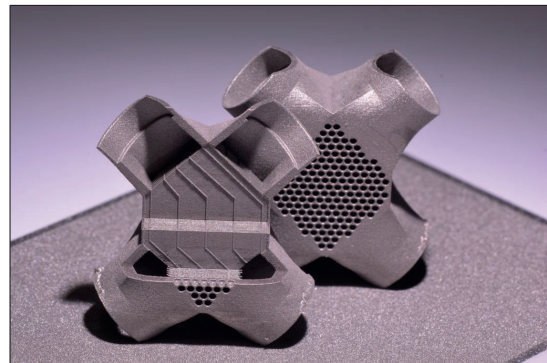
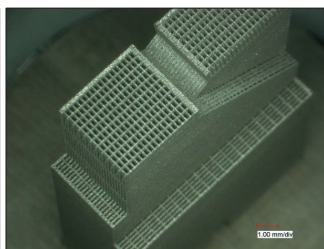
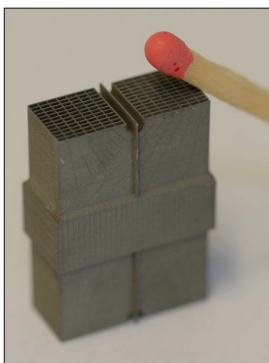
Vorteile:

- leicht, aber dennoch stabil
 - selbststützend und daher problemlos additiv herstellbar
 - erzeugen zwei separate, aber ineinander verschlungene Volumina
- ideal für die Entwicklung 3D-gedruckter Wärmeübertrager

- A/V-Verhältnis maßgeblich von Zellengröße und Wandstärke abhängig
- durch Mikro-SLM kann Effizienz der Wärmeübertrager gesteigert werden

Stand der Forschung

Stand der Forschung



Stand 2019:

- mittels Lasermikrosintern erzeugter Mikrokanal-Wärmetauscher

Probleme:

- aufwändige Pulverentfernung insbesondere bei langen und dünnen Kanälen
- Drucktests zeigten Leckagen innerhalb der dünnen Wände

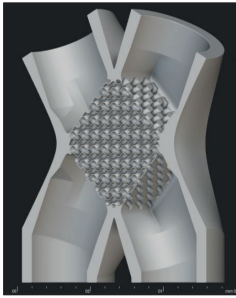
Stand 2023:

- neue Anlagentechnik und neues Strukturkonzept, aber weiterhin Mikrokanäle

Probleme:

- SLM-kritisches Design führte zu Problemen im Bauprozess
- Leckagen bereits bei kleinen Drücken
- keine Ermittlung der Wärmeübertragungsleistung

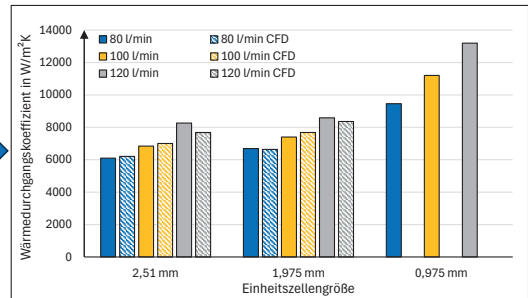
Stand der Forschung



Design / Konstruktion



Fertigung



Ergebnisse:

- sehr hohe Wärmedurchgangskoeffizienten von über 12 kW/m²K im Vergleich zu konventionellen Wärmeübertragern
- kleinere Einheitszellen ermöglichen deutliche Steigerung des Wärmedurchgangskoeffizientens
- CFD-Simulationen stützen die Messergebnisse

! bisher kein ausreichend dichter Prototyp !

9 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
 Florian Heinrich, M.Sc.
 (C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Laserinstitut
 Hochschule Mittweida

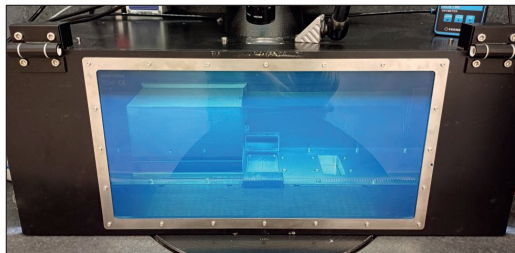
HOCHSCHULE
 MITTWEIDA

Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen

Laserinstitut
 Hochschule Mittweida

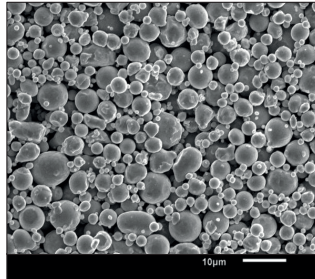
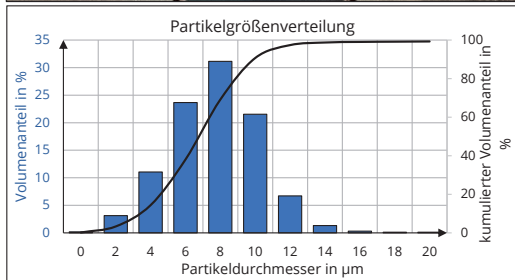
HOCHSCHULE
 MITTWEIDA

Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen



Anlagenspezifikationen:

- 400 W IPG Photonics Faserlaser mit einem Fokusbereich von 23 μm
- abgeschlossene Baukammer für SLM-Prozess unter Inertgasatmosphäre (Argon, Sauerstoffgehalt < 1000 ppm)
- selbst entwickelter Beschichter zur Erzeugung dünner Pulverschichten (Schichtdicke $\leq 10 \mu\text{m}$)



Material:

- sphärisches IN718-Pulver der Firma Metalpine
- $d_{90} = 11,9 \mu\text{m}$

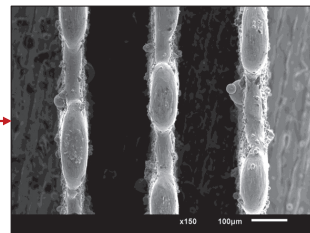
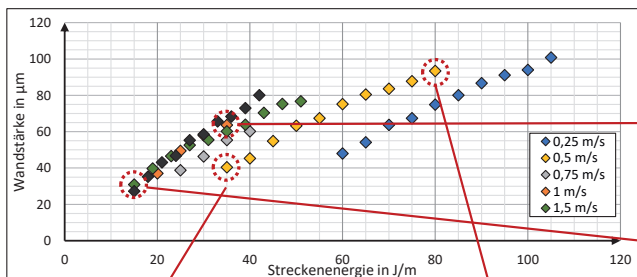
11 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.

(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

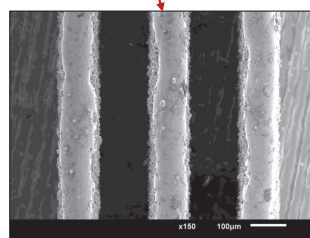
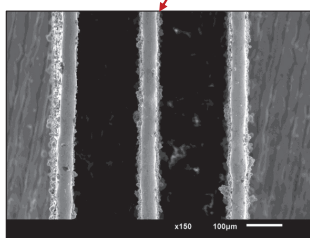


Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen

Parameteruntersuchung zur Ermittlung der Einzelwandstärken in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit und Leistung



inhomogene Schmelzspuren bzw. instabile Wände



homogene Schmelzspuren mit konstanter Wandstärke über einen weiten Bereich von 40 – 90 μm mit 0,5 m/s Scangeschwindigkeit

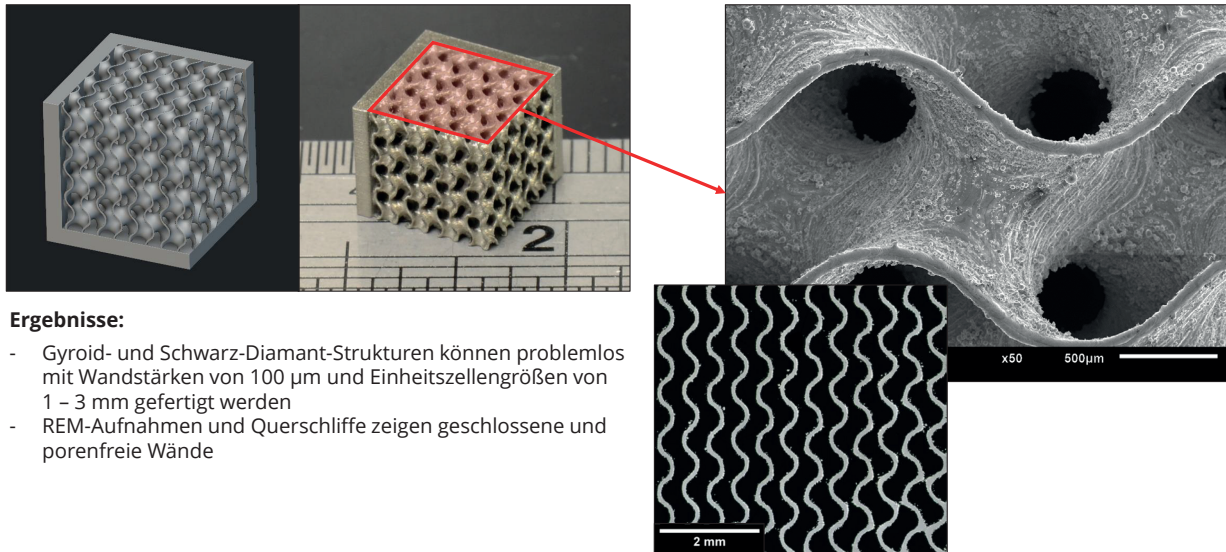
→ Parameter für weitere Untersuchungen

12 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.

(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen



Ergebnisse:

- Gyroid- und Schwarz-Diamant-Strukturen können problemlos mit Wandstärken von 100 µm und Einheitszellengrößen von 1 – 3 mm gefertigt werden
- REM-Aufnahmen und Querschliffe zeigen geschlossene und porenfreie Wände

13 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
 Florian Heinrich, M.Sc.
 (C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

 Laserinstitut
 Hochschule Mittweida

 HOCHSCHULE
 MITTWEIDA

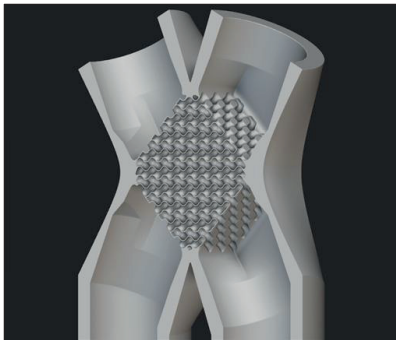
Wärmetauscher-Design und Tests

 Laserinstitut
 Hochschule Mittweida

 HOCHSCHULE
 MITTWEIDA

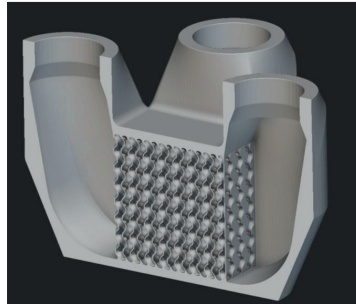
Wärmetauscher-Design und Tests

Anpassung des Designs



Bisheriges Design:

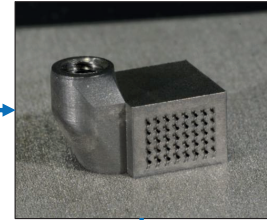
- 45°-Überhänge stellenweise kritisch für den Bauprozess
- Gewinkelte Anschlüsse erschweren Nachbearbeitung (z. B. Gewinde)
- Skalierbarkeit nur mit großem Gehäuseaufwand möglich
- bisher kein leakagefreier Prototyp vorhanden



Neues Design:

- Vermeidung kritischer Überhangwinkel
- Leichtere Nachbearbeitung durch gerade Anschlüsse
- Einfache Skalierbarkeit

Leckagetests



Ermitteln dichter TPMS-Parameter



Kleinformat-Wärmetauscher

Erstes Design

Anpassung des Designs

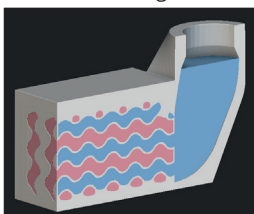
- 15 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Wärmetauscher-Design und Tests

Fertigung leakagefreier TPMS-Strukturen

Vorgehensweise:

- Probekörper mit TPMS-Struktur, wobei eine Fluidseite lediglich durch den Zulauf zugänglich ist (blaues Volumen)
- Anlegen von Druckluft (bis zu 5 bar) und Untertauchen der Probekörper
- → bei leakagefreier Struktur bilden sich keine Luftbläschen



keine Luftbläschen → dicht



Luftbläschen → undicht

- iterativer Prozess mit Anpassung der Konstruktion auf Grundlage der Druckbarkeit sowie der Ergebnisse der Leckagetests



Ergebnisse

Iteration Nr.	Teil Nr.	Leckage
1	1.1	ja
	1.2	nein
	1.3	ja
	1.4	ja
	1.5	nein
2	2.1	ja
	2.2	nein
	2.3	nein
	2.4	ja
	2.5	nein
3	3.1	nein
	3.2	ja
	3.3	nein
	3.4	nein
	3.5	nein
4	4.1	nein
	4.2	nein
	4.3	nein
	4.4	nein
	4.5	nein

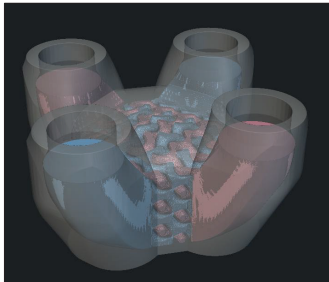
- 16 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Wärmetauscher-Design und Tests

Transfer auf Kleinformat-Wärmetauscher

Vorgehensweise:

- Konstruktion von „Kleinformat“-Wärmeübertragern auf Grundlage der in den Leckagetests ermittelten Iterationen
- Anbringen von Anschlüssen an allen vier Seiten der TPMS-Struktur



- kleinere Version des geplanten vollständigen Strukturkonzepts
- schnellere Fertigung, wodurch mehr Probekörper und aussagekräftigere Ergebnisse erzeugt werden können

Leckagetests analog zu vorheriger Folie

Iteration analog zu vorherigen Leckagetests → Iteration Nr. 2 entspricht Konstruktion des Gitters wie in Iteration Nr. 2 der vorherigen Leckagetests

Iteration Nr.	Teil Nr.	Leckage
2	2.1	ja
	2.2	nein
	2.3	ja
3	3.1	nein
	3.2	nein
	3.3	nein
4	4.1	nein
	4.2	nein
	4.3	nein

Ergebnisse der vorherigen Leckagetests können bestätigt werden

Schlussfolgerungen:

- Konstruktion der TPMS-Struktur in Verbindung mit dem äußeren Körper entscheidend für mögliche Leckagen
- durch entsprechende Optimierung können dichte TPMS-Wärmeübertrager relativ zuverlässig gefertigt werden

17 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

Laserinstitut
Hochschule Mittweida

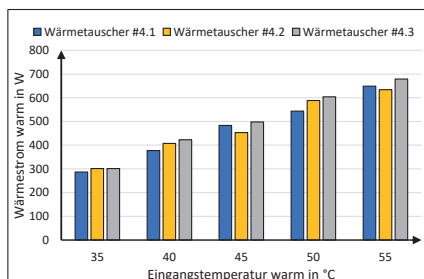
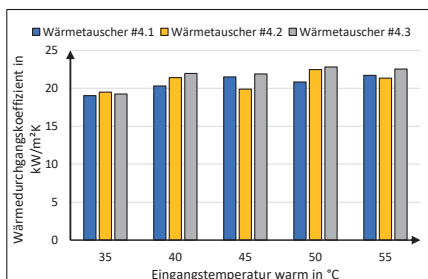
HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Wärmetauscher-Design und Test

Vermessung der Kleinformat-Wärmetauscher

Vorgehensweise:

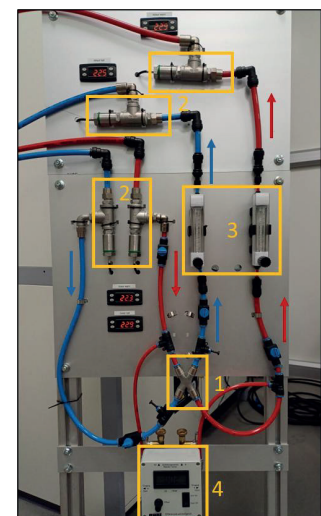
- Vermessung der Wärmeübertragungsleistung an provisorischem Messstand
- Wasser als Medium in Kalt- und Warmseite
- Änderung der Eingangstemperatur warm bei konstanter Eingangstemperatur kalt (15°C) und konstantem Durchfluss von 130 l/h



Ergebnisse:

- hohe Wärmedurchgangskoeffizienten im Bereich von 20 kW/m²K bei allen getesteten Eingangstemperaturen
- vergleichbare Werte bei allen drei baugleichen Wärmetauschern
- Steigerung im Vergleich zu Edelstahl-Wärmetauschern auch aufgrund der reduzierten Wandfläche

18 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Laserinstitut
Hochschule Mittweida

HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

- ✓ Prozessparameter & Grenzen des Mikro-SLM für Inconel 718 identifiziert
- ✓ Leckagefreie TPMS-Strukturen mit 100 µm Wandstärke und 1 mm³ Zellen realisierbar
- ✓ Design optimiert für bessere Druckbarkeit und hohe Wärmeleistung erfolgreich nachgewiesen

Ausblick:

- ☐ Vollformat-Prototyp fertigen und umfassend vermessen
- ☐ Weitere Steigerung der Wärmeübertragungsleistung:
 - ☐ Senkung der Wandstärke und Einheitszellengröße
 - ☐ Implementierung weiterer TPMS-Strukturen

Bildquellen

- [1] <https://www.3dsystems.com/aerospace-defense/heat-exchangers>, verfügbar am 30.09.2025, 14:10 Uhr
- [2] <https://www.ntop.com/resources/blog/heat-exchanger-design-with-additive-manufacturing/>, verfügbar am 30.09.2025, 14:10 Uhr
- [3] <https://www.3dprinting.lighting/3d-printed-heat-sinks-display-higher-efficiency/>, verfügbar am 30.09.2025, 14:11 Uhr

21 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718
Florian Heinrich, M.Sc.
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Florian Heinrich
Forschung & Entwicklung | Additive Fertigung

Laserinstitut Hochschule Mittweida
Technikumplatz 17 | 09648 Mittweida

T +49 (0) 3727 58-1914
heinric1@hs-mittweida.de
www.laser.hs-mittweida.de

Laserinstitut Hochschule Mittweida | Raum 42-214
Schillerstraße 10 | 09648 Mittweida



Kofinanziert von der
Europäischen Union



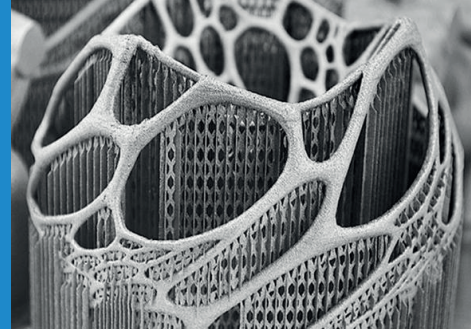
Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch
Steuermittel auf der Grundlage des vom
Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

www.laser.hs-mittweida.de

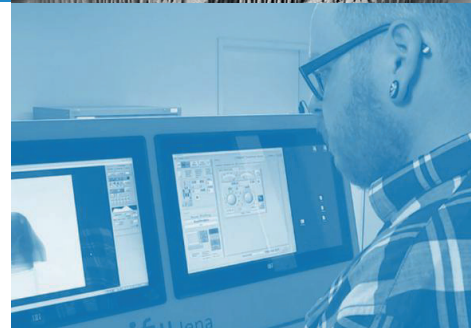


Forschungsprojekt AmorFeTa

Entwicklung additiv gefertigter
Treibstofftanks und Festkörpergelenken aus
amorphen Metallen für Luft- und Raumfahrt



Maximilian Streinz M.Sc.
15.10.2025

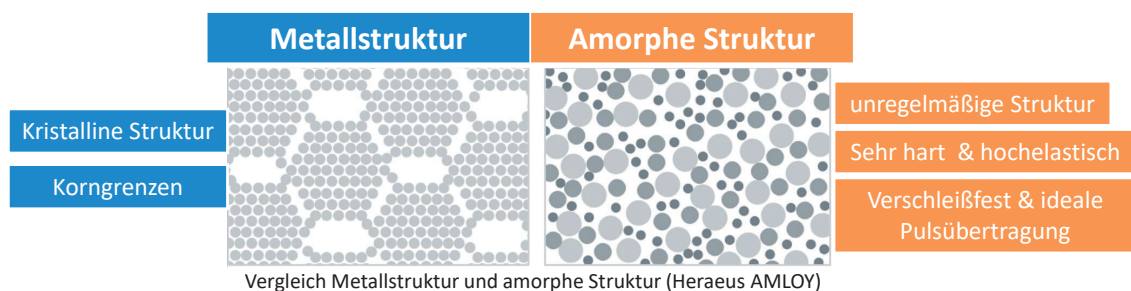


Inhalt

1. Grundlagen amorphe Metalle
2. Motivation
3. Zielsetzung
4. Vorgehen
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung
7. Ausblick

Grundlagen amorphe Metalle

- Amorphe Metalle sind metallische Legierungen/Reinmetalle welche zu amorpher/ungeordneter Erstarrung gebracht wurden.
- Dafür sind normalerweise sehr hohe Abkühlgeschwindigkeiten erforderlich (Millionen K/s für Reinmetalle)
- Spezielle Legierungszusammensetzungen reduzieren die benötigte Abkühlgeschwindigkeit
- Erstarren in ungeordneter Struktur
 - › Keine Gitterdefekte
 - › Keine signifikante Schrumpfung bei der Erstarrung



Grundlagen amorphe Metalle

Vorteile amorpher Metalle:

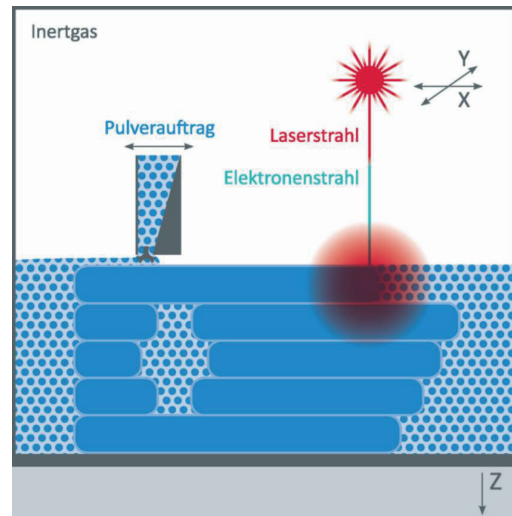
- Sehr hohe erreichbare mechanische Festigkeiten
- Ungewöhnliche Kombination aus hoher mechanischer Festigkeit und niedrigem E-Modul erreichbar
- Hohe Härte und geringer Abrieb
- Hohe erreichbare Oberflächenqualitäten
- Gute Biokompatibilität
- Hohe magnetische Permeabilität



Entnahme eines Zahnrads (Masse 2 kg), hergestellt im PBF-LB/M-Verfahren aus amorphem Metall (Heraeus AMLOY)

Grundlagen amorphe Metalle

- Amorphe Metalle sind durch die hohen Abkühlgeschwindigkeiten im PBF-LB-Verfahren prinzipiell sehr gut zu komplexen Geometrien verarbeitbar
- Die potentiell herausragenden mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe können jedoch bisher durch Auftreten von Restkristalliten bzw. Sauerstoffverunreinigungen noch nicht voll ausgenutzt werden
- Sauerstoff kann bereits bei der Pulverherstellung, aber auch bei der Pulverlagerung und im PBF-LB-Prozess eingebracht werden
- Des Weiteren sind Prozessparameter für dünne Wandstärken und Downskin-Flächen Ansatzpunkte für weitere Verbesserungen



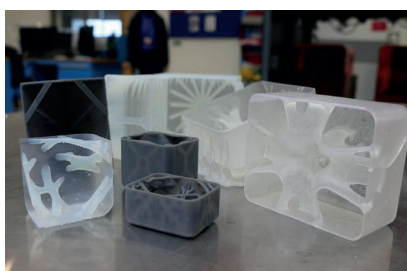
Prinzipskizze PBF-LB/M (dinmedia)

Motivation: Anwendungen Raumfahrt

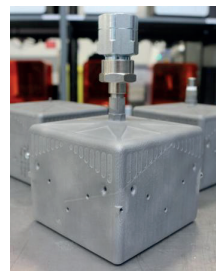
Stand der Technik:

- CubeSats sind kleine Satelliten die aus Zellen der Größe 10 cm x 10 cm x 10 cm aufgebaut sind
- Für einen Drucktank für den Einsatz in einem CubeSat sind niedrige Masse, aber auch optimale Raumausnutzung entscheidend
- Kubische Tanks mit konstanter Wandstärke weisen eine hohe Masse auf
- Additiv gefertigte Tanks aus Ti64 mit variabler Wandstärke und komplexen Innenstrukturen erreichen deutlich niedrige Massen

→ **Motivation: Deutlich höhere Festigkeit amorpher Metalle**



Entwürfe Tank-Innengeometrien (AMRC Sheffield)



Tankabmessungen:
96 x 96 x 78 mm
Masse: 320 g

Prototyp Tank aus Ti64 (AMRC Sheffield)

Motivation: Anwendungen Luftfahrt

Wasserstoffbrennstoffzellen betriebene Drohnen weisen verschiedene Vorteile gegenüber konventionellen Drohnen auf:

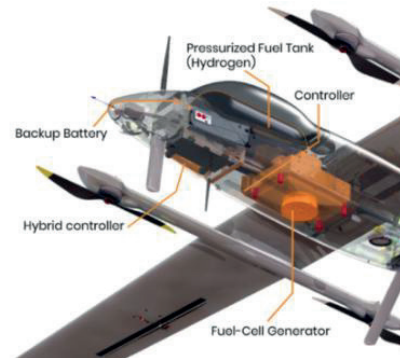
- Höhere Reichweiten im Vergleich zu akkubetriebenen Drohnen, Luftbetankung in Entwicklung [1]
- Leiser, kein CO₂-Ausstoss im Betrieb und reduzierte Wartungsintervalle im Vergleich zu mit konventionellem Motor betriebenen Drohnen

Die für diesen Zweck eingesetzten Tanks, weisen meist eine zylindrische Form auf um die Stirnfläche und damit auch den Luftwiderstand der Drohnen gering zu halten

→Potential für niedrigere Masse und höhere Wasserstoffspeicherkapazität durch amorphe Metalle



Doosan DS30W Multicopter (Doosan)



Aufbau Bluebird Aero-Systems WanderB-VTOL Drohne (Bluebird)

Motivation: Zusammenfassung

Mögliche Vorteile beim Einsatz amorpher Metalle:

Zylindrische Drucktanks	Kubische Drucktanks	Festkörpergelenke
Gewichtseinsparung durch variable Wandstärke und Funktionsintegration	Erhöhte gewichts- und volumenspezifische Festigkeit; niedrigere Masse und höhere Tankkapazität	Gewichtseinsparung im Vergleich zu Stählen
Hohes nutzbares Tankvolumen durch hohe volumenspezifische Festigkeit	Potentiell bessere Eignung für dünne Wandstrukturen	Nahezu keine mechanische Dämpfung, linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Auslenkung
Potentiell Kosteneinsparung durch vereinfachte Fertigung	Zusätzliche Materialoption für Raumfahrtanwendungen (Weltraumschrott)	Neuartige Kombination aus hoher Festigkeit und niedrigem E-Modul



CFK-Drucktank für eine wasserstoffbetriebene Drohne (Doosan)



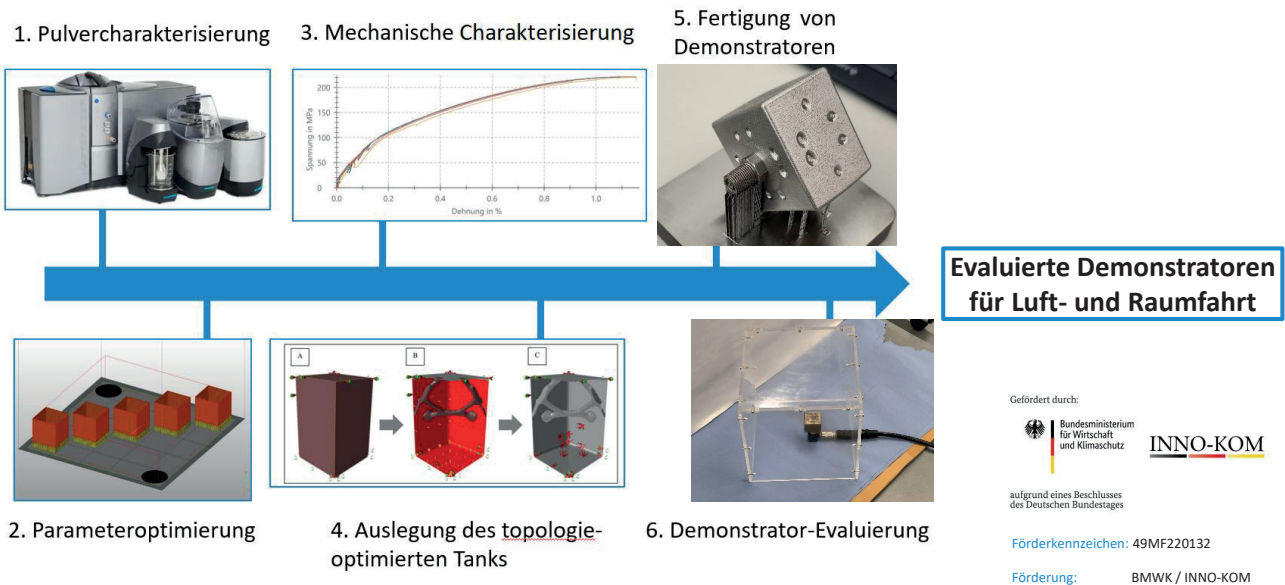
CubeSat-Tanks aus Ti64 (AMRC Sheffield)



Festkörpergelenk aus 17-4 PH, gefertigt im PBF-LB-Verfahren

Zielsetzung

„Entwicklung von für Anwendungen in Luft- und Raumfahrt geeigneter Drucktanks und Festkörpergelenken, welche durch den Einsatz der vorteilhaften Eigenschaften amorpher Metalle in Verbindung mit Topologieoptimierungstools, deutliche Vorteile hinsichtlich einer geringen Masse und gleichzeitig gesteigerter Funktionalität mit sich bringen.“

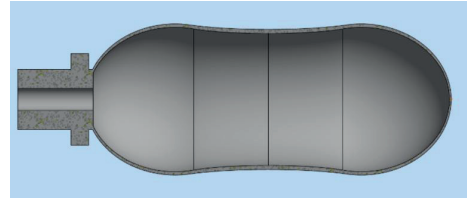


Vorgehen

- Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Prozesskette vom Zustand des Ausgangspulvers bis hin zu den Endeigenschaften verarbeiteter/nachbearbeiteter Proben bzw. Demonstratoren betrachtet
- Sowohl für massive Strukturen, als auch für dünnwandige Strukturen erfolgten Parameterstudien um jeweils optimale Verarbeitungsparameter zu ermitteln
- Die hergestellten Proben bzw. Demonstratoren wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften umfangreich charakterisiert
- Der Bau der Demonstrator-Tanks erfolgte um Gewicht einzusparen so weit wie möglich ohne innere, nicht entfernbare Supportstrukturen

Ergebnisse: Zylindrische Drucktanks

- Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der verfahrens-spezifischen Grenzen des PBF-LB/M-Verfahrens
- Gewichtsersparnis durch erdnussähnliche Geometrie [2] und variable Wandstärken (0,4 - 0,7 mm)
→ **über 10 % Gewichtsersparnis**
- Überprüfung der Druckbelastbarkeit durch Berstdruckversuche
→ **Erreichter Berstdruck: 316 bar**



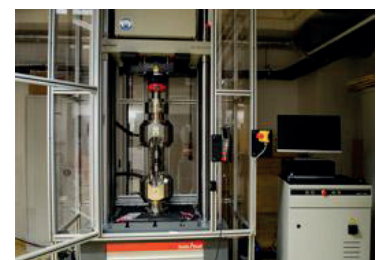
Schnittansicht eines ersten Entwurfs mit variabler Wandstärke



Berstdruckversuch mit maximalem Druck von 316 bar, Video auf LinkedIn (Link am Ende der Präsentation)

Ergebnisse: Parameterstudien

- Im Rahmen der Parameterstudien wurden verschiedene neuartige Scanstrategien erprobt
- Des Weiteren kam ein spezielles Gerät zur Reduktion der Feuchtigkeit im Schutzgas im PBF-LB/M-Prozess zum Einsatz
- **Ergebnisse:**
Biegefestigkeit von 1,8 GPa erreicht
Zugfestigkeit von 1,6 GPa erreicht
- Dabei war keine hinsichtlich Eigenschaften wie Beschichtungssystem oder Lasersystem besondere PBF-LB-Maschine erforderlich



ZwickRoell Zugprüfanlage

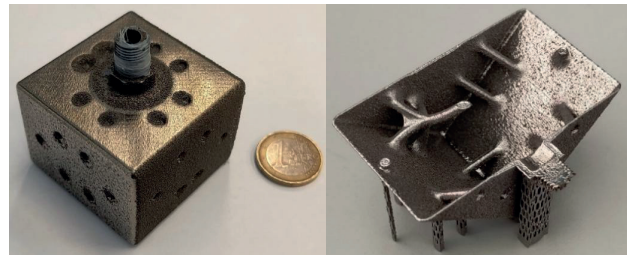
Es waren weder der Einsatz von Neupulver, noch mechanische Nachbearbeitung zur Erreichung hoher Festigkeiten erforderlich

Ergebnisse: Kubische Drucktanks

- Die Geometrie der Drucktanks wurde in Zusammenarbeit mit dem AMRC Sheffield entwickelt
- Innere Stützstrukturen erhöhen die Festigkeit der quaderförmigen Tanks und erlauben deutlich dünnere Wandstärken
- In ersten Bauversuchen wurde eine für Ti64 entwickelte Geometrie verwendet
- Später wurde eine speziell für Zr-basiertes amorphes Metall optimierte Geometrie eingesetzt



Erste Bauversuche eines stark verkleinerten Tankmodells



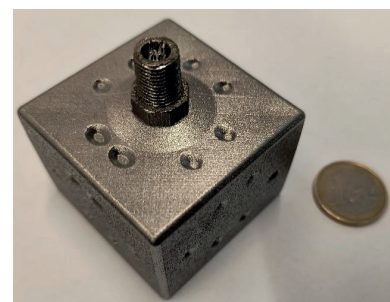
Bauversuche eines Tankmodells mit 5 cm Kantenlänge

Ergebnisse: Kubische Drucktanks

- Im Lauf des Projekts konnte eine erhebliche Verbesserung der Oberflächenqualität erzielt werden, insbesondere an den Downskin-Flächen (Sa-Werte unter $6\ \mu\text{m}$)
- Die Konturparameter für die sehr dünnwandigen Tanks mussten speziell entwickelt werden und unterschieden sich deutlich von den für massivere Abschnitte eingesetzten Konturparametern
- Eine hohe Oberflächenqualität war für die Leistungsfähigkeit der dünnwandigen Tanks (Wandstärken bis unter 0,5 mm) entscheidend



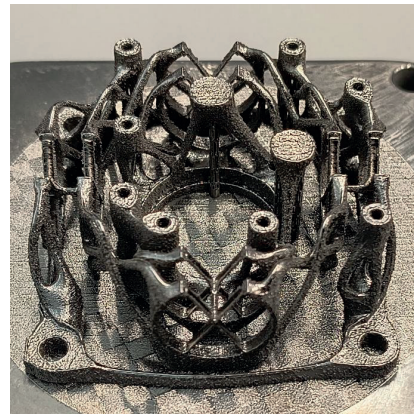
Parameterstudie an dickwandigen Segmenten im 45°-Winkel



Tank mit verbessertem Parametersatz

Ergebnisse: Festkörpergelenke

- Es wurde eine Festkörpergelenk-Geometrie untersucht, die nach dem Stand der Technik aus dem Stahl 17-4 PH im PBF-LB-Verfahren hergestellt wird
- Die komplexe Geometrie wurde nahezu ohne Supportstrukturen gebaut
- Es erfolgte eine Untersuchung der mechanischen Belastbarkeit des Festkörpergelenks durch einen Shaker-Test



Festkörpergelenk aus Zr-basiertem amorphen Metall auf Bauplattform im as build-Zustand

→ Das Festkörpergelenk hielt im Rahmen dieses Tests den von SpaceX definierten Belastungen eines Raketenstarts stand

Zusammenfassung

Erfolgreiche Herstellung hochbelastbarer Leichtbaustrukturen im PBF-LB-Verfahren mit einer optimierten Prozesskette:

1. 55 Gramm leichter Drohnentank-Demonstrator mit Berstdruck über 300 bar
2. Kubischer Tank mit ausreichender Druckfestigkeit bei Gewichtsersparnis über 10 %
3. Festkörpergelenk dass den Belastungen eines Raketenstarts standhalten kann

Weitere Ergebnisse:

- Es konnten insbesondere an den im PBF-LB-Verfahren oft rauen Downskin-Flächen sehr gute Oberflächenqualitäten im as-build-Zustand erzielt werden
- Eine relativ günstig erreichbare Reduktion des Feuchtigkeitsgehalts im Schutzgas im PBF-LB-Verfahren erlaubt eine deutlich verbesserte Verarbeitung der Zr-basierten amorphen Metalle durch die reduzierte Sauerstoffeinbringung
- **Die Herstellungskosten sind im Vergleich zu einer Herstellung aus Titanpulver nicht wesentlich erhöht, da trotz der hohen Pulverkosten die Maschinenlaufzeit die Gesamtkosten dominiert**

Ausblick

- Weitere, tiefergehende Untersuchung der Materialeigenschaften bei Einsatz der optimierten Verfahrensablaufkette
- Einsatz der Forschungsergebnisse für Anwendungen im Bereich Luft- und Raumfahrt, aber auch z.B. Medizin, Sport, Elektromotoren
- Entwicklungen spezieller Prozessparameter um noch weitergehend auf Supportstrukturen auch bei flachen Überhangwinkeln verzichten zu können
- Neue Generationen amorpher Metallpulver, z.B. basierend auf Titan, könnten niedrigere Kosten und noch weiter verbesserte mechanische Eigenschaften erreichen

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Bildquellen:

Heraeus AMLOY: <https://www.heraeus-amloy.com/de/>

Dinmedia: <https://www.dinmedia.de/resource/blob/1070046/30a5ad8c08a9d4842922ff4f05d4c5d0/062020-din-poster-additive-fertigung-data.pdf>

AMRC Sheffield: <https://www.amrc.co.uk/news/am-nanosatellite-fuel-tank-design-could-be-game-changer>

Doosan: <https://www.doosanmobility.com/en/>

Bluebird: <https://bluebird-uav.com/>

Quellen jeweils zuletzt abgerufen am 10.10.2025

Alle weiteren Bilder: ifw Jena

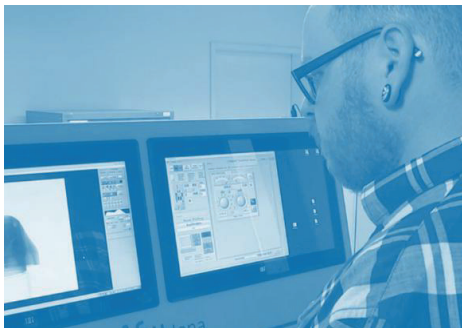
Literatur:

[1] Projekt Hydrobunny: <https://www.teccon.de/forschungsprojekte/projekt-hydro-bunny/>

[2] Kroll, Buchris: „Weight reduction of 3D-printed cylindrical and toroidal pressure vessels through shape modification“, Procedia Manufacturing, Volume 21, Seiten 133-140, Elsevier 2018,
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.103>

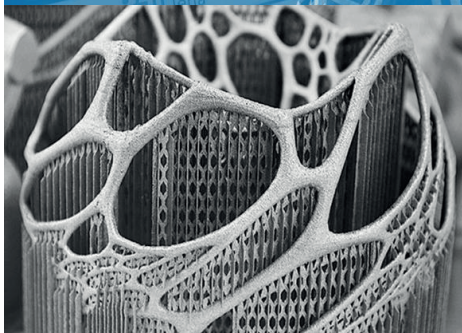
Link zu Video zu Berstdruckversuch auf LinkedIn:

https://www.linkedin.com/posts/ifw-jena_additivemanufacturing-bmg-leichtbau-activity-7322569166333374464-nPsE?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAACd0ULsBro-ON8Bfv4RUHgw0ffkYLOzyBbE



Günter-Köhler-Institut
für Fügetechnik und
Werkstoffprüfung

ifw Jena



Maximilian Streinz
Abteilung für Additive Fertigung
+49 3641 204-194
mstreinz@ifw-jena.de



Otto-Schott-Straße 13
07745 Jena

Tel: +49 3641 204-100 | Fax: -110
info@ifw-jena.de | www.ifw-jena.de



Laserinstitut
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE
MITTWEIDA
University of Applied Sciences

3D-Laserdruckverfahren zur Herstellung von porösen wasserabführenden Verlaufsstrukturen

Matthias Horn
Jörg Schille
Lucas Naumann
Udo Löschner



www.laser.hs-mittweida.de

Motivation – Lernen von der Natur

(Natur-)Gips als Formenwerkstoff

bei der Herstellung von
Keramikprodukten, z.B. Tondachziegel,
Industrieporzellan, Kacheln, ...

Vorteile

- Wasserabführen
- günstig in der Verarbeitung



keramikbedarf-zinser.de

Ökologische Auswirkungen

- begrenzte Ressourcen
- aufwendige Entsorgung

Technische Nachteile

- Stark abrasiv
- Kurze Standzeiten
- Saisonabhängig
- Sättigung nach
→ Qualitätsschwankungen

Projektziel

- **Imitieren des Gipses durch additiv gefertigte Strukturen**
 - Wasserabführend
 - Verschleißfest
 - Belastbar
 - Hohe Oberflächenanforderungen
- **Test unter realen Bedingungen**



Bauwerksabdichtung in der
Altbausanierung Chapter, 2012



domestika.org

3

Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

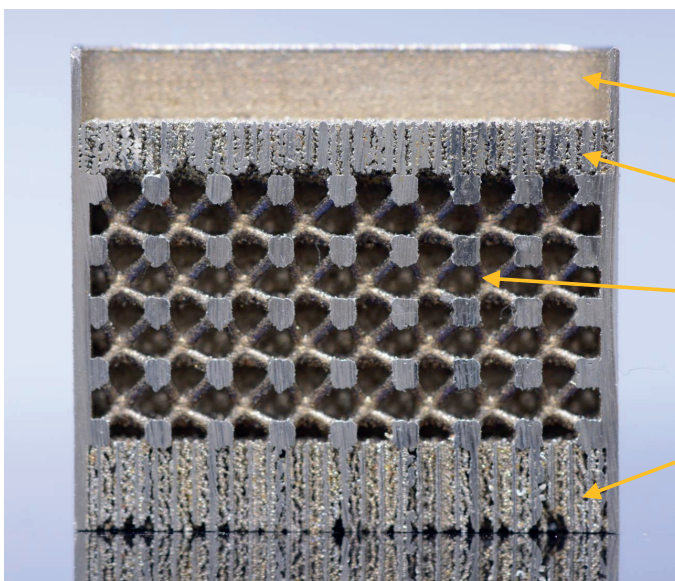


Laserinstitut
Hochschule Mittweida



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**

Querschliff poröser Aufbau 3D-Druck



Umrandung zur Aufnahme des
Schlicker- / Tonmaterials

Poröse Schicht

Hohlraum mit Gitterstruktur

Poröse Schicht / Abschluss / Boden

4

Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



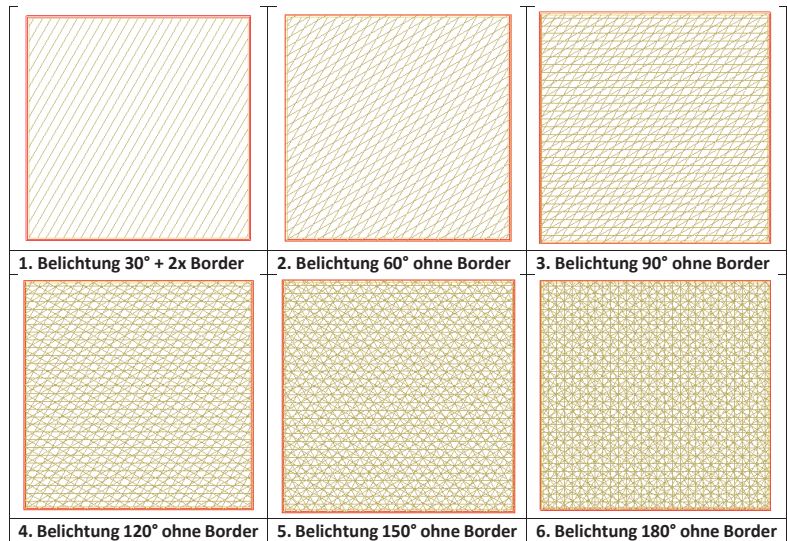
Laserinstitut
Hochschule Mittweida



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**

Angepasste Prozessparameter:

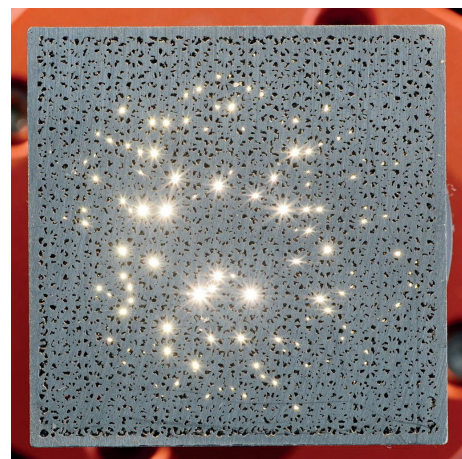
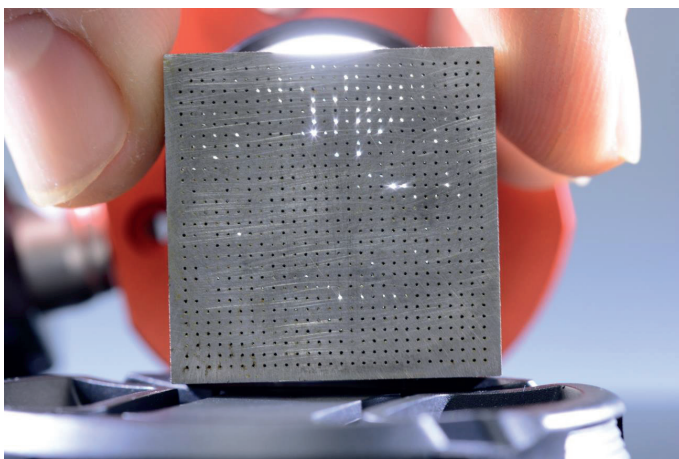
- Mehrfach Bestrahlung mittels Laser pro Schicht
- Variation des Fülllinienabstandes
- Drehung der Füllgeometrie
 - 30° - Drehung
 - 90° - Gitter
- Kreuzungspunkte überhöhen sich durch mehrfache Bestrahlung
- Negativer Einfluss auf Pulverauftrag



5 Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Lichtdurchgang



- poröse Strukturen mit Lichtdurchgang in 316L

6 Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



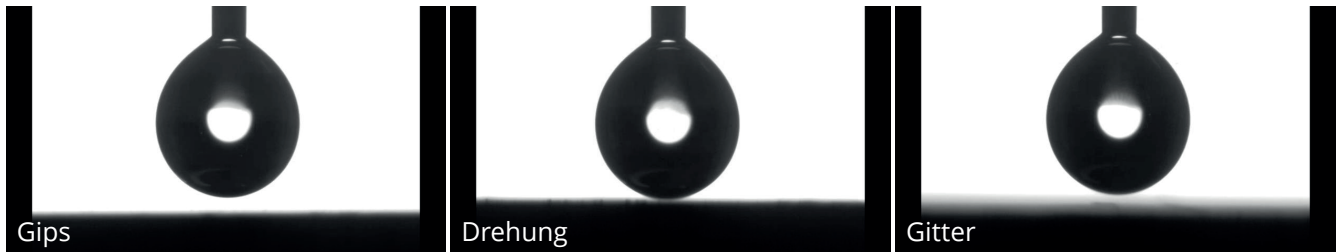
Wasserdurchgang

Ziel: Hydrophiles Verhalten und Kapillarwirkung

- Versickerungszeit abhängig von Struktur und Porengröße

Vorteil gegenüber Gipsmaterial:

- Steuerung der Wasserabführung über Porengröße
- Definierte Trockenzeiten



7

Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

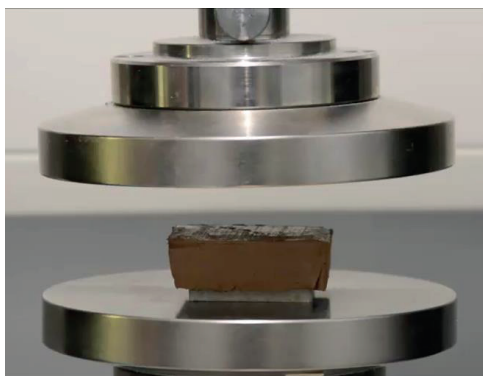


Laserinstitut
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Druckverfahren



8

Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

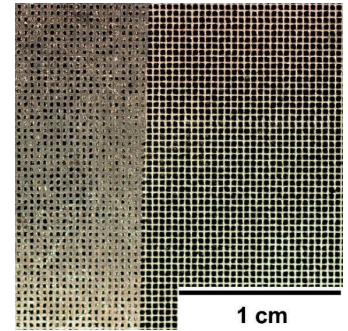
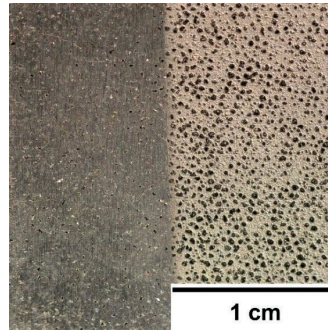
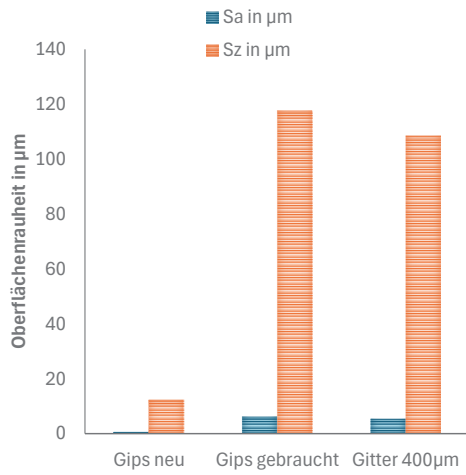


Laserinstitut
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Oberflächengüte



- Geschliffene (links) und Sandgestrahlte Oberfläche (rechts)

9

Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

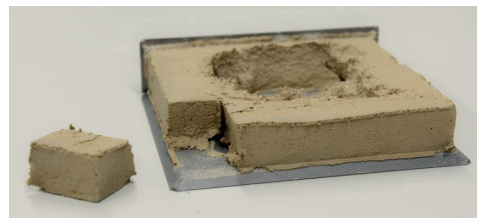
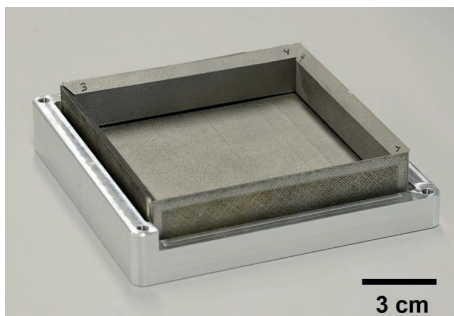


Laserinstitut
Hochschule Mittweida



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**

Gussverfahren



10

Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

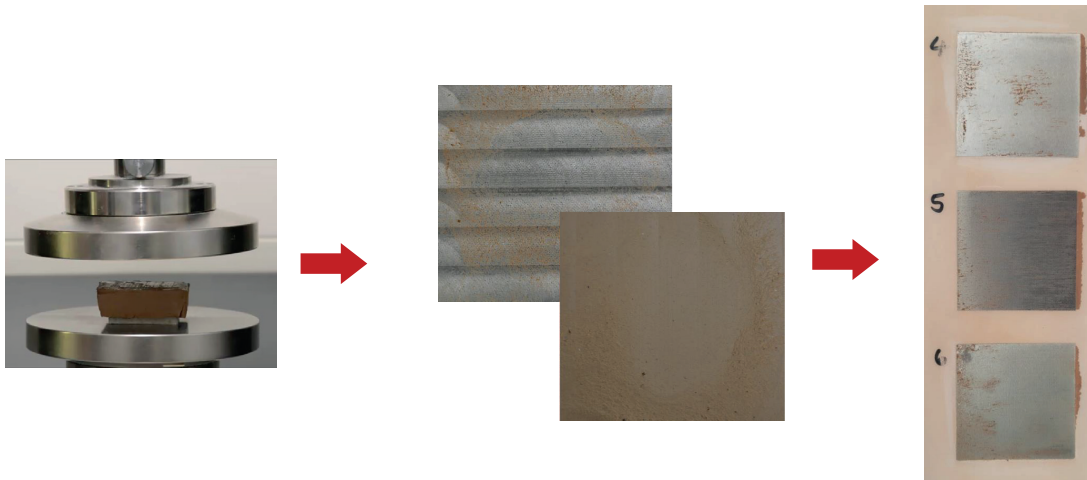


Laserinstitut
Hochschule Mittweida



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**

Druckverfahren



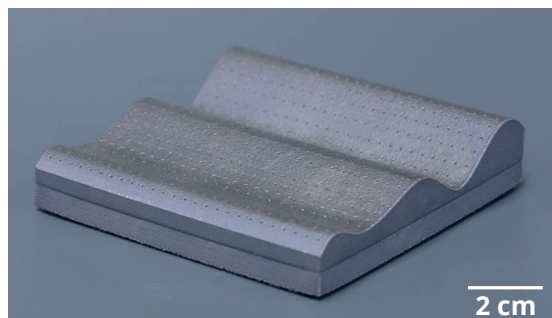
11 Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



3D-Druck als Formgebungswerkzeug:

Verschleißfest

Konturtreue



Wasserabführend

**Oberflächengüte
variierbar**

- Freiformfläche in AlSi10Mg mit 600 µm konstruiertem Lochraster

12 Matthias Horn, Lucas Naumann
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Vielen Dank



Matthias Horn

Tel.: +49 (0) 3727 58-1768
horn2@hs-mittweida.de

Lucas Naumann

Tel.: +49 (0) 3727 58 1056
naumann3@hs-mittweida.de

Laserinstitut Hochschule Mittweida

Technikumplatz 17 | 09648 Mittweida
www.laser.hs-mittweida.de

www.laser.hs-mittweida.de

Prozessüberwachung und Qualitätssicherung

Überwachung des 3D- Druckprozesses (FFF) mittels Ultraschall

Zawatzki, Johannes

15.10.2025

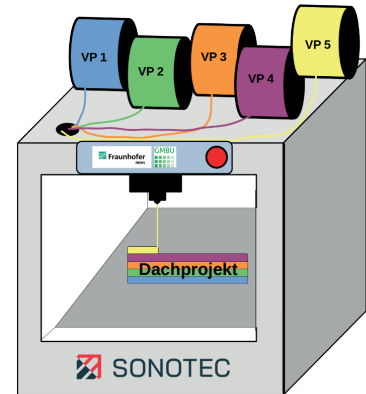
Bündnispartner – Partner im AddiQ-Konsortium

- 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



RUBIN AddiQ

- 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



15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

3

Verbundprojekt VP4 – „Material- und Prozessüberwachung im FFF- und FGF-Verfahren“

- Verbundprojektleitung
 - GMBU e.V. (Oliver Neudert)
- Verbundpartner

Gefördert durch:

- Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
- FKZ: 03RU3U034E
- Projektlaufzeit: 11/23 - 10/26

15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

4

Verbundprojekt VP4 – Zielstellung Verbundprojekt

- erhöhte **Prozessstabilität, Präzision** und **Reproduzierbarkeit**
- automatische Erfassung und Kategorisierung der wichtigsten **Material-** und **Prozessfehler**, fehlerspezifische Reaktion
- technische Voraussetzungen für umfassende **Qualitätssicherung** der Prozesskette

Rubin-AddiQ-VP4-TP5: „Entwicklung von akustischer Sensorik zur Material- und Prozessüberwachung im FFF-Prozess“

- Entwicklung **qualitätsgesicherter** Verfahren zur **wirtschaftlichen, parallelen Kleinserienfertigung** mittels filament- und granulat-basierter additiver Kunststoffextrusion.
(Use Case: Additive Kleinserienfertigung bei den Partner fertig+ GmbH)
- **akustische Messtechnik** für Materialprüfung, Prozessüberwachung und zerstörungsfreie Endprüfung
Fehler und Fehlerrate im Druckprozess frühzeitig zu erkennen
Ausschussrate in Wertschöpfungskette minimieren

15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

5

Fehlerbilder im Druckprozess

- Zusammenarbeit mit dem FBZ der Hochschule Merseburg
 - G-Codes mit definierten wiederholbaren Fehlerbildern
- 3D-Drucker: Prusa MK4
- Fehlerbilder:
 - Feuchtes Filament
 - Verstopfte Düse
 - Schichtablösung (Layercracking)
 - Druckbettablösung (Warping)
 - Fadenziehen (Stringing)



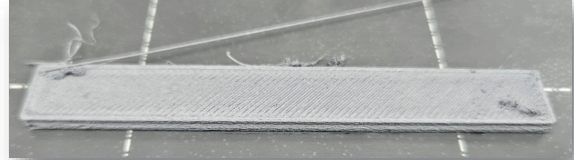
15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

6

Fehlerbild: Feuchtes Filament

- Hypothese:
 - Detektion von zählbarem „Knacken“ mittels Luftultraschall
- Position: Düse & Draufsicht
- Knacken entspricht der Impulsanregung über alle Frequenzbänder



Fehlerbild: Verstopfte Düse

- Hypothese:
 - Detektion von Stille in einzelnen Frequenzbändern
- Position: Düse & Draufsicht



Fehlerbild: Layercracking

- Hypothese:
 - Detektion über Luftultraschall von sich lösenden Schichten
- Position: Draufsicht



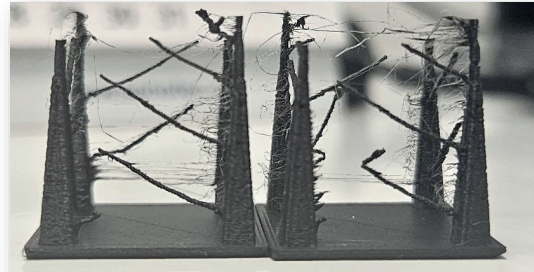
Fehlerbild: Warping

- Hypothese:
 - Körperultraschall und Luftschall Ablösen von Druckbett zeigen
- Position:
 - Draufsicht: Luftultraschall
 - Heizbett: Körperultraschall



Fehlerbild: Stringing

- Hypothese:
 - Geräuscentwicklung beim Fädenziehen im Luftultraschall
- Position: Düse

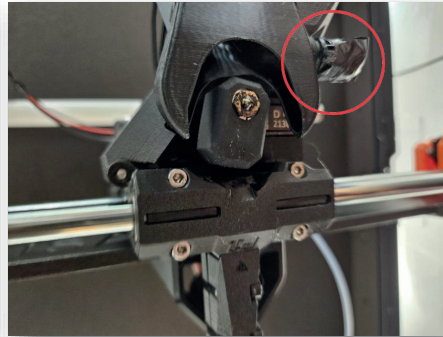
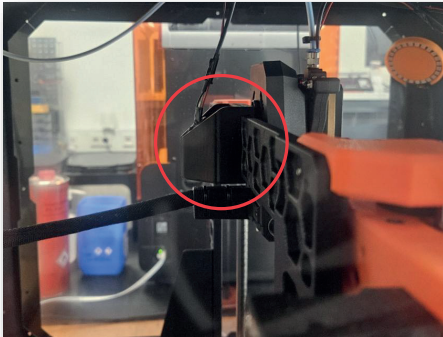


Ultraschallsensorik

- SONAPHONE
 - digitales Prüfgerät für Ultraschallmessungen
 - kombiniert Hardware (Sensortechnik) mit Software/Apps
- Trib.US
 - Software zur Datenerfassung
 - gleichzeitig zwei Analogsensoren
- Luftultraschall
 - Sensor BS-10 Modul
 - Position: Düse und Draufsicht
- Körperultraschall
 - Sensor AddiQ Modell
 - Position: Druckergestell



Ultraschallsensorik: Integration



15.10.2025

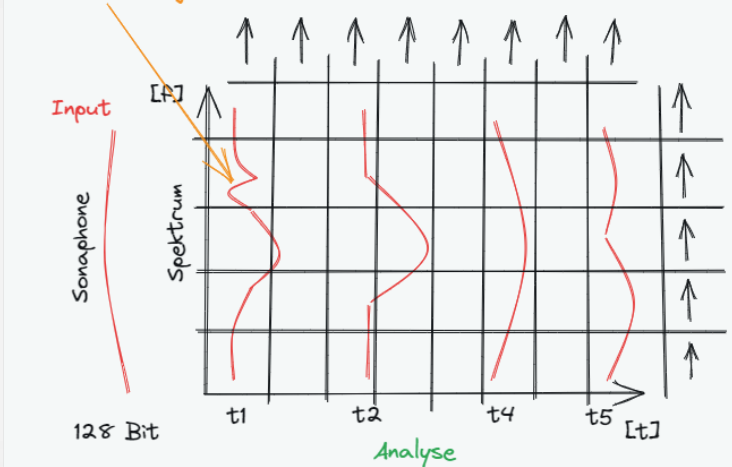
12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

13

Datenauswertung

- Generierung Spektrogramme
- Rasterauswertung
- Bewertungsverfahren
- Trenne von Frequenzbändern mit Nutz- & Störgeräuschen

Ziel: Bewertung in einzeltem Cluster



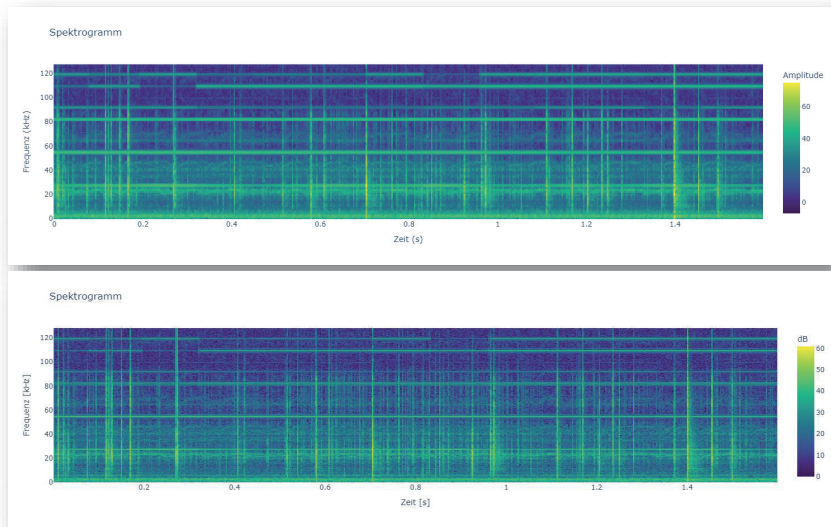
15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

14

FFT- und HS-Daten

- live berechnete FFT im SONAPHONE
 - Abtastrate: 16 ms
 - Dateigröße:
1 s ~ 250 KB
15 min ~ 110 MB
- Postprocessed FFT aus SONAPHONE Audio-Datei
 - Abtastrate: 3,9 ms
 - Dateigröße:
1 s ~ 1500 KB
15 min ~ 670 MB



15.10.2025

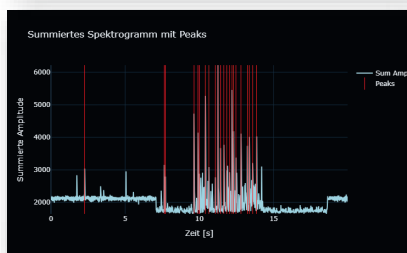
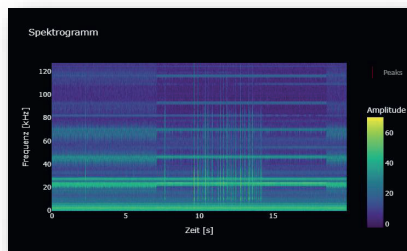
12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

15

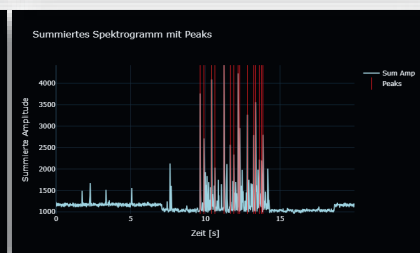
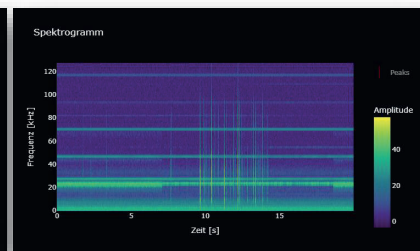
Vergleich Luftultraschall

- Messung:
 - Feuchtes Filament
 - ASA

Düse



Draufsicht



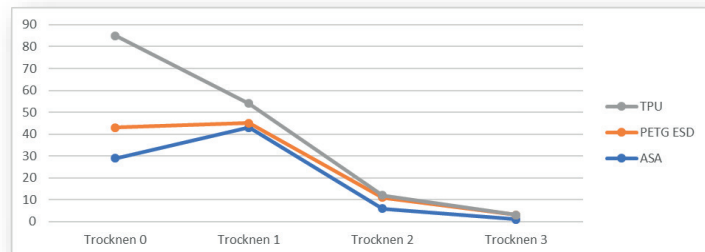
15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

16

Auswertung feuchtes Filament

- Filament mit Wasser gesättigt
- Trocknungs-Intervalle
 - Je 30 min
 - Ofen 60°C
- Häufigkeit von „Knack“-Geräuschen beim Laden des Filaments
- Nimmt ab mit Reduzierung der Filamentfeuchte ab



Ausblick

- Akustische Fehlererkennung in Spektrogramm möglich
- derzeit im Postprocessing
 - Übertragung in Live-Detektion
- Datenaufbereitung für ML-Algorithmen
- Weitere Messreihen verschiedener Fehlerbilder
- Differenzierung Anomalie und Nutzgeräusch

Ultraschall ist unsere Stärke

SONOTEC GmbH
Thüringer Str. 33
06112 Halle (Saale)

☎ +49 345 13317-0
✉ sonotec@sonotec.de
🌐 www.sonotec.de



15.10.2025

		Biotechnologie
<p>Intrinsische Markierung additiv gefertigter Bauteile zur Verifizierung und Identifizierung von Originalbauteilen</p>		additive Fertigung
<p>Stephan Eckstein¹, Andreas Krombholz¹, Oliver Neudert¹, Johannes Zawatzki² ¹ GMBU e.V. ² SONOTEC GmbH 15.10.2025 12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung</p>		Physik
		Molekularbiologie

Förderhinweis

Projekttitle 3DMarker für die Markierung von Kunststoffbauteilen

Förderkennzeichen
49MF210207

Laufzeit
1. Mai 2022 bis 31. Dezember 2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INNO-KOM

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung
15.10.2025

Oliver Neudert
2

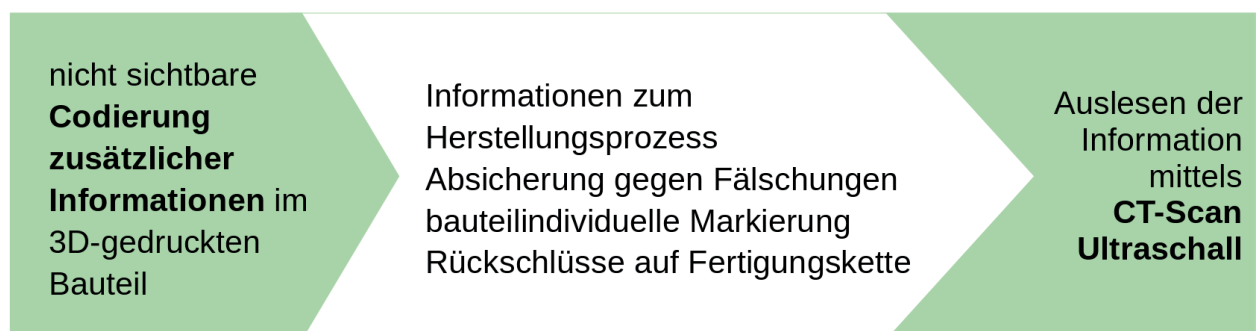
Produktpiraterie

„Fälschungen vernichten in Deutschland mehr als 64.100 Arbeitsplätze.“

„Kleine und mittlere Unternehmen, die Opfer von Produktpiraterie geworden sind, haben eine 34% geringere Chance, auch fünf Jahre danach noch zu bestehen.“

„Lukrativer als der Drogenhandel“

IHK München 2023



Übersicht

Fertigungsstrategien

- im Material (Komposit)
 - → Splicing
 - → mehrere Druckköpfe
- auf dem Filament
- auf dem Bauteil
- geometrisch (Hohlräume)

Ausleseverfahren

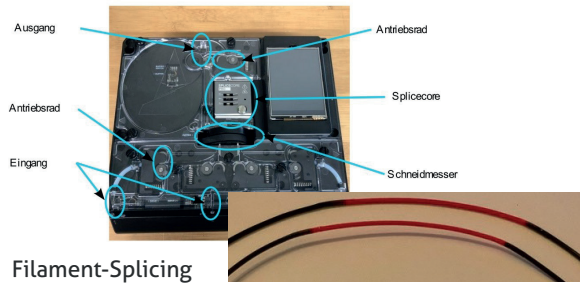
- Röntgen-CT
- Ultraschall (Puls/Echo)



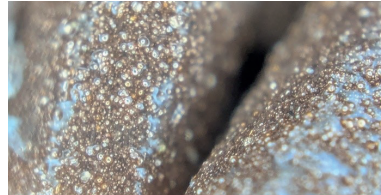
Röntgen-CT (1)



Puls-Echo-Verfahren



Filament-Splicing



Komposit mit 60% Kupfer



Markierung auf dem Filament



direkt markiertes Bauteil

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15.10.2025

(1) M. Simon et al., 25 Years Industrial Computer Tomography
in Europe, DGZfP-Proceedings BB 84-CD, Paper 10, pp. 99-108

Oliver Neudert

5

Markierung mit Filament-Splicing

Prinzip:

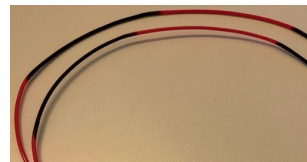
- Marker im Material (Komposit)
z.B. Cu oder TiO₂
- Codierung des Filaments (Splicing)

Limitationen:

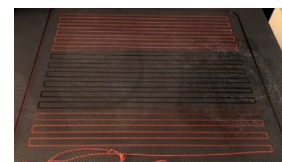
- Splicelänge 80mm
(einfaches Splicing)
- min. Markerlänge ≈ 3mm
(mehrfaches Splicing)
- Verteilung der Markierung durch
unterschiedliche Querschnitte
Filament = 2,405 mm² Druckspur = 0,1 mm²
- Verschmierung des Übergangs
- **max. Datendichte** ≈ 0,07 bit/cm
(entlang der Druckspur)



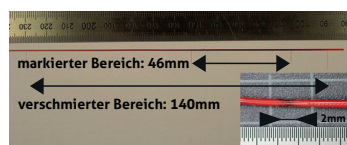
Prinzip des Splicings



gesplices Filament (Marker: 80mm)



Druckspur



gesplices Filament (Marker: ~2mm)

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

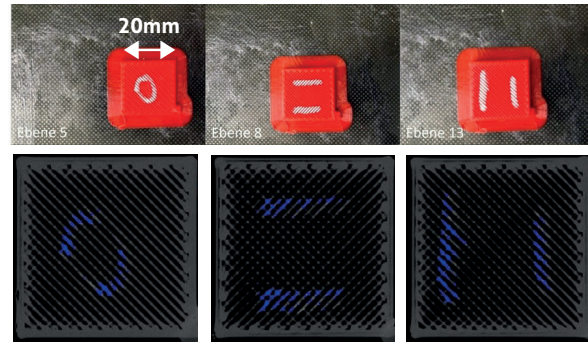
15.10.2025

Oliver Neudert

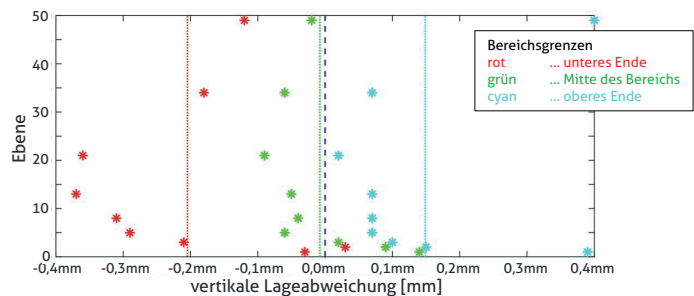
6

Direkt markierte Bauteile

- **Prinzip:**
 - Markierung im Druckprozess mit TiO_2 -Suspension auf PLA
- **Limitationen:**
 - Kapillarkräfte
 - Überdosierung
 - Ungenauigkeiten im Druck
 - vertikale Lageabweichung $< 0,4\text{mm}$
- **max. Datendichte** $\approx 25 \text{ bit/cm}$
(senkrecht zur Druckschicht)

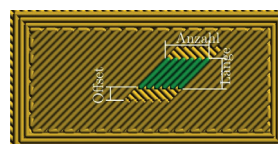


markierte Bauteilschichten (oben) und CT-Schnittbild (unten)



Markierung mit Materialwechsel

- **Prinzip:**
 1. Druck der Bauteilschicht mit Lücken für Markermaterial
 2. Einbringen des Markermaterials mit zweitem Druckkopf
- **Limitationen:**
 - Düsendgröße, Dosiergenauigkeit
 - min. Markergröße $\approx 1\text{mm}$
- **max. Datendichte** $\approx 10 \text{ bit/cm}$
(entlang der Druckspur)
- **max. Datendichte** $\approx 50 \text{ bit/cm}$
(senkrecht zur Druckschicht, Schichtdicke $0,2\text{mm}$)



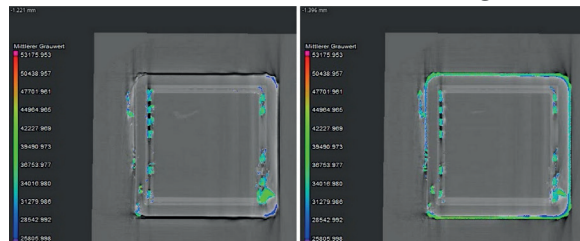
optimierte Parameter:
Offset_Start = 1mm
Offset_End = 0,2mm
min. Länge = 1mm

Optimierung des Druckverfahrens



markiertes Bauteil

minimale Markergröße

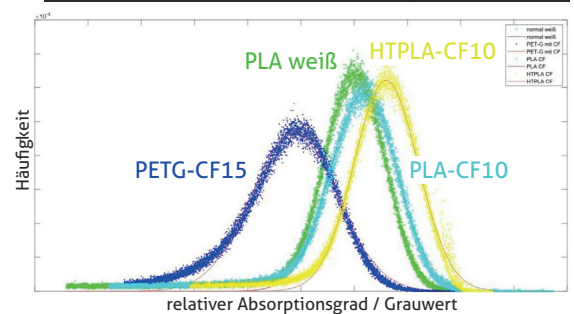
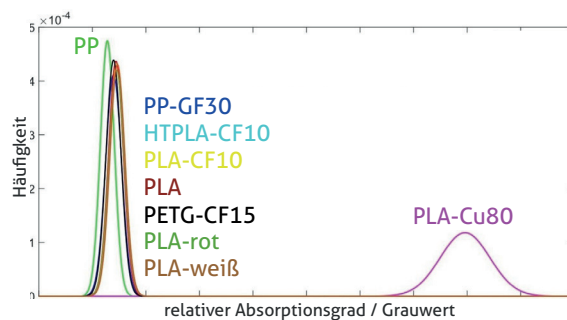
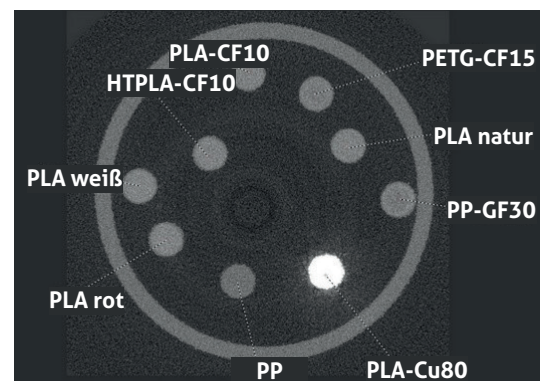


CT-Schnittbilder eines markierten Bauteils

Bauteil-Markierung für Röntgen-CT

Detektion von CT-Markern

- **CT-Kontrast:**
 - Ordnungszahl (anorganische Füllstoffe)
 - Dichte (Kristallinität)
- **Materialkontrast vs. PLA:**
 - $\text{PLA-Cu80} > \text{PP} > \text{PETG-CF15} > \text{HTPLA}$
 - $\text{Grauwert} \propto \text{Dichte}$ (annähernd)

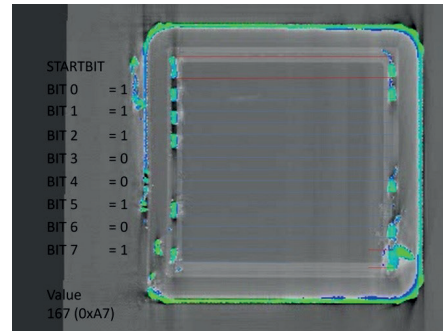


Testkörper mit CT-Markern

- **Prinzip:**
 - Markierung entlang der Druckspuren (bekannt durch gcode)
 - Beginn der Markierung: Startbit
- **Limitationen / Herausforderungen:**
 - Dosiergenauigkeit
 - Nachlaufen erzeugt Bereiche
- **Beispiel**
 - PLA / PLA-Cu80
 - Düse = 0,6 mm
 - Schicht = 0,2 mm
 - Wanddicke = 2 mm
 - Datendichte = ca. 3 bit/cm



Musterbauteil (30mm Kantenlänge), Markierung in der Wand



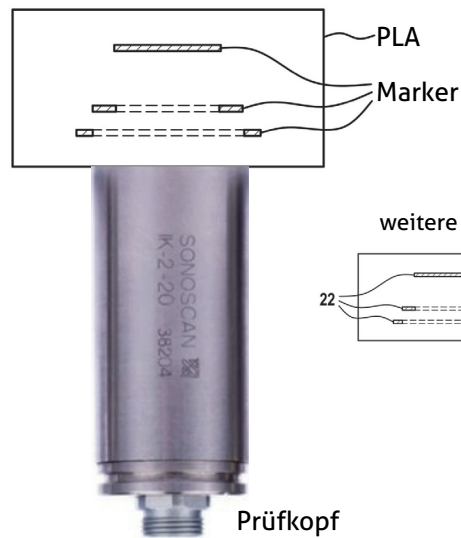
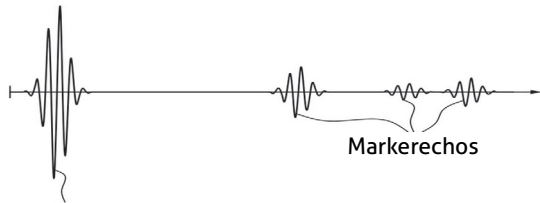
Detektion der Markierung und Interpretation als Bitmuster

BIT 7	= 1
BIT 6	= 1
BIT 5	= 0
BIT 4	= 0
BIT 3	= 0
BIT 2	= 1
BIT 1	= 0
BIT 0	= 1
STARTBIT	
Value	197 (0xC5)

Bauteil-Markierung für Ultraschall-Verfahren

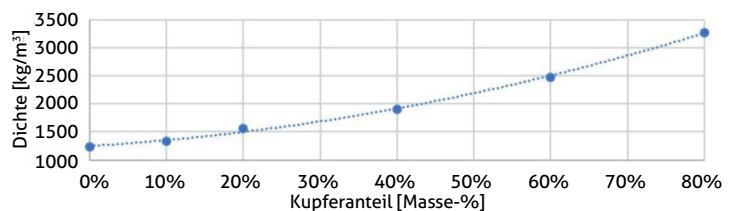
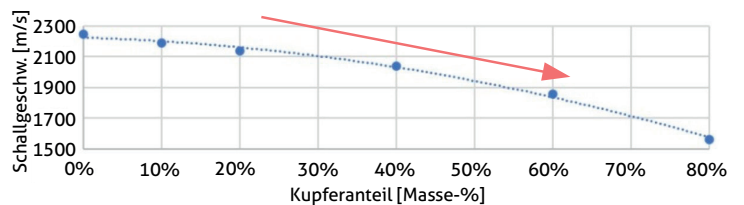
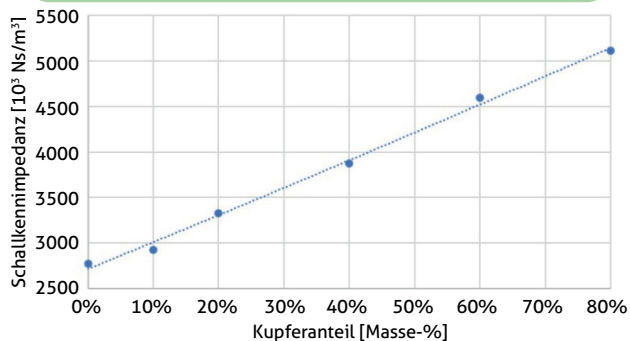
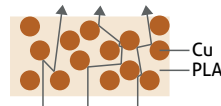
Detektion von Ultraschallmarkern

- **Prinzip:**
 - Puls-Echo-Verfahren, Einkopplung an glatter Bauteilunterseite
 - Markermaterial erzeugt Echos
 - Codierung über Laufzeit und/oder Amplitude
- **Limitationen:**
 - Markergröße ~ Prüfkopfgröße
 - Mehrfachechos
 - Störechos an Störstellen (Poren)



Markermaterial für Ultraschall

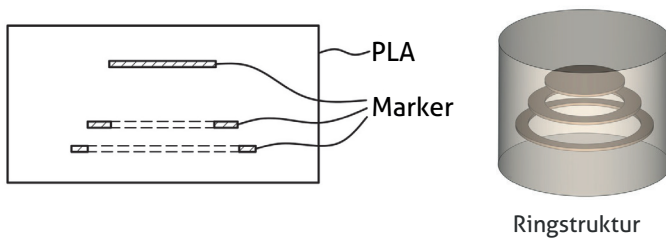
- **Ultraschall-Kontrast:**
Schallkennimpedanz =
Dichte × Schallgeschwindigkeit
- **Schallgeschwindigkeit nimmt ab!**
 - Reflexion an Partikeln verlängert Schallweg (Partikelgröße ≈ 0,04mm Wellenlänge ≈ (0,3...2)mm)



Testkörper mit Ultraschallmarkern

• Erprobung:

- Sensoren: 1...5 MHz, Ø (6...20) mm
- Markertyp: PLA-Cu, Hohlstruktur
- Markergeometrien: Ringe, Scheiben
- Auswertung:
Zeitsignal, Spektrogramm, Einhüllende
- Echoinformation: Zeitpunkt, Amplitude



getestete Ultraschall-Transducer



Puls-Echo-Messung an einfachem Testkörper

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

– Patent angemeldet –

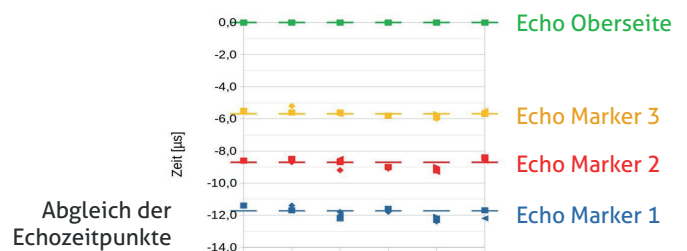
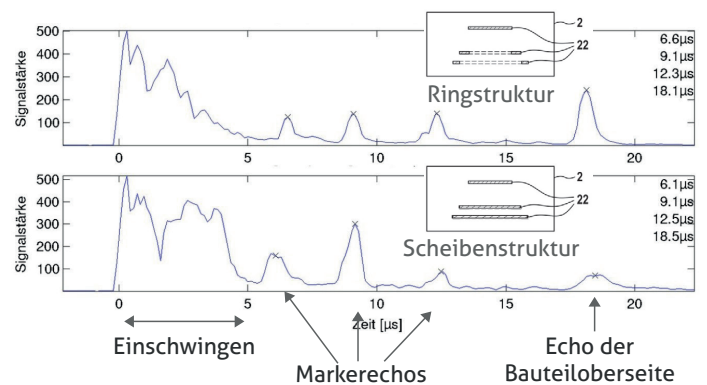
Oliver Neudert

15

Testkörper mit Ultraschallmarkern

• Gute Resultate mit...

- SONOSCAN IK-5-6 (5MHz, Ø 6mm)
- PLA mit 40% Markeranteil
- Ringe oder Scheiben, Dicke=0,4mm, Ø 20mm
- Auswertung des Echozeitpunkts aus der Einhüllenden
- Kalibrierung der Zeitachse an letztem Echo
- Schwankungsbreite der Zeitpunkte $\leq 0,5 \mu\text{s}$ (entspricht ca 1mm)
- **max. Datendichte** $\approx 1 \text{ bit/cm}$ (in Druckschichtebene)
- **max. Datendichte** $\approx 10 \text{ bit/cm}$ (senkrecht zur Druckschicht)



GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

– Patent angemeldet –

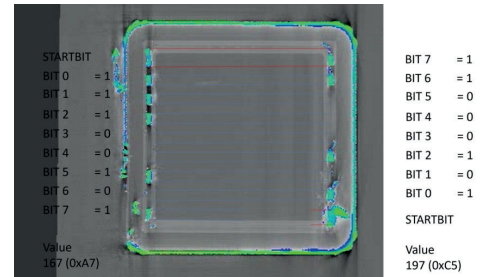
Oliver Neudert

16

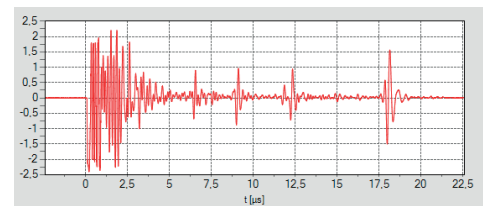
Zusammenfassung

- Granulat- und **Filamentmaterialien**, **Fertigungsstrategien**, optimierte **Druckverfahren**, **Ausleseverfahren** und fehlertolerante **Auswerteverfahren** für intrinsischer Bauteilmarkierungen in AF-Bauteilen
- Auslesen mittels bildgebender **Röntgen-CT** oder **akustischem Puls-Echo-Verfahren**
- bevorzugte Variante**
 - PLA-Cu mit (20...80) wt% Cu
 - 2 Druckköpfe (IDEX) oder Materialwechsel
 - Düsendurchmesser = 0,6 mm
 - (Alternative für CT: Direktmarkierung mit TiO_2 -Suspension)

realistische Datendichte [bit/cm]	Markierung für Röntgen-CT	Markierung für Ultraschall
in Druckschichtebene	3 ... 5	1
senkrecht zur Druckschicht	15 ... 25	5



CT-Bild eines markierten Bauteils



akustisches Markersignal

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

Biotechnologie

additive Fertigung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

Ralf Lach, Wolfgang Grellmann, Katrin Reincke

Polymer Service GmbH Merseburg, Geusaer Straße 81f, 06217 Merseburg

29.09.2025

PSM – Ihr Partner für Prüfung und Analyse von Kunststoffen und anwendungsorientierte Kunststoff-Forschung

1

Standort

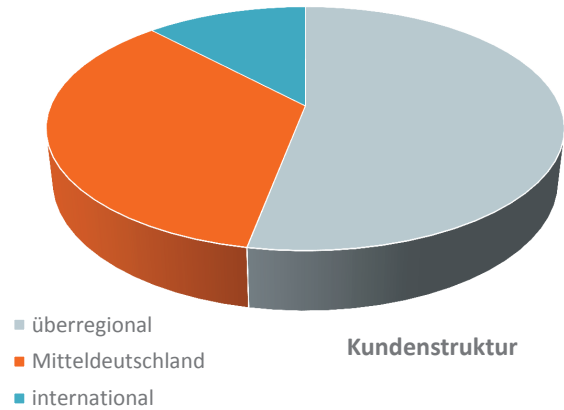


29.09.2025

PSM – Ihr Partner für Prüfung und Analyse von Kunststoffen und anwendungsorientierte Kunststoff-Forschung

2

- 2001** Gründung als An-Institut an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- 2014** Wechsel an die Hochschule Merseburg (An-Institut an der Hochschule Merseburg)
- 2014** Erweiterung des PSM-Sachverständigenbüros durch die öffentliche Bestellung und Vereidigung der Sachverständigen Prof. Ines Kotter & Prof. Katrin Reincke
- 2016** Rahmenvertrag mit der Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofilsysteme e. V. (regelt Prüf- und Inspektionstätigkeit im Bereich der Kunststoff-Fensterprofilsysteme)
- 2021** Umzug in ein eigenständiges und campusnahes Firmengebäude



29.09.2025

PSM – Ihr Partner für Prüfung und Analyse von Kunststoffen und anwendungsorientierte Kunststoff-Forschung

3

Allgemeine Infos AddiQ – Verbundprojekt 3

Verbundprojekt 3: Bauteilsicherheit von generativ gefertigten Produkten



Projektpartner



NEL GmbH, Leipzig



ModellTechnik Rapid Prototyping GmbH, Waltershausen



Hochschule Merseburg (**HoMe**)



TH Brandenburg (**THB**)



Polymer Service GmbH Merseburg (**PSM**)

Teilvorhaben: Entwicklung von Prüfverfahren für die Bauteilsicherheit und Qualitätssicherstellung additiv gefertigter Kunststoffbauteile

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

4

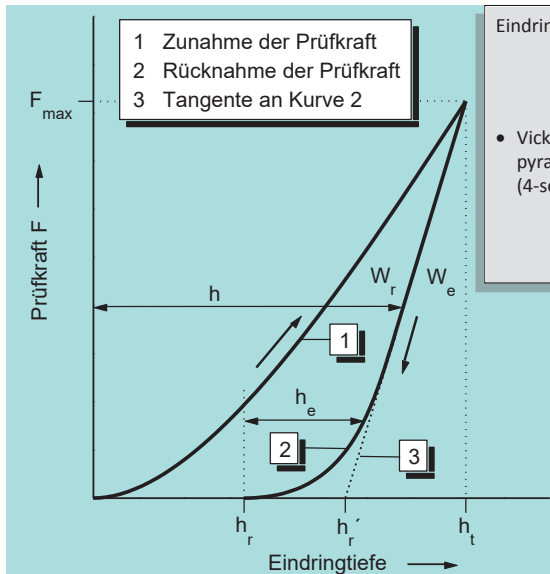
Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

- **(Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen**
 - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroeindringversuch
 - Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test
- **Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens**
 - Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
 - Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest
- **Zusammenfassung**

Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

- **(Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen**
 - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroeindringversuch
 - Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test
- **Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens**
 - Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
 - Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest
- **Zusammenfassung**

Registrierender Mikroeindringversuch an 3D-gedrucktem PLA

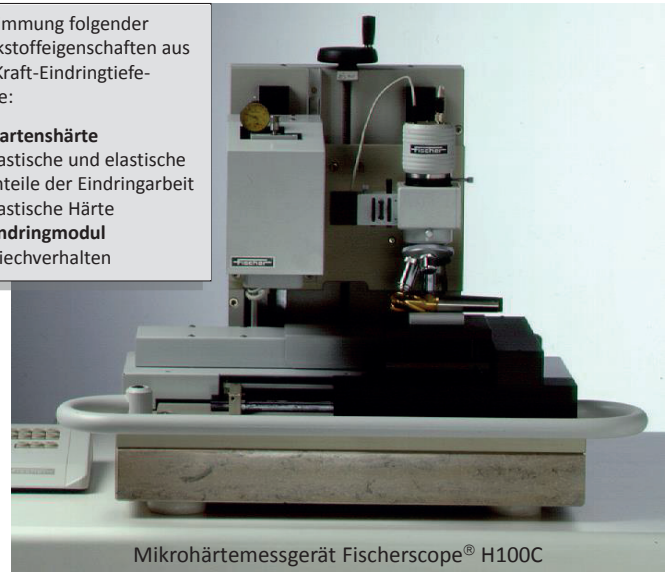


Eindringkörper:

- Vickersdiamantpyramide (4-seitig)

Bestimmung folgender Werkstoffeigenschaften aus der Kraft-Eindringtiefe-Kurve:

- **Martenshärte**
- plastische und elastische Anteile der Eindringarbeit
- **Plastische Härte**
- **Eindringmodul**
- Kriechverhalten



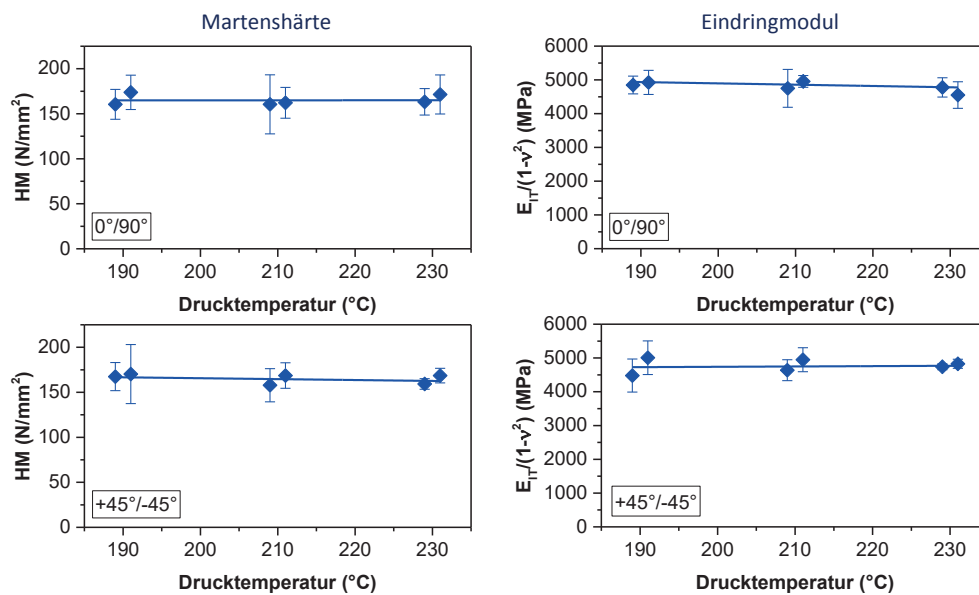
29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

7

Registrierender Mikroeindringversuch an 3D-gedrucktem PLA

Martenshärte und Eindringmodul als Funktion von Drucktemperatur und Baurichtung



29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

8

Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

- **(Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen**
 - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroeindringversuch
 - Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test
- **Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens**
 - Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
 - Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest
- **Zusammenfassung**

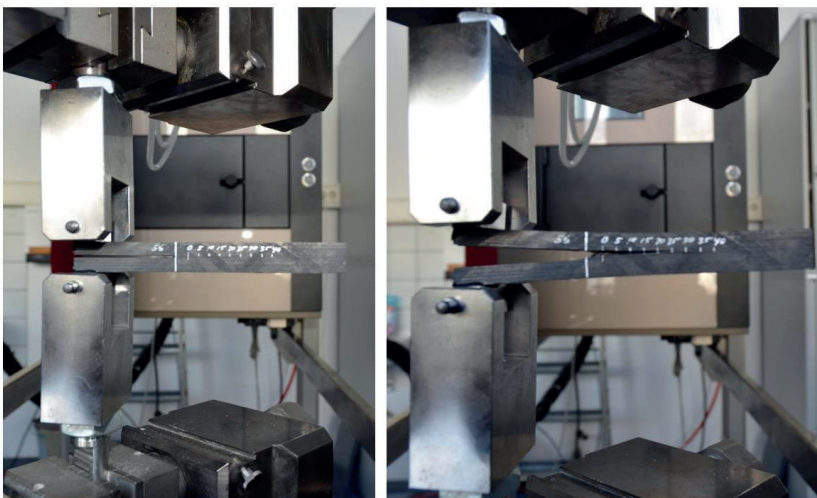
29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

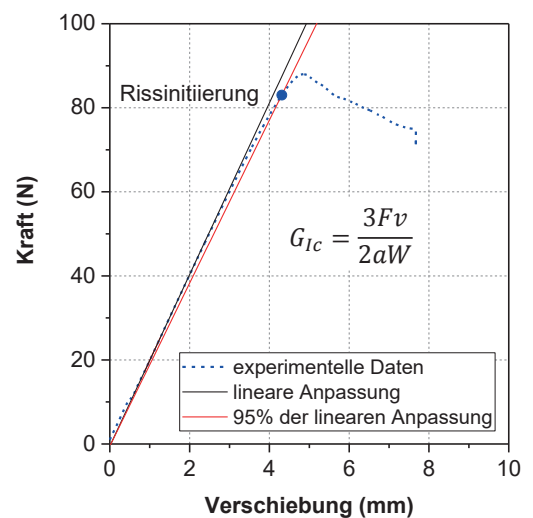
9

Double-Cantilever-Beam-Test

Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test an 3D-gedrucktem PLA



Versuchseinrichtung für bruchmechanische Untersuchungen bei Mode I-Belastung



Analyse der Kraft-Verlängerungs-Diagramme unter Mode I-Belastung

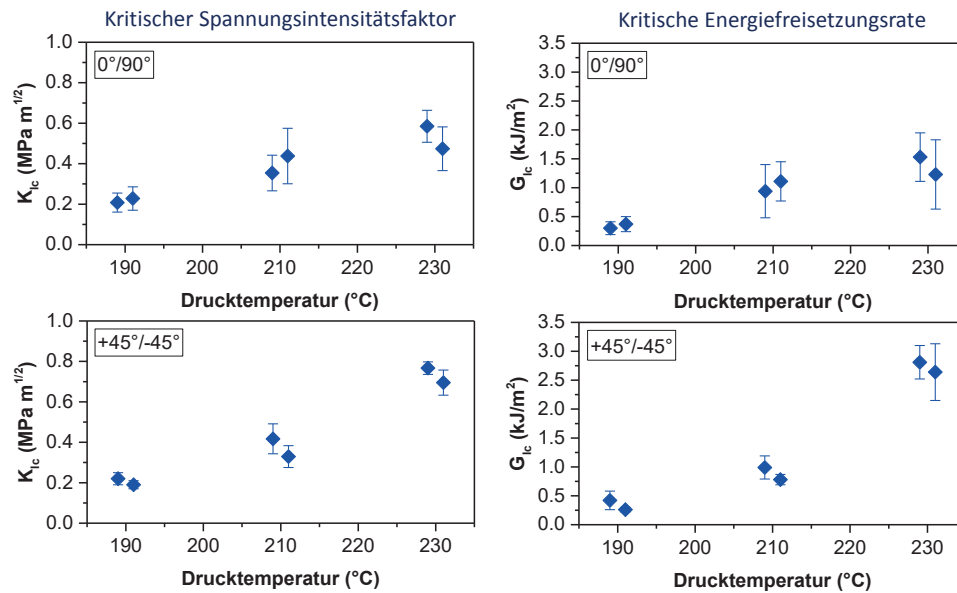
29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

10

Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test an 3D-gedrucktem PLA

Bruchmechanische Kennwerte als Funktion von Drucktemperatur und Baurichtung



29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

11

Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

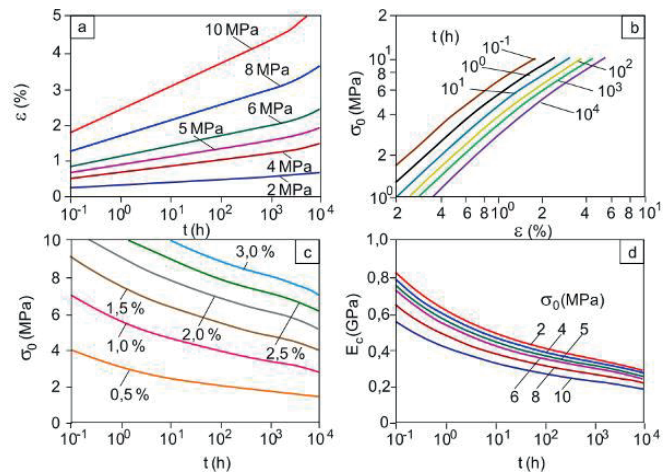
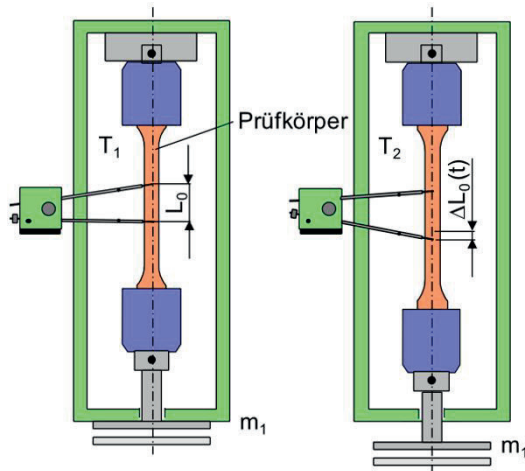
- (Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen
 - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroeindringversuch
 - Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test
- Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens
 - Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
 - Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest
- Zusammenfassung

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

12

Konventioneller Kriechversuch



Kriechzugversuch und Langzeit-Kriechverhalten von Polypropylen (PP) für unterschiedliche Lasten

(a) Kriechkurven, (b) isochrone Spannung-Dehnungs-Diagramme, (c) Kriechdiagramm, (d) Kriechmodul

See also: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Kriechverhalten_Zeitstandzugversuch

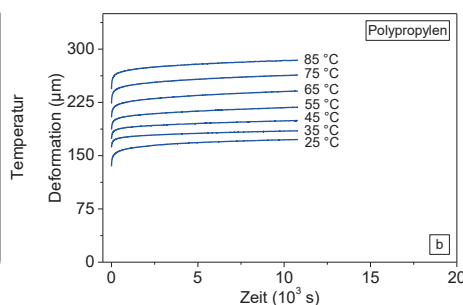
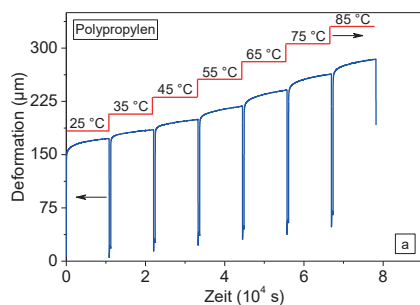
29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

13

Stepped Isothermal Methode (SIM)

Stepped Isothermal Methode (SIM)



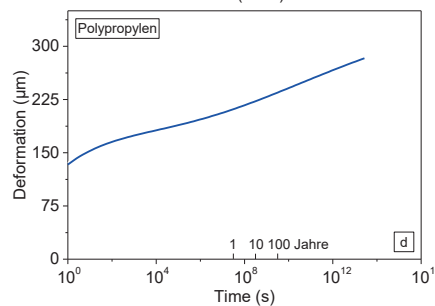
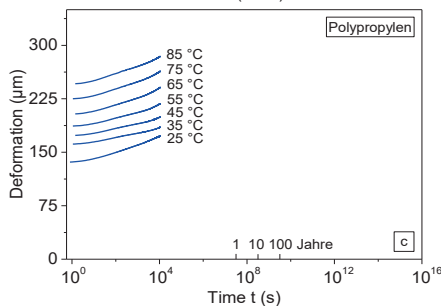
Schema der Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens mittels SIM

(a) Änderung der Eindringtiefe ermittelt in Abhängigkeit von der Zeit für unterschiedliche Temperaturstufen

(b) Um die thermische Ausdehnung korrigierte Kurvenabschnitte ohne Entlastungskurven in den Koordinatenursprung verschoben

(c) Die Kurvenabschnitte werden nach Logarithmisierung der Zeit logarithmisch aufgetragen

(d) Basierend auf der Zeit-Temperatur-Superposition Zusammensetzung der Masterkurve durch Verschiebung der Kurvensegmente entlang der logarithmischen Zeitachse



Siehe: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Stepped_Isothermal_Methode_Zugbeanspruchung

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

14

Prüfmaschine ZwickRoell KAPPA Multistation



Eigenschaft	Zwick/Roell KAPPA
Kraftmessdosen	10 kN und 1 kN
Kolben	
Traversenweg	200 mm
Geschwindigkeit	Statisch / 0,001 mm/h – 100 mm/min
Dehnungsmessung	Videoextensometer
Temperaturbereich	–40 °C – 250 °C
Versuchsdauer	max. 10.000 h / Versuch
Normen	<ul style="list-style-type: none"> ISO 899-1: Plastics – Determination of creep behaviour – Part 1: Tensile creep ASTM D 2990: Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics ASTM D 638: Standard test method for tensile properties of plastics

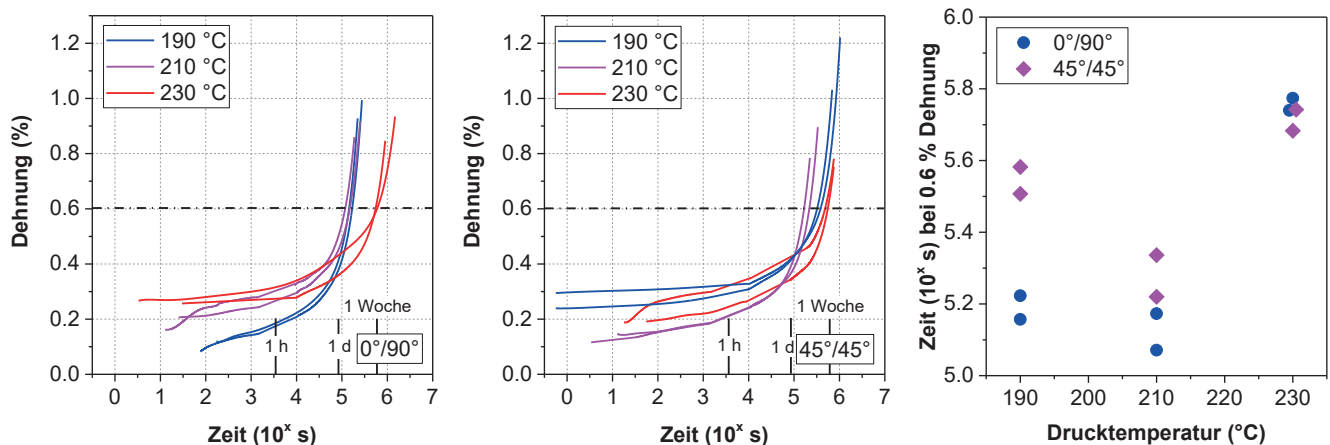
29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

15

Kriechverhalten (SIM) von 3D-gedrucktem PLA

Dehnungs-Zeit-Diagramme (Zugspannung: 10 MPa) als Funktion von Drucktemperatur und Baurichtung



29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

16

Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

- **(Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen**
 - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroeindringversuch
 - Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test
- **Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens**
 - Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
 - Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest
- **Zusammenfassung**

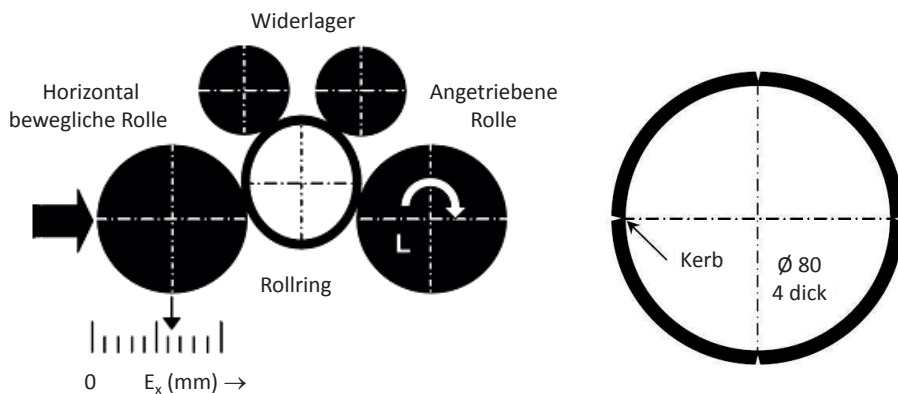
29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

17

Rollringversuch

Rollringversuch an 3D-gedrucktem PA12



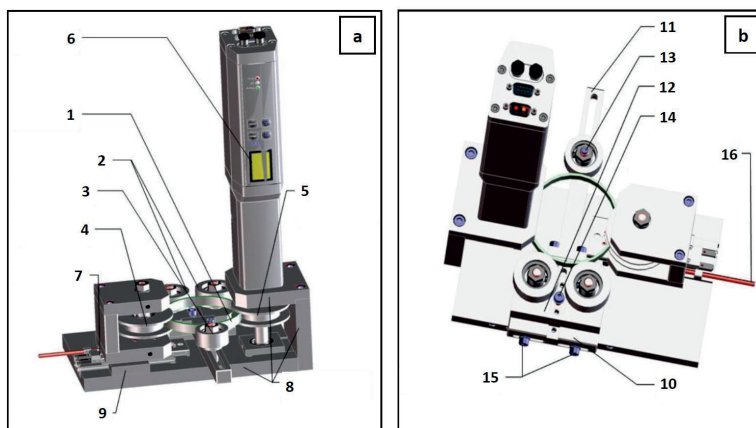
Schema des Rollringversuchs (links) und Rollringprüfkörper (rechts)

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

18

Rollringversuch an 3D-gedrucktem PA12



Rollringprüfgerät: (a) Seitenansicht und (b) Draufsicht

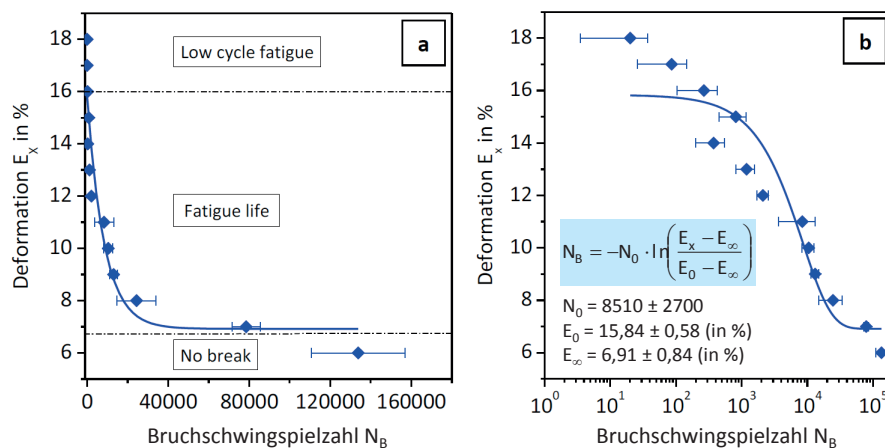
1 – Rollring, 2 und 3 – Widerlager, 4 – bewegliche Rolle, 5 – angetriebene Rolle, 6 – Motor, 7 – Lager, 8 – Grundplatte, 9 – Abstandshalter, 10, 11 und 12 – Gleitlager, 13, 14 und 15 – Schrauben, 16 – Justierschraube

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

19

Rollringversuch an 3D-gedrucktem PA12


Bruchschwingzielzahl (N_B) als Funktion der Deformation E_x von lasergesinterten Rollringen aus PA12:

(a) lineare Auftragung und (b) logarithmische Auftragung

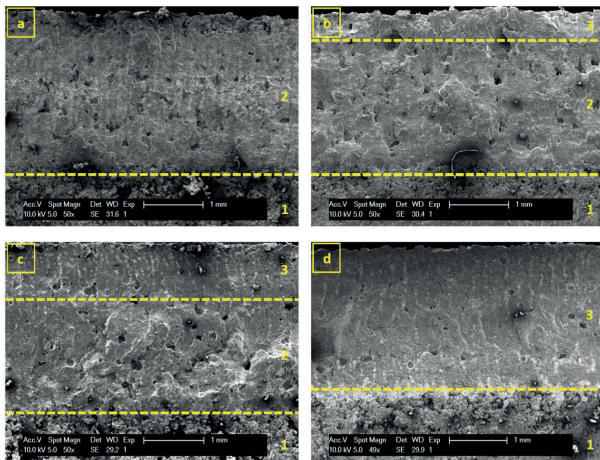
Energiedichte: 160 Ws/cm³; Umlaufbiegung: 250 min⁻¹; durchgezogene Linien: beste Anpassung an die Daten

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

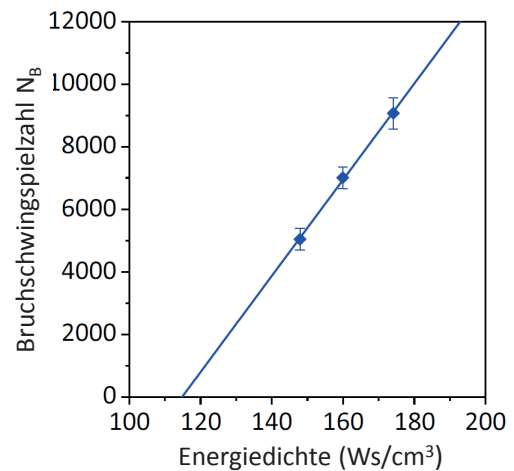
20

Rollringversuch an 3D-gedrucktem PA12

**REM-Bruchflächenaufnahmen von Rollringen:**

gebrochen bei (a) 8 %, (b) 13 % und (c) 17 % Deformation sowie
(d) gebrochen unter statischer Beanspruchung

1 – Kerb, 2 – stabiles Ermüdungsrisswachstum, 3 – instabiles Risswachstum/Sprödbbruch

**Bruchschwingungszahl (N_B) als Funktion der Energiedichte**

Umlaufbiegung: 250 min⁻¹; Deformation E_x = 10 %;
durchgezogene Linie: beste lineare Anpassung an die Daten

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

21

Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

- (Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen
 - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroeindringversuch
 - Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test
- Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens
 - Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
 - Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest
- Zusammenfassung

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

22

Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe

• (Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen

- Kennwerte (Martenshärte, Eindringmodul) aus dem registrierenden Mikroeindringversuch aufgrund der im Wesentlichen amorphen Struktur von PLA nicht sensitiv auf unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen
- Bruchmechanische Kennwerte (kritischer Spannungsintensitätsfaktor, kritische Energiefreisetzungsrate) aus dem Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test sehr sensitiv auf unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen; aussagefähige Bewertung der interlaminaren Schichthaftung

• Beschleunigte Verfahren zur Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens

- Stepped Isothermal Methode (SIM): schnelle Bewertung des (Langzeit)-Kriechverhaltens unter statischer Beanspruchung; Aussagefähigkeit zur Lebensdauerabschätzung im Fall von PLA aufgrund niedriger Glasübergangstemperatur begrenzt
- Rollringtest: schnelle Bewertung der Einsatzfähigkeit unter zyklischer Beanspruchung; sensitiv auf unterschiedliche Herstellungsbedingungen

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

23

AddiQ-Anwenderforum

The poster for the AddiQ Anwenderforum 2025 features a central image of a 3D printing machine. It includes logos for RUB/IN, AddiQ, and various partner institutions. A red banner on the right reads 'AddiQ Anwenderforum INNOVATION TRIFFT ANWENDUNG Weinbergcampus, Halle (Saale)'. A blue circle on the left says 'SAVE THE DATE 02.12.2025'. The bottom section lists the event details and a list of sponsors.

AddiQ Anwenderforum 2025
Innovation trifft Anwendung

- Praxisorientierte Fachbeiträge
- Aktiver Wissenstransfer
- Vorstellung produktbezogener Neuentwicklungen und wichtige Updates
- Industrieausstellung

Sponsors: ASW, NEL, DOGEL, SONOTEC, fertiQ, studio.201, ECH, Fraunhofer, IKT, GIBU, and others.

29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

24



29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

25

Information



Post- und Lieferanschrift:

Polymer Service GmbH Merseburg
Geusaer Straße 81 f
06217 Merseburg
Deutschland

Dr.-Ing. Ralf Lach
E-Mail: ralf.lach@psm-merseburg.de
Telefon: +49 3461 30889-67



Geschäftsführung:

Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Reincke (Vors.)
Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang Grellmann
Prof. Dr. rer. nat. Valentin Cepus
Dr. Marcus Schoßig

Kontakt:

Telefon: +49 3461 30889-50
Telefax: +49 3461 30889-99
info@psm-merseburg.de
www.psm-merseburg.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



29.09.2025

PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

Metallpulver als Einflussfaktor auf die Bauteilqualität

Andreas Pelz
m4p material solutions GmbH

Die Qualität additiv gefertigter Metallbauteile wird entscheidend durch das eingesetzte Metallpulver beeinflusst. Als Hersteller und Entwickler von Metallpulvern tragen wir maßgeblich dazu bei, dass laserbasierte Pulverbettverfahren (LPBF) zuverlässig reproduzierbare, hochqualitative Ergebnisse liefern. Dieser Vortrag beleuchtet zentrale Aspekte entlang der Qualitätskette – von der digitalen Transformation im Qualitätsmanagement über technologische Grenzen bis hin zur Prüfpraxis.

Der Vortrag wird in einem ersten Teil das **Qualitätsmanagement in Zeiten der Digitalisierung** thematisieren. Moderne Fertigungsprozesse erfordern vernetzte Systeme, die Daten in Echtzeit erfassen und bewerten, digitale Rückverfolgbarkeit und Transparenz gewährleisten, um höchste Standards im additiven Umfeld zu erreichen.

Der zweite Abschnitt widmet sich dem Spannungsfeld der **Metallpulverqualität versus Einsatzgrenzen laserbasierter Pulverbettverfahren** und betrachtet die metallurgischen Randbedingungen auf die Bauteilqualität. Abschließend werden **besondere Kriterien in der Qualitätsprüfung von Metallpulvern betrachtet, welche neben klassischen Verfahren** (z. B. Partikelgrößenanalyse, ICP, etc.) auch innovative Ansätze zur Pulvercharakterisierung erörtern und zur tatsächlichen Performance im Prozess gegenüberstellen.

Zukunftsfähige Strategien in der Additiven Fertigung

Vom Reststoff zum Prototyp – nachhaltige additive Fertigung im Reallabor SAMSax

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung – 15. Oktober 2025, Mittweida

Leif Bretschneider - TU Bergakademie Freiberg



Gliederung

1. Hintergrund
2. Methoden – Reallabor SAMSax
3. Binder Jetting bei SAMSax
4. Materialextrusion bei SAMSax
5. Prototypen
6. Zusammenfassung & Ausblick

Hintergrund

- **Klimawandel und Ressourcenknappheit erfordern nachhaltige Produktentwicklung [1-3]:**
 - Übergang von fossilen zu kreislauffähigen und bio-basierten Materialkreisläufen ist unerlässlich
 - Industrie und Gesellschaft müssen die Umweltbelastung durch innovative Technologien reduzieren
- **Additive Fertigung (AM) ermöglicht eine ressourceneffiziente und flexible Produktion [4,5]:**
 - Binder Jetting (BJT) und Materialextrusion (MEX): gut geeignet für die Integration nachhaltiger Materialien
 - Frühere Forschungen bestätigen das Potenzial für die Verwendung von landwirtschaftlichen und industriellen Reststoffen in der AM [6-8]
- **Kernherausforderung: Modifizierung verschiedener Reststoffe für reproduzierbare AM-Bauteile**

15.10.2025

samsax.de

3

Methoden

simul⁺ Reallabor SAMSax (Sustainable Additive Manufacturing in Saxony)

Reallabore als praxisnahe Plattformen für interdisziplinäre Forschung und Innovation [9-11]

- Offener, real existierender Versuchsraum, in dem Forscher, Nutzer und Interessengruppen gemeinsam innovative Technologien, Produkte oder Dienstleistungen entwickeln und testen

simul⁺ Modellprojekt SAMSax: Reallabor für Kreislaufwirtschaft in der Additiven Fertigung – “Test before invest” für KMUs

- Konzentriert sich auf regionale, organische und anorganische Reststoffe und integriert diese in Binder Jetting und Materialextrusion
- Fördert Nachhaltigkeit und verringert die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen



© Crispin Mokry

15.10.2025

samsax.de

4

Methoden

Vom Reststoff zum 3D-Druck: Materialanalyse für die AM-Verfahren

Um die Eignung für AM zu beurteilen, wird jeder Rückstand auf folgende Eigenschaften geprüft: Partikelgrößenverteilung, Schütt- und Klopfdichte, Hausner-Faktor und Carr-Index

> 50 Reststoffe wurden analysiert und verarbeitet:

- **Landwirtschaftliche Rückstände:** (z. B. Buchen- und Birkenholzsägemehl), Gräser wie Miscanthus und Schalen oder Kerne (z. B. Haselnüsse)
- **Industrielle Nebenprodukte:** Glasschleifstaub, Textilfasern (z. B. recycelte Baumwoll- und Denimfaserstaub) und chromfreie Schleifrückstände
- **Spezielle organisch-anorganische Mischungen:** Mineral-Holz-Verbundstoffe, Pyrolysekoks und Zellulose-Sand-Mischungen



© Crispin Mokry

15.10.2025

samsax.de

5

Methoden

Bio-basierte Binder & Prozessanpassung

Vorteile bio-basierter Bindemittel

- Vollständig biobasiert und oft biologisch abbaubar
- Recyclbar → unterstützt die wiederholte Verwendung
- Unterstützt Nachhaltigkeitsziele

Bindemittel in Gebrauch und Entwicklung

- Derzeit verwendet: Polyvinylalkohol (PVA), Alginat, Celluloseleim
- In Entwicklung: Gelatine, Bindemittel auf Baumharzbasis

Maschinendesign und Materialkompatibilität

- Maßgeschneiderte Systeme, die auf das physikalische Verhalten von Reststoffen zugeschnitten sind
- Maschinen, die an die Eigenschaften natürlicher Bindemittel und die Variabilität von Pulvern angepasst sind



© Crispin Mokry

15.10.2025

samsax.de

6

Binder Jetting

Binder Jetting Technologie bei SAMSax

Binder Jetting (BJT) ist ein „additiver Fertigungsprozess [...], bei dem ein flüssiges Bindemittel gezielt auf Pulvermaterialien aufgetragen wird, um diese miteinander zu verbinden“.

Zwei Binder Jetting-Drucker, die für nachhaltige Materialien geeignet sind:

- **ZPrinter 310**
 - Bauvolumen: 200 × 250 × 200 mm
- **Concr3de Armadillo White**
 - Bauvolumen: 420 × 420 × 250 mm



© Crispin Mokry

15.10.2025

samsax.de

7

Binder Jetting

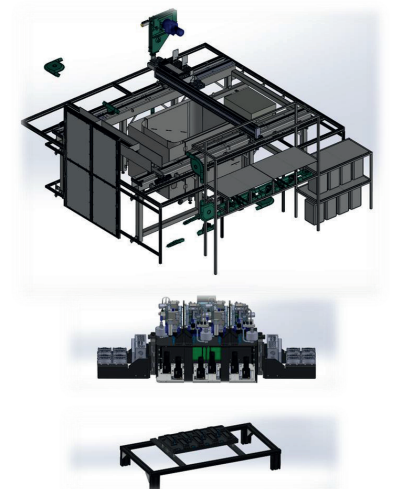
Binder Jetting Technologie bei SAMSax

Im Rahmen von SAMSax wurde eine zweiteilige BJT-Anlage in Freiberg realisiert:

- Eine Versuchsanlage (im Labormaßstab) und ein Großproduktionssystem
- Entwickelt für die Spitzenforschung im Bereich biobasierter Materialien und industrieller Reststoffe
- Ermöglicht die Skalierung validierter Prozesse vom Labor- zum Industriemaßstab

Versuchsanlage:

- Plattform zum Testen von Prozessparametern und der Kompatibilität von Materialien und Bindemitteln
- Ausgestattet mit einem Tintensystem, das mit dem Produktionssystem identisch ist
- Gewährleistet die direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse



© C-Marx GmbH

15.10.2025

samsax.de

8

Binder Jetting

Binder Jetting Technologie bei SAMSax

Produktionssystem:

- Bauvolumen: 1 m³
- Unterstützt wasser- und lösungsmittelbasierte Tinten
- Kompatibel mit Pulverpartikelgrößen von 5–1000 µm
- Verarbeitet Schüttdichten von 0,1–4,5 g/cm³

Flexibilität des Tintensystems und des Druckkopfs:

- Bis zu 8 Druckköpfe, 2 pro Tintenversorgungseinheit
- Fortschrittliche Tintenzirkulation mit Temperaturregelung, Entgasung und Filtration
- Sensoren für Durchflussrate, Unterdruck und Überdruck

Kombinierte Fähigkeiten:

- Unterstützt natürliche, variable Materialien
- Ermöglicht die Entwicklung umweltfreundlicher Bindemittel und funktionaler Komponenten
- Bietet einen skalierbaren Weg von der Forschung und Entwicklung bis zur Produktion



© C-Marx GmbH

15.10.2025

samsax.de

9

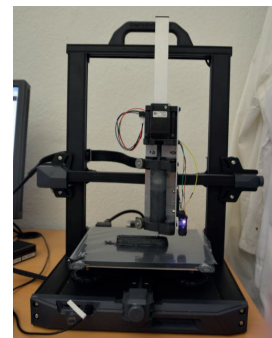
Material Extrusion

Materialextrusion bei SAMSax

- SAMSax fokussiert sich bei der Materialextrusion auf die **Pastenextrusion (MEX-CRB)**
- Nachhaltige Materialien durch Nutzung bio-basierter Bindemittel und Wasser als Lösungsmittel
- Einbringung von Hitze im Prozess nicht notwendig

Zwei Druck-Systeme im Reallabor verfügbar:

- **3D-PEDT**
 - Spritzenvolumen: 70 ml
 - Intern entwickelter Desktopdrucker zur Materialentwicklung
- **WASP 40100 Clay**
 - Bauraum: Ø 400 x 1000 mm
 - Skalierung und Prototypendruck



© SAMSax



© WASP

15.10.2025

samsax.de

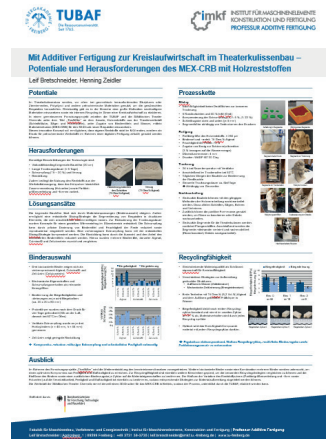
10

Material Extrusion

Materialextrusion bei SAMSax

Untersuchung verschiedener Bindemittel:

- Alginat
 - Celluloseleim
 - Culminal®
 - Tylose®
 - Xanthan Gum
- Binder-Füllstoff Kombination entscheidend für Verarbeitbarkeit und Endeigenschaften
 - Weiterentwicklung der Drucker im Sinne von Produktivitätssteigerung und Prozessmonitoring



15.10.2025

samsax.de

11

Prototypen

Theaterkulissen BJT – Städtische Theater Chemnitz

- Fünf identische Säulenkapitelle
- **Material:** Miscanthus-Pulver und 15 Gew.-% PVA-Bindemittel, wasserbasierte Tinte
- **Schichtdicke:** 250 µm
- **Drucker:** Concr3de Armadillo White
- Schwerpunkt auf nachhaltiger Materialverwendung und hoher Detailauflösung



© Nasser Hashemi

15.10.2025

samsax.de

12

Prototypen

Theaterkulissen MEX-CRB – Städtische Theater Chemnitz

- Flamingo gedruckt im MEX-CRB
- **Material:** Holzreststoff der Theaterwerkstatt
15 Gew.-% Alginat (Bindemittel),
Wasser (Lösemittel)
- **Drucker:** WASP 40100 Clay
- **Düsendurchmesser:** 8 mm
- **Schichthöhe:** 3 mm
- Fokus auf großvolumige Theaterkulissen aus eigenem Reststoff



© Nasser Hashemi

15.10.2025

samsax.de

13

Prototypen

Restaurierungselemente BJT – Büste & Wasserspeier

- Zusammenarbeit mit INTOPLAN GmbH
- **Material:** angepasster Mörtel, geeignet für BJT
- **Schichtdicke:** 0,1 mm;
Sättigungsgrad: 120 %
- **Drucker:** ZPrinter 310
- Fokus auf Wasserbeständigkeit, feine Details und restauratorische Präzision



© SAMSax

15.10.2025

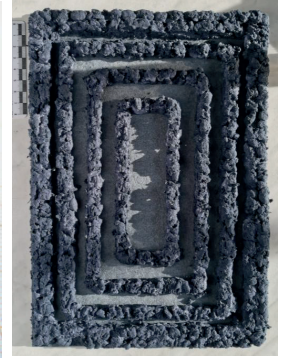
samsax.de

14

Prototypen

Leichtbauplatte aus Jeansstaub MEX-CRB – Lederett GmbH

- Sandwichkern gedruckt im MEX-CRB
- **Material:** Jeansfasern, Acrylharz „Acronal“ (14,5 Gew.-%) und Alginat (0,5 Gew.-%) als Binder sowie Wasser als Lösungsmittel.
- **Drucker:** WASP 40100 Clay
- **Düsendurchmesser:** 8 mm
- **Schichthöhe:** 3 mm
- Fokus auf wasserunlöslich, gute Verbindung zwischen Infill und Platte



© SAMSax

15.10.2025

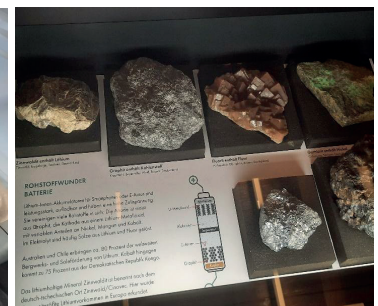
samsax.de

15

Prototypen

Objektträger für Mineralien BJT - terra mineralia

- Maßgefertigte Schalen für Mineralienausstellungsfächer
- **Material:** Miscanthus-Pulver und 15 Gew.-% PVA-Bindemittel, wasserbasierte Tinte
- **Drucker:** Concr3de Armadillo White
- **Nachbearbeitung:** Harzinfiltration + schwarzer Lack
- Gewährleistet Objektstabilität, ästhetische Präsentation und maßgeschneiderte Passform



© SAMSax

15.10.2025

samsax.de

16

Zusammenfassung & Ausblick

- Erweiterung der Materialbibliothek um neue organische und industrielle Reststoffe
- Weiterentwicklung von Pulver-Bindemittel-Formulierungen für bessere Druckbarkeit und Konsistenz
- Untersuchung industrieller Anwendungsmöglichkeiten für nachhaltige Additive Fertigung
- Erforschung komplexer Geometrien und multifunktionaler Komponenten
- Stärkung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft: Reduzieren, Wiederverwenden, Recyclen
- Positionierung von SAMSax als Maßstab für nachhaltige additive Fertigung durch interdisziplinäre Zusammenarbeit

15.10.2025

samsax.de

17

Referenzen

- [1] Barbier, Edward B., 'The Evolution of Economic Views on Natural Resource Scarcity', *Review of Environmental Economics and Policy*, 15.1 (2021), pp. 24–44, doi:10.1086/712926
- [2] Kilkis, Siir, 'Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Index for Southeast European Cities', *Journal of Cleaner Production*, 130 (2016), pp. 222–34, doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.121
- [3] Putra, Niko E., Jie Zhou, and Amir A. Zadpoor, 'Sustainable Sources of Raw Materials for Additive Manufacturing of Bone-Substituting Biomaterials', *Advanced Healthcare Materials*, 13.1 (2024), p. 2301837, doi:10.1002/adhm.202301837
- [4] Javaid, Mohd, and others, 'Role of Additive Manufacturing Applications towards Environmental Sustainability', *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4.4 (2021), pp. 312–22, doi:10.1016/j.aiepr.2021.07.005
- [5] Jiang, Hongtao, Xinhao Yang, and Hao Wang, 'Preparation and Characterization of Starch-Based Binders for Binder Jetting', *RSC Advances*, 14.44 (2024), pp. 32506–16, doi:10.1039/D4RA05411C
- [6] Jerman, Marko, and others, 'Additive Manufacturing Using Renewable Materials: Concept of Upcycling Peach Kernels for Use in Binder Jetting and FFF', 2020
- [7] Singamneni, S., and others, 'Mechanism of Bonding in Seashell Powder Based Ceramic Composites Used for Binder-Jet 3D Printing', *Bioceramics Development and Applications*, 08 (2018), doi:10.4172/2090-5025.1000108
- [8] Zeidler, Henning, and others, '3D Printing of Biodegradable Parts Using Renewable Biobased Materials', *Procedia Manufacturing*, 21 (2018), pp. 117–24, doi:10.1016/j.promfg.2018.02.101
- [9] Bouwma, Irene, and others, 'Sustainability Transitions and the Contribution of Living Labs: A Framework to Assess Collective Capabilities and Contextual Performance', *Sustainability*, 14.23 (2022), p. 15628, doi:10.3390/su142315628
- [10] Hossain, Mokter, Seppo Leminen, and Mika Westerlund, 'A Systematic Review of Living Lab Literature', *Journal of Cleaner Production*, 213 (2019), pp. 976–88, doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.257
- [11] Leminen, Seppo, and Mika Westerlund, 'Living Labs: From Scattered Initiatives to a Global Movement', *Creativity and Innovation Management*, 28.2 (2019), pp. 250–64, doi:10.1111/caim.12310

15.10.2025

samsax.de

18

Vielen Dank für Ihr Interesse!
Ihr SAMSax Team aus Freiberg, Chemnitz und Dresden



Folgen Sie uns



Zur Homepage



Leif Bretschneider

TU Bergakademie Freiberg – Professur für Additive Fertigung
09599 Freiberg

Leif.bretschneider@imkf.tu-freiberg.de

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler

TU Bergakademie Freiberg – Professur für Additive Fertigung
09599 Freiberg

henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de



TUBAF
Die Bergakademie Freiberg
Seit 1763



Diese Maßnahme wird mitfinanziert mit
Steuermitteln auf Grundlage des vom Sächsischen
Landtag beschlossenen Haushaltes.



Das Sächsische Staatsministerium für Infrastruktur
und Landesentwicklung (SAMI) unterstützt das
Projekt im Rahmen des simul+InnovationHubs.

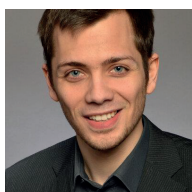
Recycling im Resin 3D-Druck

Schaffung eines geschlossenen Lösemittelkreislaufs für die abfallfreie additive Fertigung von Kunststoffprodukten auf Basis stereolithographischer Prozesse (SLA)

Röben UG – 15.10.2025 – Forum 3D-Druck 2025

roeben-recycling.de

Teamvorstellung



Joschka Röben
Geschäftsführung und Produktion



Christian Zineker
IT und Betriebliches

Kooperationen

SILADENT

RECYCLING
FABRIK

Niedersachsen
ADDITIV

CUTEC
Informationen
Ressourcen
Energie

TU Clausthal

LZH
LASER ZENTRUM HANNOVER e.V.



WiReGo
Wirtschaftsförderung Region Goslar GmbH & Co. KG

SMINT@HANNOVER
INCUBATOR FOR SMART INFORMATION TECHNOLOGIES

NBank

roeben-recycling.de

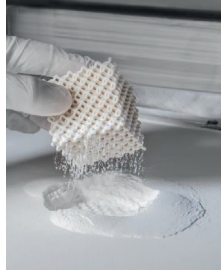
Recycling im 3D-Druck: Die drei wichtigsten Verfahren

Verfahren:

FDM (Filament)

SLS/SLM (Pulver)

SLA (UV aktives Resin)



Recycling:

Filament-
Rückstände,
Fehldrucke,
Stützstrukturen

Pulver (nur teilweise
Produktionsintern)

Resin-Rückstände (thermisch),
verschmutztes Isopropanol (Produkt),
PE aus Gebinden (Werkstofflich)

roeben-recycling.de

Recycling im (M)SLA „Resin“ 3D-Druck:



Isopropanol als Reinigungsmittel

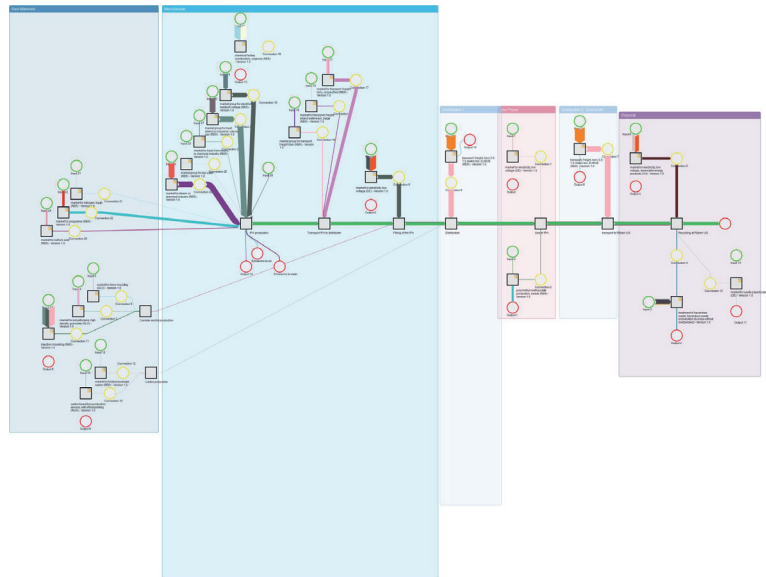
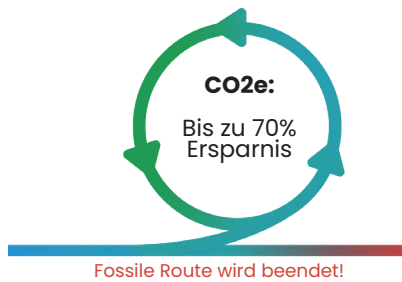


roeben-recycling.de

<https://brtfab.io/blog/3d-printing-plastic-recycling/>

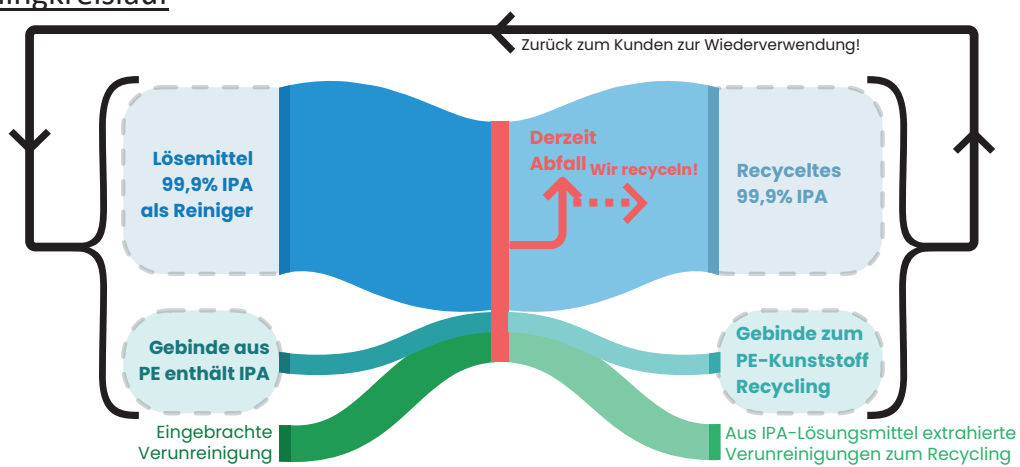
Umweltbilanz

Umwandlung in ein zirkuläres Produkt:



roeben-recycling.de

Recyclingkreislauf



roeben-recycling.de

Bevor die Menschheit multiplanar wird, muss sie auf der Erde zirkulär werden. Sonst nehmen wir unsere Probleme mit uns!

Unser Beitrag: Recycling im Resin 3D-Druck

Fragen?



Danke für ihre Aufmerksamkeit!



t +49 5323 - 70898811
e info@roeben-recycling.de
w roeben-recycling.de

a Röben UG
Hartstraße 10
38723 Seesen



www.roeben-recycling.de

Multi-optional systems

metrom



multi-optional systems

metrom



1A TECHNOLOGIES
INDUSTRIAL 3D SOLUTIONS



Ist die additive (Wieder)Herstellung von Ersatzteilen sinnvoll?

multi-optional systems
metrom



Überblick

- Darstellung der genutzten Verfahren
- Beispiele SEAM-3D-Druck (FGF)
- Beispiele Lichtbogenauftragschweißen
- Beispiele Laserauftragschweißen
- Ausblick
- Zusammenfassung



multi-optional systems

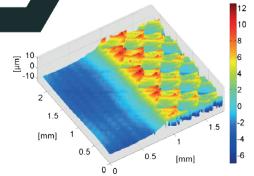
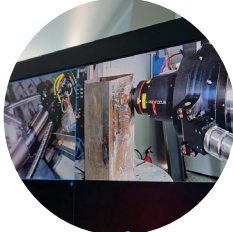
metrom



3D-Druck



Nachbearbeitung



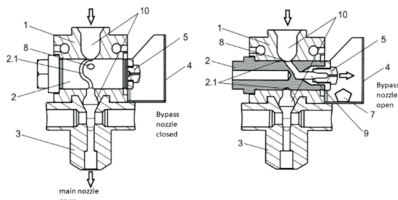
multi-optional systems

metrom



Screw Extrusion Additive Manufacturing **SEAM**

- Kunststoff 3D-Druck mittels Einschneckenextruder (FGF)
- patentiertes Bypass-Düsen System für automatisierte Volumenstromsteuerung
- konstante Bauteilqualität - Ausgleich von Prozessschwankungen
- Austragsleistung bis 18kg/h, Druckgeschwindigkeit bis 1000mm/s



Exklusiver Lizenzpartner des Fraunhofer IWU:

1A TECHNOLOGIES
INDUSTRIAL 3D SOLUTIONS



multi-optional systems

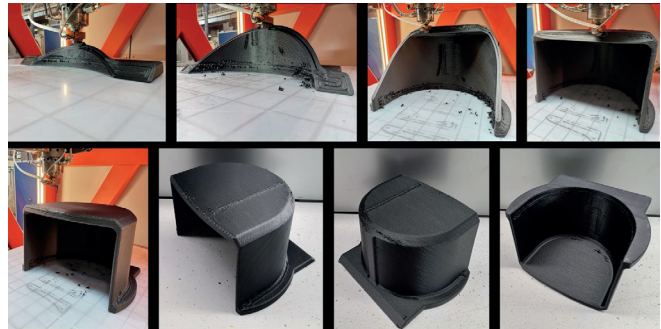
metrom



SEAM Screw Extrusion Additive Manufacturing für Ersatzteile

- 45° Slicing zur beanspruchungsgerechten Lastverteilung der Schichten
- Möglichkeit für horizontale Überhänge ohne Stützstruktur
- Schmierfettkappe für Baggerschwenkgetriebe
- Original Gussteil ~ 40kg
- 3D-gedrukt: 7 kg
- Druckzeit 4 Stunden
- Materialkosten 56€
- Kosten ~500€/Teil

In Zusammenarbeit mit Partner:

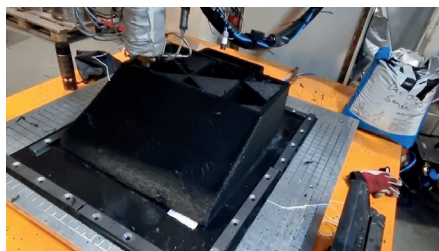
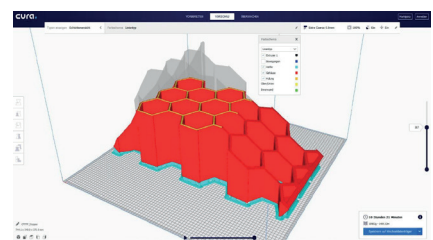
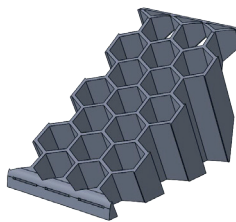


source: Fraunhofer IWU

multi-optional systems
metrom

SEAM Anlegekeil für Muldenkipper

- Substitution eines Stahlbauteils
- Erster Ansatz Druckzeit 10,5 Stunden
- Zweiter Ansatz Druckzeit 4 Stunden
- Materialkosten 120€ bei beiden Varianten
- Leicht und stabil
- Anpassbar an Anforderungen der Arbeitssicherheit und regionalen Bedürfnisse (Hebegewicht, Größe)

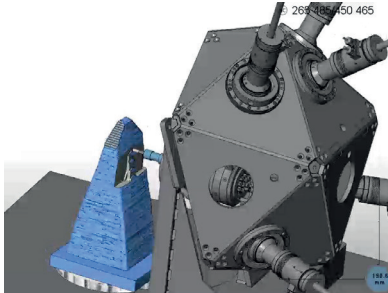
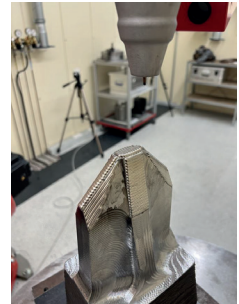


multi-optional systems
metrom

Lichtbogenauftragsschweißen Baggerzahnabdeckung als Neuteil

- Fertigung mittels WAAM
- Bearbeitung der Grundfunktionsflächen
- Zusätzlicher Verschleißschutz mittels Laserauftragsschweißen
- Herstellungszeit Schweißen 14h, Fräsen 2h, Laserauftrag 2h
- Reine Herstellungskosten Schweißen Aufmaß 10% -> Material 39€, Schutzgas 33€, Maschinenstunden 238€ (18€/h) -> 310€
- Kosten des reinen Schweißteils bereits Faktor 3,8 höher als Gussteil aus China

In Zusammenarbeit mit Partner:

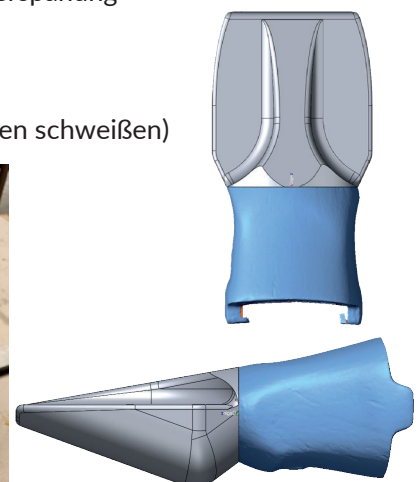
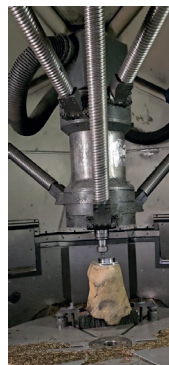


multi-optional systems
metrom

Baggerzahn 3D-Druck als Reparatur

- Mechanische Bearbeitung auf definiertes Höhenniveau mittels HSC-Zerspanung
- Auftragen ohne Zwischenscan mit Hartauftragsmaterial
- Keine mechanische Nachbearbeitung
- Wiederherstellungszeit 4 Stunden optimiert (1 Stunde Fräsen, 6 Stunden schweißen)
- Kosten gesamt 302€ ohne Scan& ohne Vorrichtungen
- Unterhalb der Neuteilkosten
- Lohnt sich ab entsprechender Bauteilgröße und Fertigungstechnik

In Zusammenarbeit mit Partner:

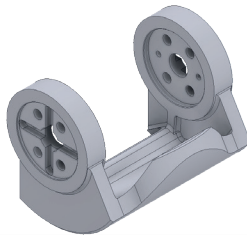


multi-optional systems
metrom

Neufertigung als Ersatz zu Gussbauteilen - Gasschieber



- Herstellung mittels wire-DED (75kg bei Nettogewicht 28kg) mit Voestalpine Thermanite
- Zwischenbearbeitung unzugänglicher Bereiche
- Fertigung von Referenzpunkten für finale Bearbeitung
- Herstellungszeit Schweißen+Fräsen 2 Wochen vs. 6 Monate Lieferzeit
- Aufgrund Einzelstück Kostenvorteil von ca. 40%
- Qualitätssicherung einzelner Lagen und Korrektur anstelle Fertigteil mit CT-Prüfung ohne Reparaturmöglichkeit

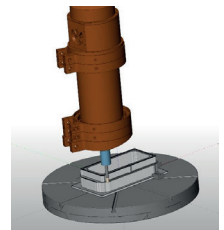
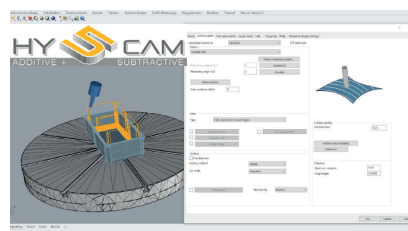
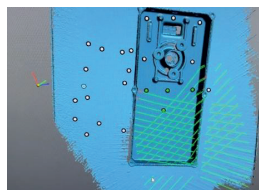


multi-optional systems
metrom

Use Case für die Ersatzteilproduktion

- Korrodiertes Scheibenwischergehäuse auf dem Offshore-Versorgungsschiff Leibniz
- Sichere Weiterfahrt nicht garantiert, Ersatzteil nicht auf Lager verfügbar
- 3D-Modell nicht verfügbar
- Reverse Engineering mit einem Creaform-Scanner
- Visualisierung und Kollisionsprüfung für additive und subtraktive Herstellung zur Prüfung der nutzbaren Anlage

Source: Bernhard Schulte Shipmanagement



multi-optional systems
metrom

Fertigung in der Mobile Smart Factory

- 3D-Druck mit seewasserfestem Aluminiumdraht
- Bearbeitung in 2 Bearbeitungslagen, um alle Bereiche zu erreichen
- Bearbeitungszeit insgesamt 2 Tage inklusive Programmierung, Schweißen und Bearbeitung
- Fertigteil kann direkt verwendet werden



Mobile Smart Factory (in a box)



multi-optional systems
metrom



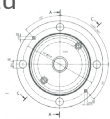
Fertigung unter dem Aspekt von „Battle Damage Repair“



Herstellungsprozess ab 07:00Uhr:

1 Zeichnung zu CAD-CAM

>09:00Uhr



2 Gedrucktes Bauteil

>12:00Uhr



3 Fertiges Bauteil

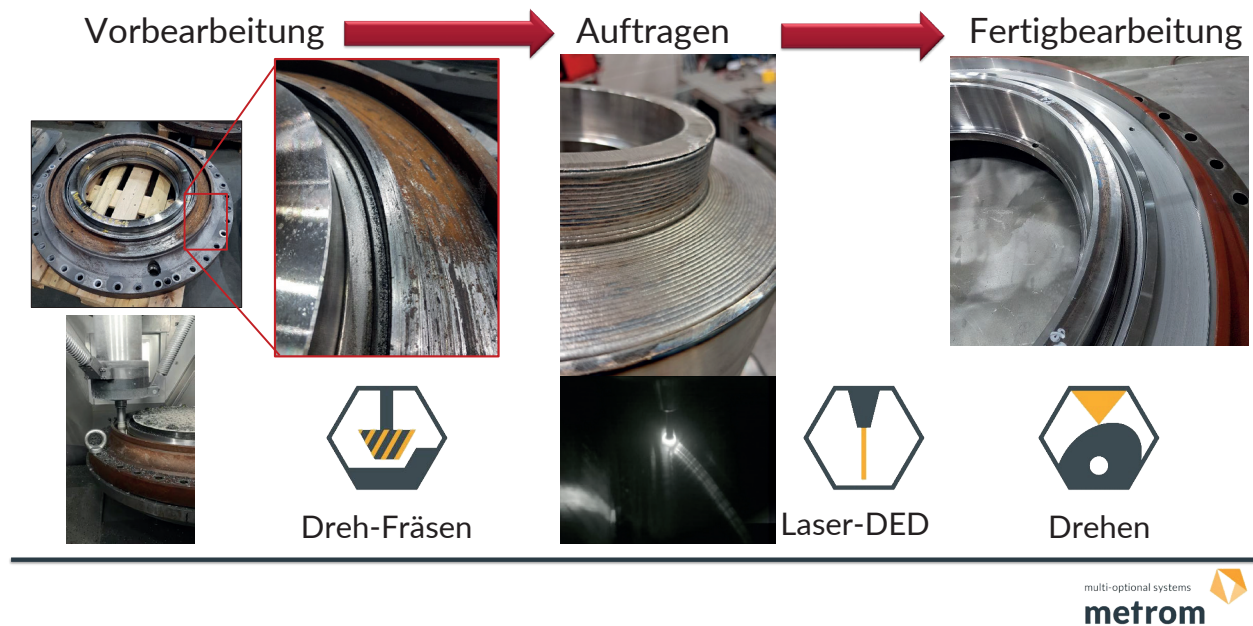
>15:00Uhr



multi-optional systems
metrom



Wiederherstellung durch Hybridbearbeitung in einer Maschine

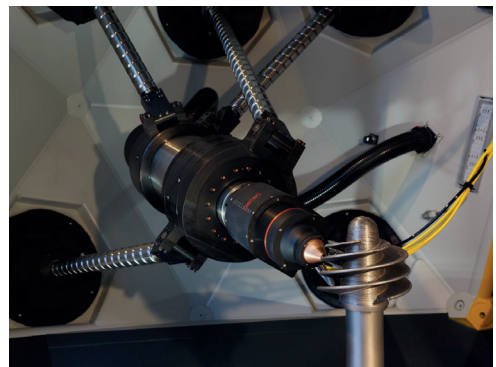


Vorteile einer hybriden Wiederherstellung mittels Laserschweißen + Fräsen

- Automatische Reparatur nach dem Einspannen des Teils auf dem Tisch, der Vorgang kann jedes Mal für einen Schichtwechsel oder eine Messung gestoppt werden
- Kein Zwischenscannen oder best Fit-Einmessen des Bauteils notwendig
- Geringer Energieverbrauch (~8kW Trockenfräsen, ~9kW Schweißen)
- Keine Vorwärmung erforderlich für GGG60 oder 42CrMo4V
- Drahtauftragsschweißen -> keine Pulverkontamination
- 5€/kg Drahtkosten
- 0,20€/kg Kosten für Schneidwerkzeuge
- Großes Portfolio an Bauteilen wiederaufbereitbar

In Zusammenarbeit mit Partner:

OSCAR
JUST ADD METAL.

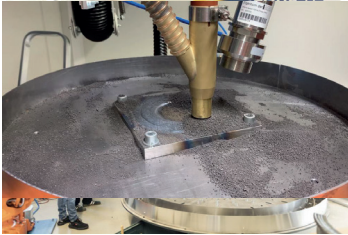


multi-optional systems
metrom

Ausblick auf aktuell spannende Entwicklungen unserer Partner für Auftragsraten >5kg/Stunde geeignet für die (Wieder)Herstellung von Großbauteilen

Submerged Arc Additive Manufacturing am

[Technologie Campus Parsberg-Lupburg]



Material: Stahl, Inconel
Vorteile: einfach, günstig, Überhänge 3ax
Limits: Kühlzeiten

Makro Selective Laser Melting von:

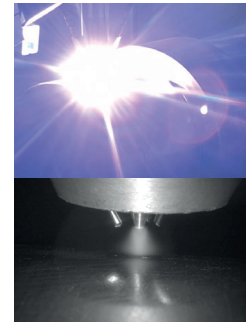
Laserinstitut Hochschule Mittweida



Material: Stahl, Inconel, Alu
Vorteile: omnidirektional, Überhänge 3ax
Limits: Laserschutz

WIG-^{3D}-Schweißen von

OSCAR JUST ADD METAL.



Material: Bronze, Stahl, Inconel
Vorteile: omnidirektional, kein Pulverhandling
Limits: Überhänge

multi-optional systems metrom

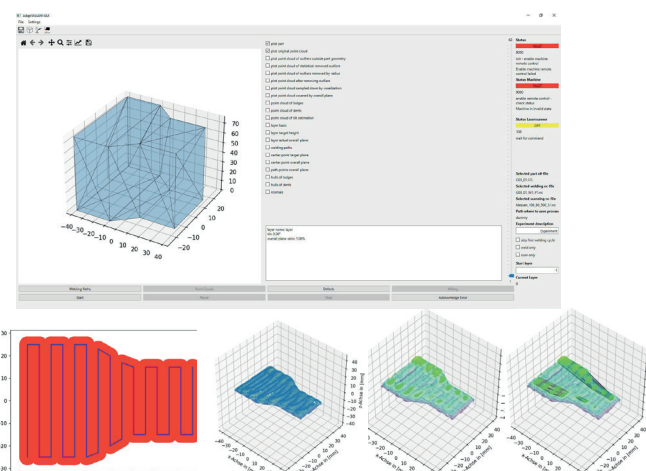
Ausblick Automatisierung

- Adaptiver 3D-Druck mit automatisierter Korrektur
- Ohne Bedienerinfluss
- 100% Qualitätsüberwachung



In Zusammenarbeit mit Partner:

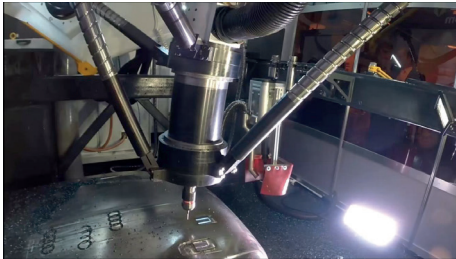
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN FTM Füge-technik und Montage



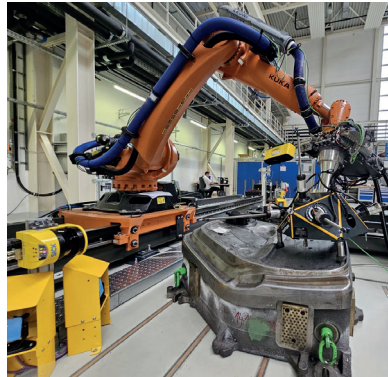
multi-optional systems metrom

Ausblick 3D-Druck + Nachbearbeitung für Großbauteile

Mobile hybride
Maschine



Mobile Maschine
+ Roboter



Mobile Maschine +
Fahrsystem



multi-optional systems
metrom

Additive (Wieder)Herstellung von Ersatzteilen sinnvoll?

- Wie schnell benötige ich Ersatz?
- Welche Alternativen habe ich – Reparatur, Neufertigung, Ersatzprodukte...
- Welche zulassungstechnischen Voraussetzungen und Eigenschaften muss das Bauteil erfüllen?
- Was sind die Folgen fehlender Ersatzteilversorgung?

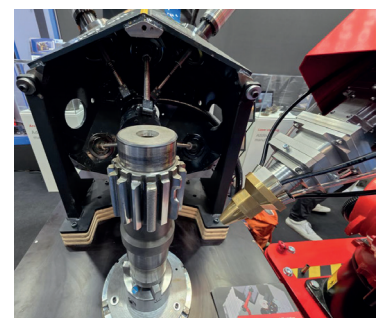
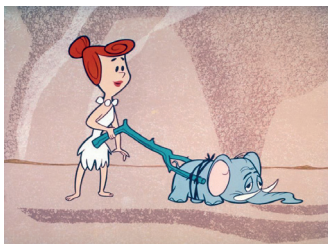


Marcus Witt

METROM Mechatronische
Maschinen GmbH

phone +49 3722 59 863 -12

marcus.witt@metrom.com



Dieser Vortrag wurde ohne KI erstellt und schont die Umwelt ☺

multi-optional systems
metrom

Neue Dimensionen im 3D-Druck



WENN CAD AN DIE GRENZEN STÖSST
ZWEI CASE STUDIES MIT
GEOMAGIC FREEFORM
ANTONIUS KÖSTER

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

A hand holds a tablet computer next to a white, textured sculpture of a human head. The background is a blurred outdoor scene with buildings and greenery.

AGENDA

01

Über uns

02

Gemeinsam in
die Zukunft!

03

Geomagic
Freeform

04

Erstes Treffen
3D-Scannen

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

ÜBER UNS



Unser Ansatz: Das vorhandene Knowhow in Ihrem Unternehmen nutzen und mit den neuen Möglichkeiten digitaler Fertigung über die produktivste 3D-Datenerstellung zu verknüpfen.



- Die Additive Fertigung bietet ungeahnte Potentiale.
- Es werden immer 3D-Daten von den zu fertigen Objekten benötigt.
- Wir setzen da an, wo normale CAD/CAM Systeme an die Grenzen stoßen.
- Seit mehr als 25 Jahren bieten wir Know-how und Competence in 3D.
- Organische Formen, Oberflächenstrukturen, schnelle Konzept-Modellierung, basierend auf 3D-Scans, CT-Daten oder auch nur Skizzen, Fotos und Ideen in fertigungsgerechte Daten umzusetzen ist unsere Spezialität.

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

PRODUKTPORTFOLIO



Consulting

- Additive Fertigung
- CAD/CAM
- organische Formen
- Systemauswahl
- Machbarkeitsstudien
- Workshops und Vorträge



Produkte

- 3D Scanner
- 3D Software
- Hardware
- Zubehör
- Schulungen



Service

- 3D Scans
- 3D Druck
- 3D Fertigung
- 3D Creative
- Wartung und Support

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

SCANNER

AK

Artec 3D

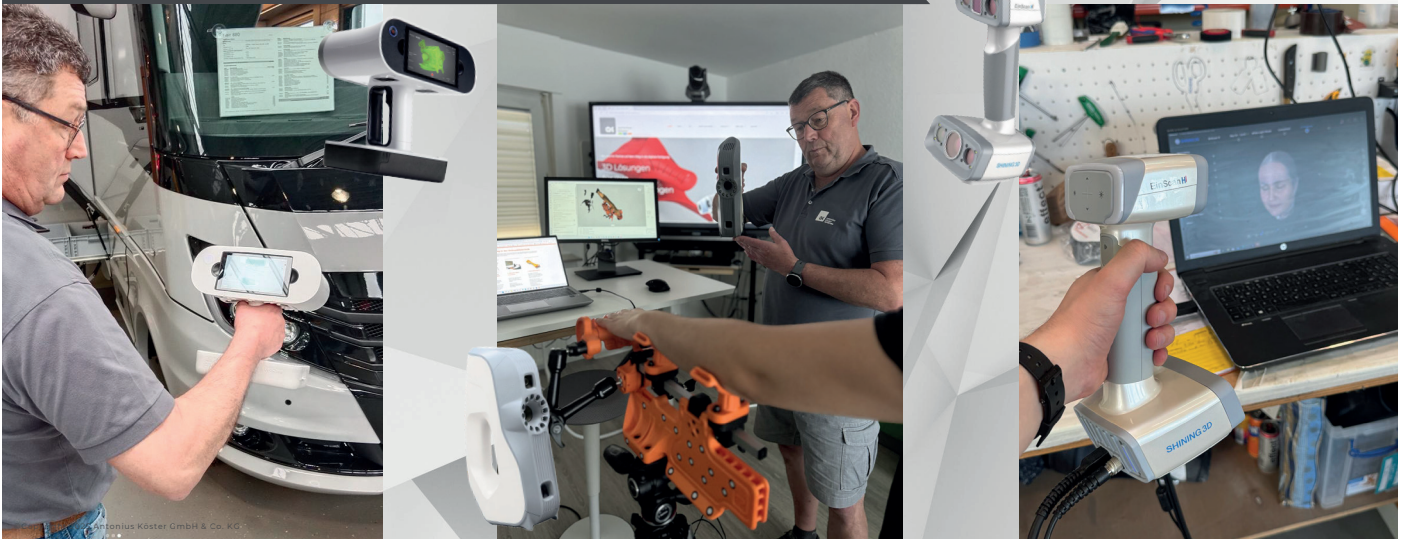
SHINING 3D

REVOPOINT

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

SCANNER

AK



©Antonius Köster GmbH & Co. KG

GEMEINSAM IN DIE ZUKUNFT. NICHTS IST UNMÖGLICH!



Know How und **3D-Lösungen** für:



- Medizintechnik
- Orthetik und Prothetik
- Oberflächengestaltung
- Figürliche und anatomische Formen



- Kunst und Design
- Produktentwicklung
- ... und überall dort, wo CAD an seine Grenzen stößt

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG



GEOMAGIC FREEFORM

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

HYBRIDE MODELLIERUNG

- Meshes
- Voxel
- SubD
- Nurbs
- Bilddaten
- Lattice-Strukturen
- Haptische Eingabegeräte



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

DIGITALE MODELLIERUNG UND DESIGN

2D-Konturen
über IGES,
DXF, AI

3D-Scan über
STL, OBJ, PLY

Röntgenbild, Fotos
über JPG, PNG,
BMP, PSD

MRI, CT
über DICOM

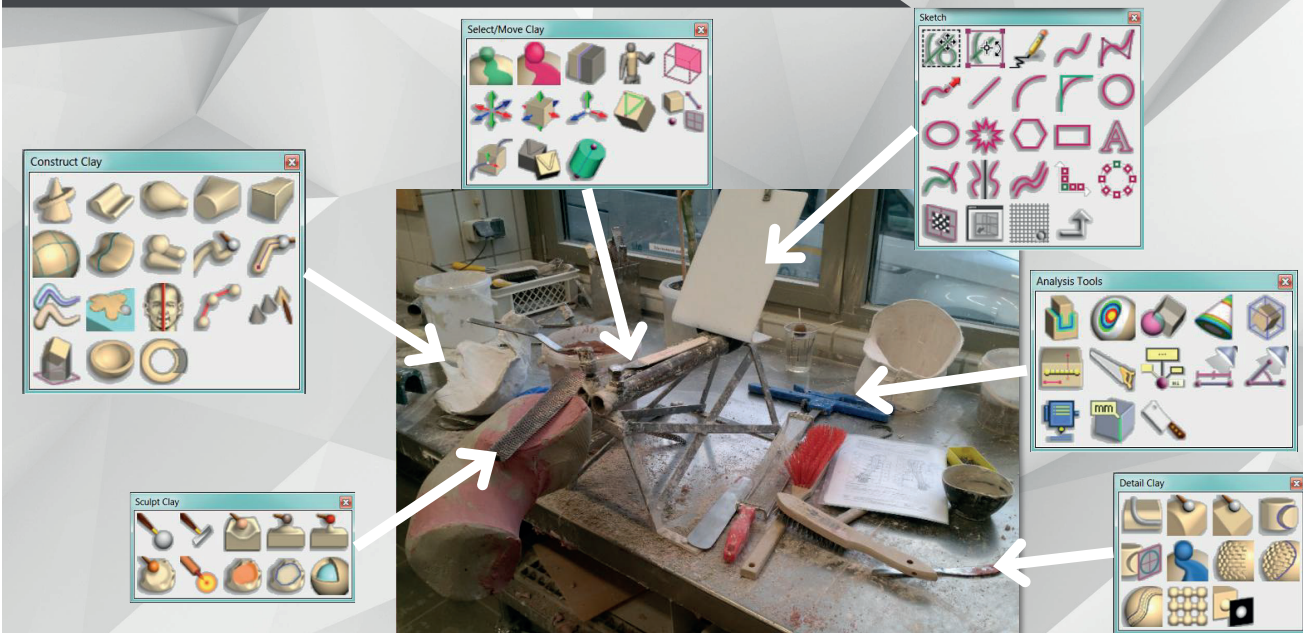
Fertigung über
STL, IGES, STEP,
X_T

(Digitale) Maßblätter
über TXT, PDF, Bild

Technische
Daten über
IGES, STEP,
X_T

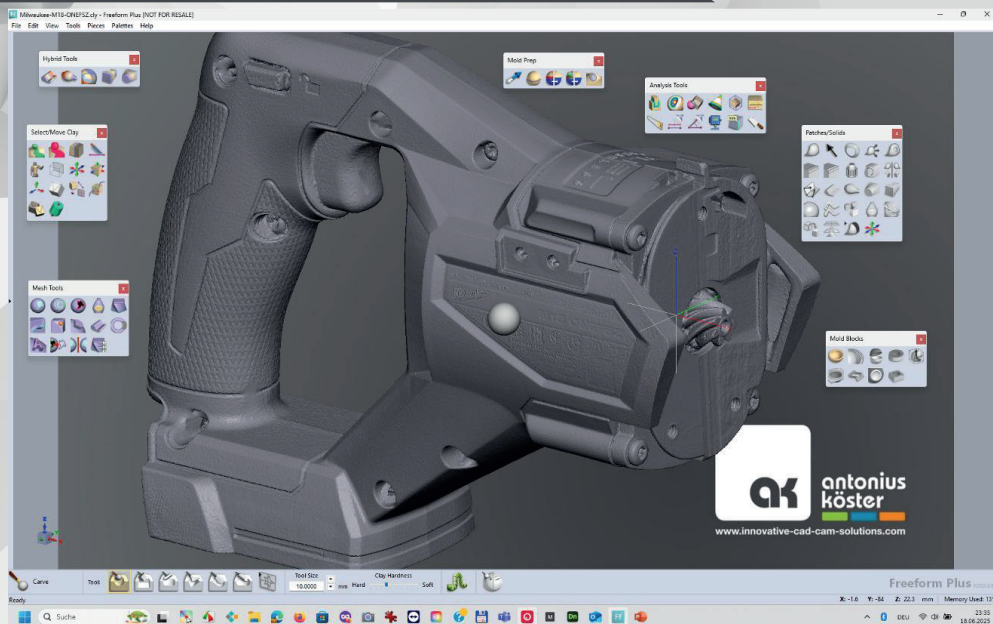
3D-
Kommunikation
über 3D-PDF

DIGITALE WERKSTATT



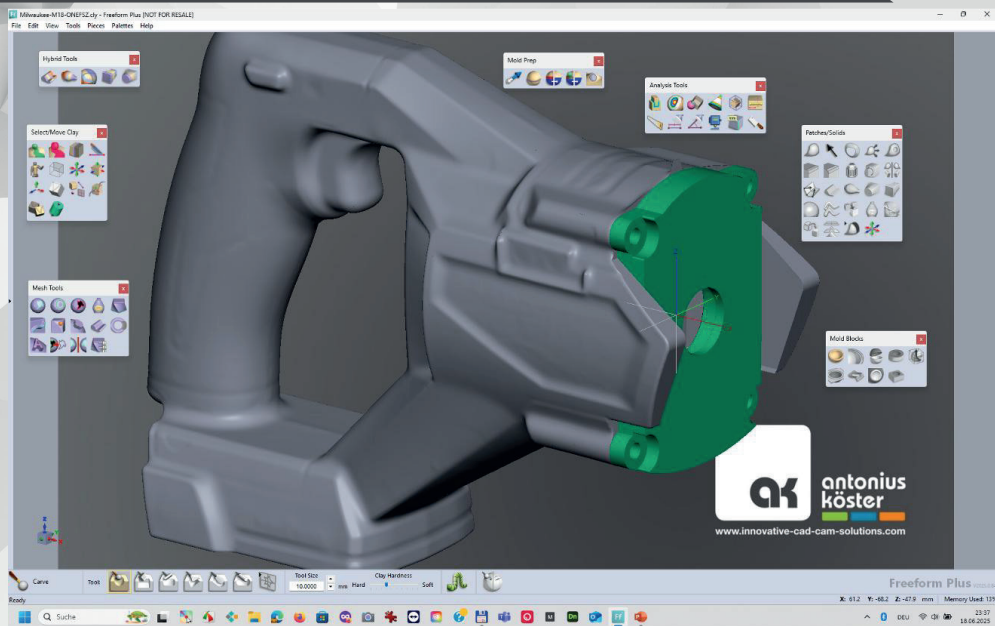
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

SCAN-VERARBEITUNG



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

VEREINFACHUNG / NURBS SOLIDS



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

USE CASE: SCHAFT FÜR EIN BIATHLONGEWehr



- Neuanfertigung eines handgefertigten Gewehrschaftes
- Anpassung von neuen technischen Aluminiumteilen
- Änderung einiger Details
- Herstellbar mit AM (SLS)
- Keine 3D-Daten verfügbar
- Mangel an Zeit (Gesetz)
- Geringes Budget

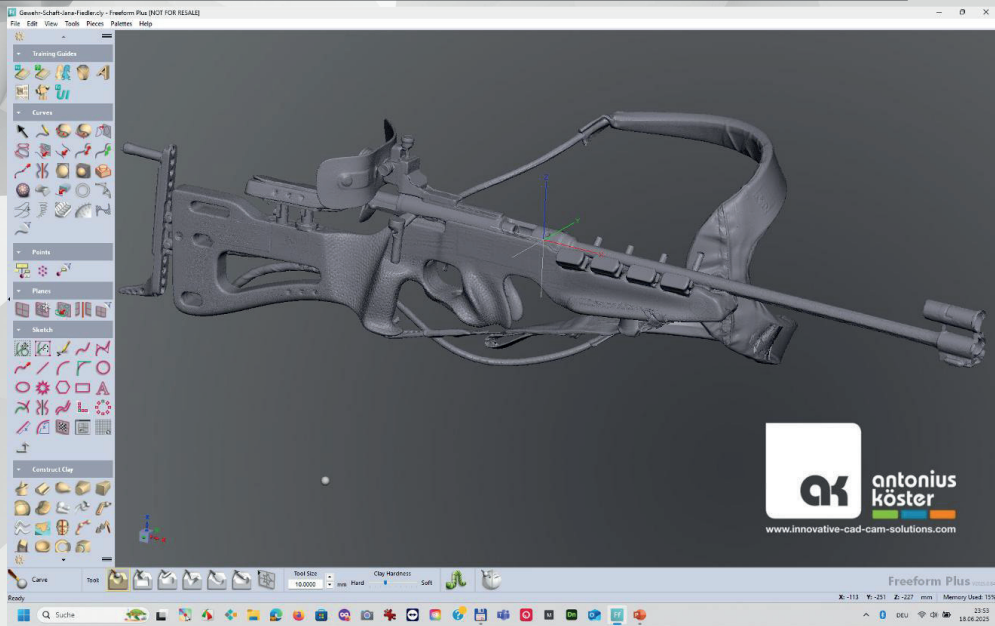


©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG





FREEFORM PLUS - SCAN IMPORT (MESH)



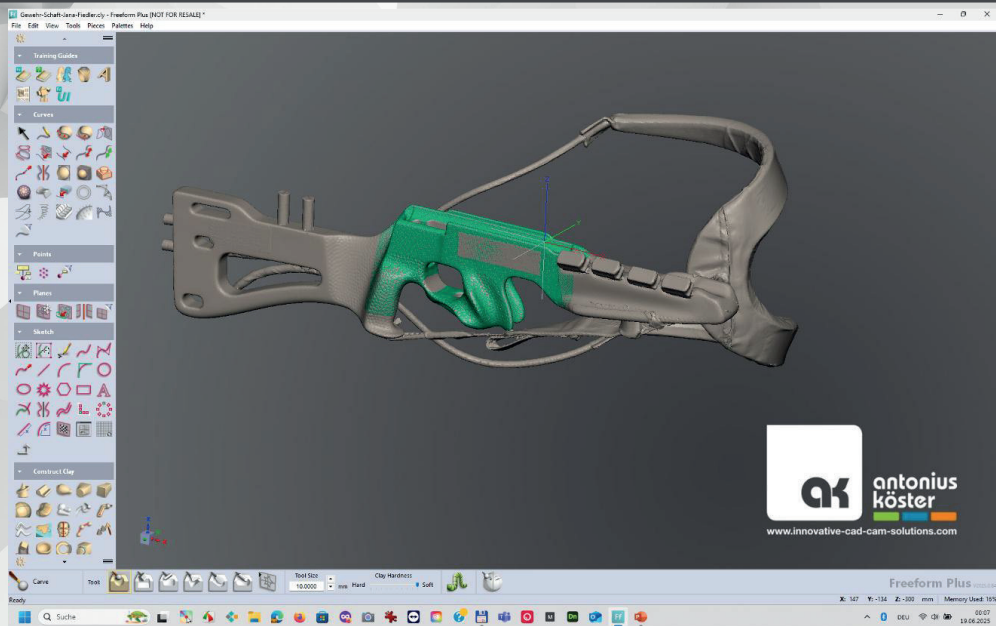
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - SCAN BEREINIGUNG



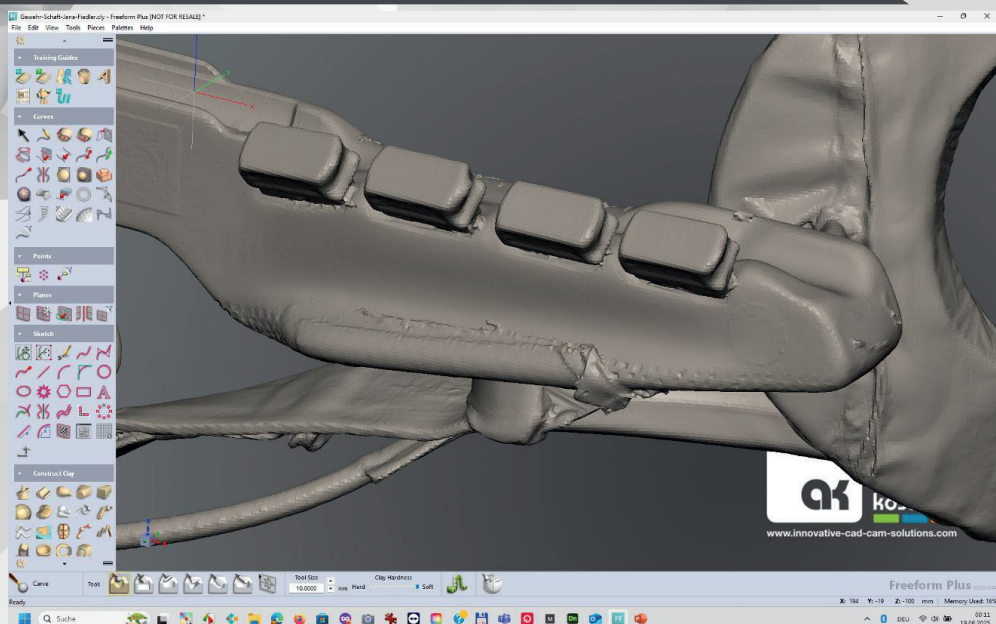
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - CLAY (VOXEL MODELING)



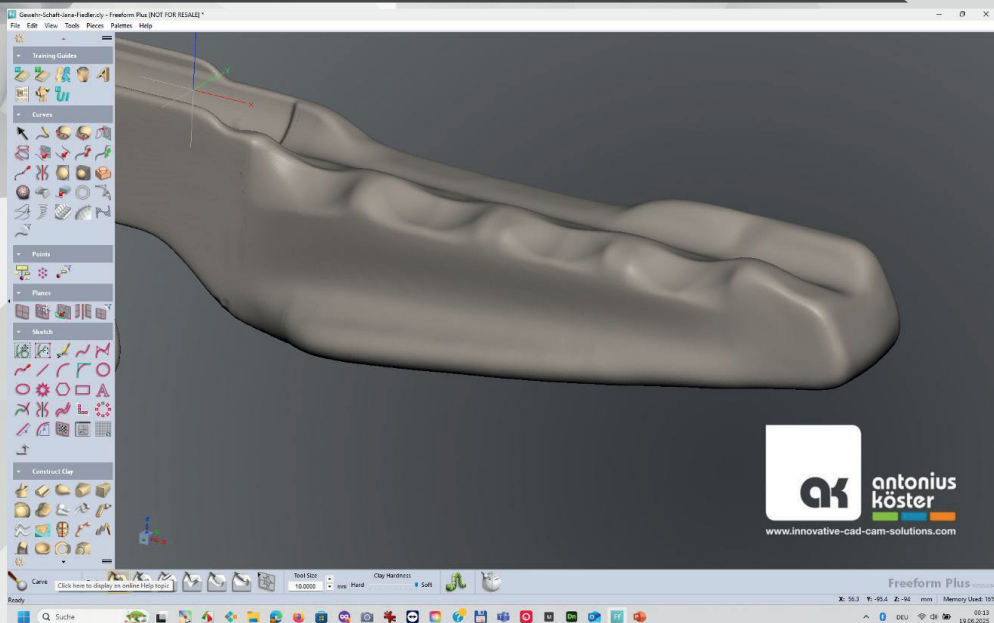
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - UMGESTALTUNG



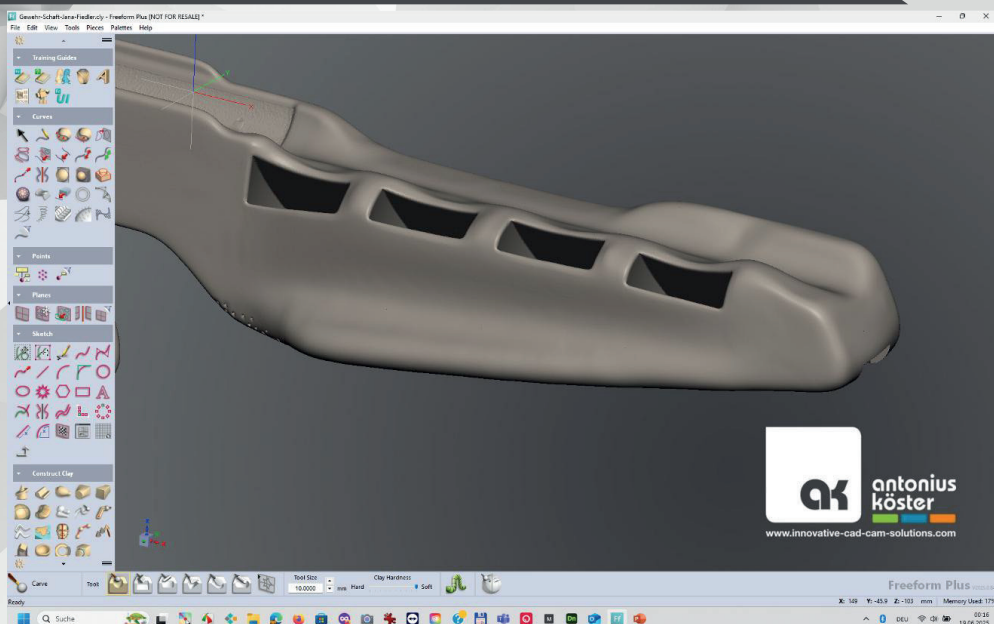
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - GLÄTTUNG



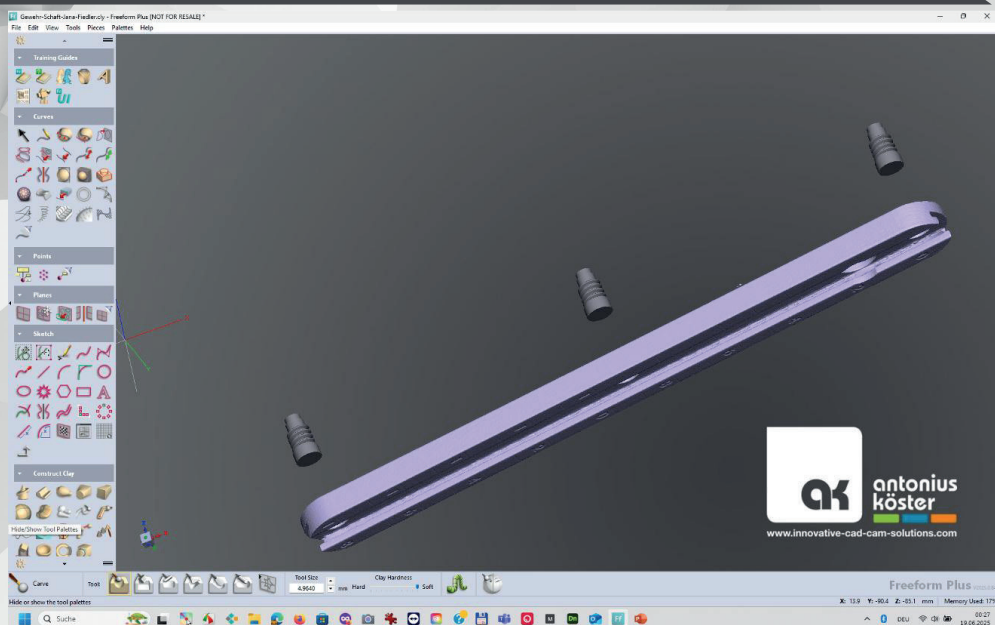
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - BOOLEAN CLAY



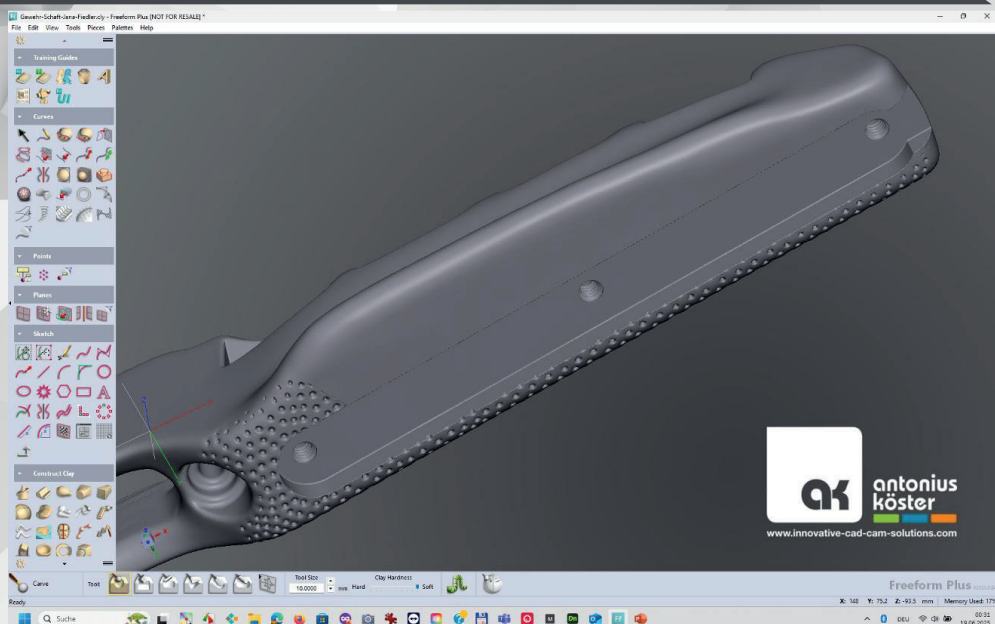
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - BOOLEAN MESH / SOLID



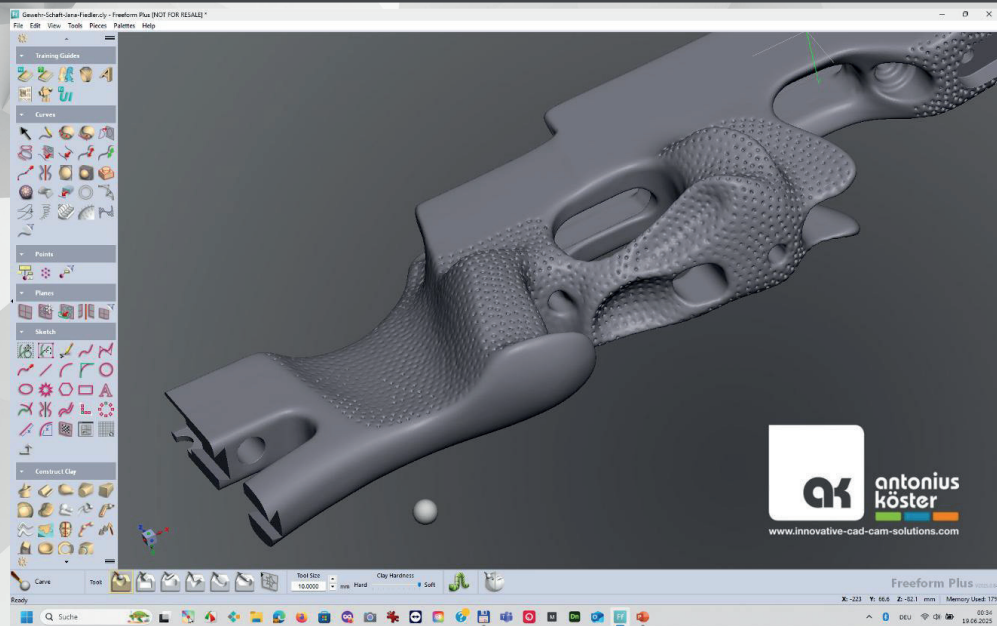
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - BOOLEAN MESH / SOLID



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FREEFORM PLUS - BEIBEHALTUNG DER TEXTUR



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

SLS - FÄRBEN - GLÄTTEN - MONTIEREN



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

FIRST TEST



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

NACHKALKULATION: SCHAFT FÜR EIN BIATHLON-GEWEHR



1 Tag

Scannen



1 Tag

Freeform



2 Tage

Herstellung und
Nachbearbeitung



2 Stunden

Montage

FALL: SCHAFT FÜR EIN BIATHLON-GEWEHR



Nächste Iteration:



- Vertiefung für perfekte Gewichtskontrolle
- Mehr Gewicht für das Training
- Ausbalancieren



- Variationen
- Test-Waffenschäfte
- Individuelle Griffe und Größen

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG



Antonius Köster

Geschäftsführer / Inhaber



+49 0291 13078-900

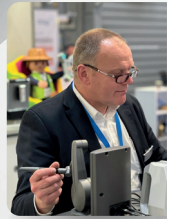
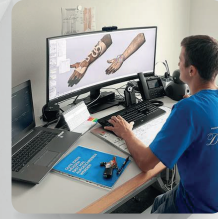


www.innovative-cad-cam-solutions.de



Dünnefeldweg 13, 59872 Meschede

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG



DAS NEUE PUPRINT

an innovative material formulated by SYNTHENE



- » **Formulierung und Produktion von Kunststoffen, im Norden Frankreichs**
- » Innovation & Performance seit 1958
- » Mit Vertretungen in über **30 Ländern**



© SYNTHENE SAS/ 26. November 2015

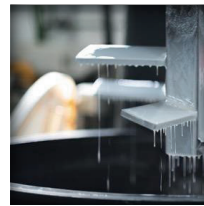
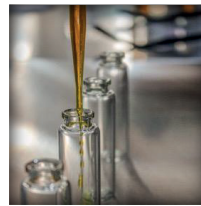
#2 SYNTHENE/ ÜBER UNS



- » Ein **breites Sortiment** mit umfangreichen Materialeigenschaften (mechanisch, chemisch, di-elektrisch, Brandschutz etc.)
- » **SYNTHENE formuliert maßgeschneidert**
- » Materialien für **Ihre Projekte, nach Ihren Anforderungen**



© SYNTHENE SAS/ 26. November 2025



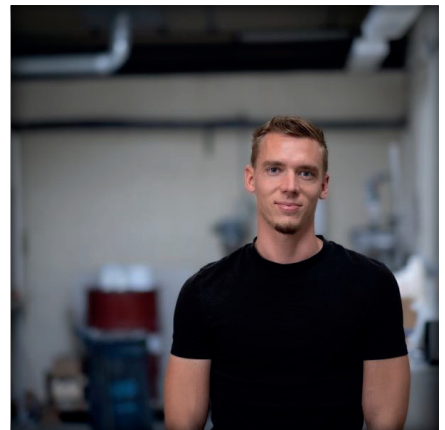
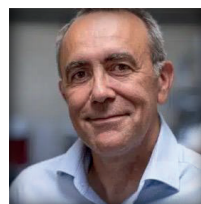
#3 SYNTHENE/ FORMULIERUNG



- » Ein **proaktives 27-köpfiges Team** garantiert Flexibilität und Expertise
- » **Jährliche Produktionskapazität** von 1.000 bis 3.000 Tonnen (PU+PVC)
- » **SYNTHENE** arbeitet ausschließlich mit hochwertigen Rohstoffen von namhaften Herstellern
- » **ISO 9001:2015 Zertifizierung** garantiert unsere strengen **Sicherheits- und Qualitätsstandards**



© SYNTHENE SAS/ 26. November 2025



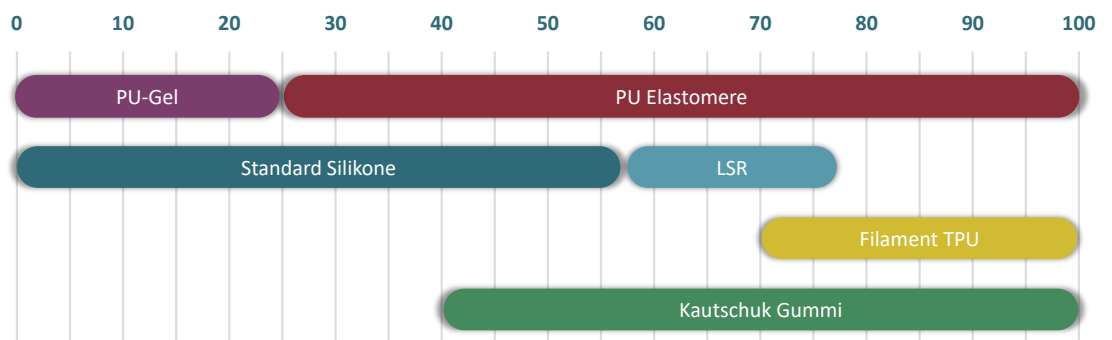
#4 SYNTHENE/ QUALITÄT & FLEXIBILITÄT



PUprint

PU in neuer Dimension

#5 PUPRINT/

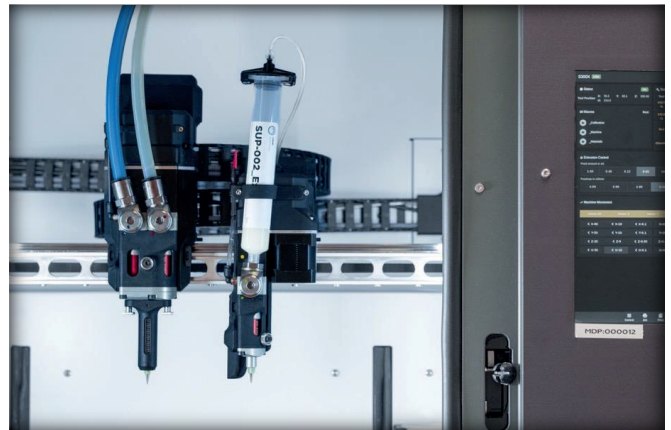


© SYNTHE SAS/ 26. November 2023

#6 PUPRINT/ TYPISCHE HÄRTE VON ELASTOMEREN



- » **Zwei-Komponenten Polyurethan**
Entwickelt für den 3D-Druck von elastischen Teilen mit einer Härte von 74 Shore A (Simulation von Gummi)
- » **Chemische Haftung der Zwischenlagen**
vergleichbar mit einem PU-Abguss, auf Grund chemischer Reaktion zwischen jedem Layer (homogene Baustruktur)
- » **PURE Innovation im 3D Druck**
das erste PU-Duroplast für den 3D-Druck



© SYNTHERIS SAS/ 26. November 2025

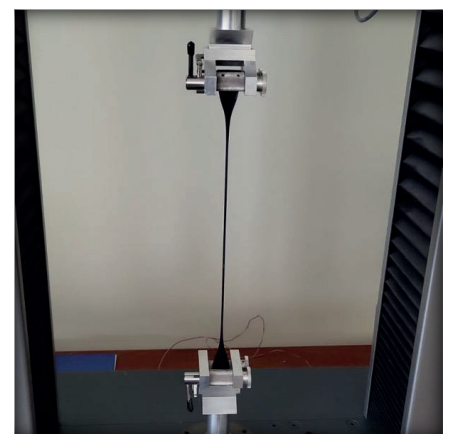


Entwickelt in enger Zusammenarbeit mit Lynxter garantiert optimale Performance.

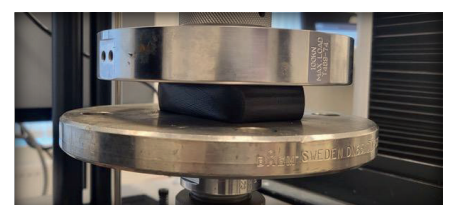
#7 PUPRINT/ ÜBERSICHT



	UNIT	NORM	Werte XY	Werte ZX
Druckachsen			XY	ZX
Härte	Shore A	ISO 868	74	74
Härte bei 80°C	Shore A	ISO 868	65	65
Max. Zugfestigkeit @ 23°C	MPa	ISO 37-1	8	6,3
Bruchdehnung @ 23°C	%	ISO 37-1	900	680
Zugfestigkeit @ 300%	MPa	ISO 37-1	4,4	4,30
Reißfestigkeit	kN/m	ISO 34-1	43	33
Rebound	%	ISO 4662	47	N/A
Kompression set DRC @23 °C ≈ 10 %			≈ 10 %	
Kompression set DRC @70 °C			≈ 50 %	



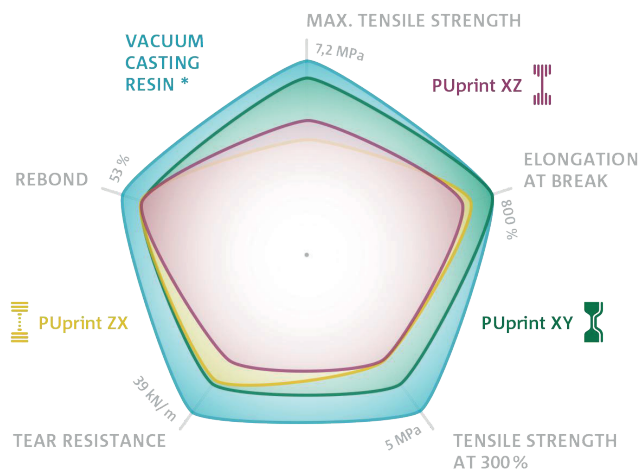
© SYNTHERIS SAS/ 26. November 2025



#8 PUPRINT/ TECHNISCHE DATEN PUPRINT



- » Herstellung von Bauteilen, ohne aufwendigen Formenbau **reduziert Arbeitszeit und Produktionskosten**
- » **Freiheit in Design und Herstellung von Bauteilen** erlaubt die Entwicklung von komplexen, Kunden-spezifischen Teilen
- » Formuliert, um **höchsten industriellen Anforderungen** gerecht zu werden
- » Die mechanischen Eigenschaften, sind **vergleichbar mit einem gegossenen PU-Elastomer**



#9 PUPRINT/ VORTEILE



AUTOMOTIVE

- » Faltenbälge und Schläuche
- » Kantenschutz
- » Dichtungen



ROBOTIK UND TECHNISCHE TEILE

- » Bänder
- » Sandstrahlschablone
- » Montagehilfen
- » Schalldämmung



VERTEIDIGUNG

- » Stoßfänger für Militärfahrzeuge
- » Flexible Stecker
- » Bauteile für Drohnen



OFFSHORE

- » Dichtringe
- » Biegebegrenzung
- » Kabelführung / Kableverbinder

#10 PUPRINT/ ANWENDUNGSBEISPIELE





© SYNTHENE SAS/ 26. November 2025

#11 PUPRINT/ MUSTER



- » LYNXTER S300x mit einem **Bauraum von 300 x 250 x 200 mm (X/ Y/ Z)**
- » Mit **50 µm bis 1 mm Schichtdicke** sowohl für detailreiche als auch für große Objekte geeignet
- » **schnell** Dank einer maximalen Geschwindigkeit des Druckkopfs von 500 mm/s (X/ Y) bzw. 40 mm/s (Z)
- » Druck mit **einem oder zwei Druckköpfen**



© SYNTHENE SAS/ 26. November 2025

#12 PUPRINT/ 3D DRUCKER LYNXTER



**Haben Sie noch Fragen?
Kontaktieren Sie mich einfach!**

Ich und das gesamte SYNTHENE-Team
geben Ihnen gerne weitere Auskünfte!

Andreas Eiden-Bell
+49 151 23 32 52 60
aen@synthene.com



© SYNTHENE SAS / 26. November 2025



#13 SYNTHENE/ KONTAKT



3D-Druck in der Praxis

Chancen, Grenzen und Erkenntnisse aus dem Mittelstand

Agenda

- Vorstellung / Perspektive
- Chancen des 3D-Drucks im Mittelstand
- Grenzen & Herausforderungen
- Erkenntnisse aus der Praxis
- Ausblick & Potenziale

Vorstellung / Perspektive

Vorstellung



- Marcus Geßner
- Maschinenbau
- Dozent für Weiterbildungen
- Projektingenieur



- 3D-Druck-Service Dienstleister
- Mittelständisches Unternehmen
- 35 Mitarbeitende
- ca. 7 Mio. € Umsatz p/a
- Zielgruppe: mittelständische Unternehmen, auch B2C
- Forschungsaktivitäten



- FDM
- SLA / DLP / Polyjet
- MJF / SLS
- SLM
- Strahlen, Glätten (chem. oder mech.), Färben,

Fokus auf Wirtschaftlichkeit, Umsetzbarkeit und Kundennutzen

Chancen des 3D-Drucks im Mittelstand

Chancen für unsere Kunden

Was unsere Kunden an 3D-Druck schätzen

Kürzere Entwicklungszyklen durch kurze Lieferzeiten: Besonders für Start-ups oder innovative Mittelständler wichtig oder Sondermaschinenbau



Kosten der Bauteile
Werkzeuglose Fertigung: geringe
Rüstkosten/Mindestbestellwert



Image für Unternehmen, Technologie-/
Nachhaltigkeitsaspekte nutzen für Außendarstellung



Print-on-Demand / digitales Lager



notwendige Kernkompetenzen

persönliche Beratung

Technologieübergreifende Perspektive (innerhalb 3D-
Druck als auch angrenzende Fertigungsverfahren)

Kunden werden begleitet in der Produktentwicklung:
Idee -> Prototyp -> Überführung in Serienproduktion



Full-Service

Grenzen & Herausforderungen

Herausforderungen - Kundenseitig



Kundenwissen & Erwartungen → „Mythen und Missverständnisse“

- Veraltetes oder fehlendes Wissen über Verfahren und Materialien -> Vorurteile
- Fokus auf FDM, kaum Bewusstsein für Alternativen
 - Unrealistische Erwartungen: sofortige Verfügbarkeit, Hochglanz-Oberflächen, extrem niedrige Preise



Design & Fertigung → „Design entscheidet über Erfolg“

- Konstruktionsrichtlinien werden nicht berücksichtigt
- Substitution der Fertigungstechnologie statt AM-gerechtem Design → Potenziale nicht ausgeschöpft
- Toleranzen oft problematisch, Nacharbeit aufwendig (Koordination mit ext. Partnern)



Herausforderungen - technologisch



Prozessqualität & Zuverlässigkeit → „Zwischen Theorie und Realität“

- Maschinenzuverlässigkeit: Ausfälle, Wartungsaufwand
- Neue Maschinen und Anlagen teils nicht nach Spezifikation („Erprobung beim Kunden“)
- Automatisierung in der Prozesskette schwierig (Geometrievielfalt)
- Trotz standardisierter Prozesse: Schwankende Qualitäten
- Nach Probedruck: Wiederholbarkeit sehr gut - > iterativer Prozess

Rahmenbedingungen → „Strukturen hinken hinterher“

- Regulatorik: 3D-Druck als Fertigungstechnologie oft noch nicht betrachtet, keine Regelungen
- Arbeitssicherheit & Gefahrenstoffe: wenig Studien, Hersteller arbeiten meist nur gesetzeskonform (selbst Berufsgenossenschaft: kaum Know-how zu AM)
- Fachkräfteproblem: kein Ausbildungsberuf, alles Learning by Doing
- Bestellprozesse bei Kunden unflexibel: Materialvorgaben oft nicht veränderbar (-> ABS (FDM) statt PA (SLS))

Erkenntnisse aus der Praxis

Erkenntnisse aus der Praxis

Die Praxis zeigt:

Transparente Beratung und realistische Erwartungssteuerung schaffen langfristige Partnerschaften.
Wissen und Erfahrung beim Kunden sind entscheidend.

3D-Drucker sind oft schon bei Kunden vorhanden (allerdings fast ausschließlich FDM)
-> Gut und schlecht

Mittelständler profitieren von Flexibilität und zuverlässigen Partnerschaften.
Der Preis entscheidet (zu oft?) über die Fertigungstechnologie

Forschung liefert Impulse, die in der Praxis angepasst werden müssen
-> Zusammenarbeit mit Maschinenherstellern

Additive Fertigung entfaltet ihre Stärke am besten in Kombination mit klassischen Verfahren.



Ausblick & Diskussionsimpulse

Ausblick & Potenziale

- Wissen über additive Fertigung ausbauen bei Kunden/Anwendern
- Druckvorbereitung: Kombination mit KI
- Hybridfertigung: 3D-Druck + CNC-Nachbearbeitung
/Automatisierung in der Nachbearbeitung
- Materialien: Temperaturbeständigkeit
- Verbesserung: Maßhaltigkeit, Oberflächengüten
- Vorhersagbarkeit von Druckerfolg oder Misserfolg ->
Prozesssimulation (teils noch zu viel trial&error)



Fragen / Diskussion



- Welche Fragen sind offengeblieben?
- Gibt es Erfahrungen, die Sie teilen möchten?








Vielen Dank für Ihr Interesse!



LAYERS & LIGHTS®
3D PRINTED INTERIOR

GLÄSERNE **3D** FABRIK
by Rapidobject®

Marcus Geßner
0341 23 18 37 25
marcus.gessner@rapidobject.com
Rapidobject GmbH, Weißenfelser Str. 84
04229 Leipzig

 www.rapidobject.com
 www.linkedin.com/company/rapidobject-gmbh
 www.xing.com/companies/rapidobjectgmbh
 www.youtube.com/rapidobject
 www.facebook.com/Rapidobject



BACKUP

Innovative Polymer-AM: Von Hochleistung bis Mikropräzision



HOCHSCHULE
COBURG | TTZ OBERFRANKEN
Digitale Intelligenz in Lichtenfels

Optimierung der Materialeigenschaften für 3D gedruckte polymere Spritzgusswerkzeuge

Valentin Wiesner,

Markus Stark, Alexander Rost, Marcel Trier, Kai Graß

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



FADZ
Zweckverband
Stadt und Landkreis Lichtenfels



HOCHSCHULE
COBURG | TTZ OBERFRANKEN
Digitale Intelligenz in Lichtenfels



Automatisierung



Neue Werkstoffe und
Produktionsverfahren



KI für Engineering und
Produktion



Motivation - Spritzguss

Stand der Technik

- Metallische Werkzeuge
 - Lange Lieferzeiten
 - Hohe Kosten
- Polymere Werkzeuge
 - Prototypen im finalen Werkstoff
 - Kleine Stückzahlen

Herausforderung bei:

- Hohe Zugfestigkeit und Wärmeformbeständigkeit häufig mit sprödem Materialverhalten verbunden
- Marktverfügbarkeit

Möglicher Lösungsansatz:

Einstellung der Eigenschaften durch Mischung verschiedener 3D-Druck-Harzen

3



Zielsetzung

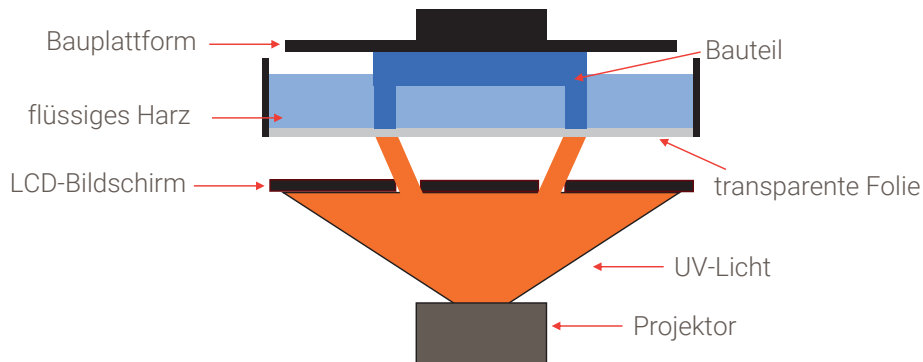
- Untersuchung der Prozessstabilität des Druckers
- Qualifizierung verschiedener Mischverhältnisse
- Gezielte Einstellung von Materialeigenschaften
- Untersuchung in der Spritzgussanwendung

4

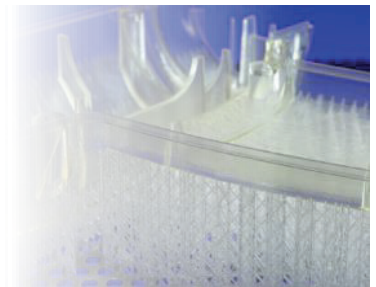


Technologievorstellung - Verfahren

Masked Stereolithografie (MSLA/LCD)



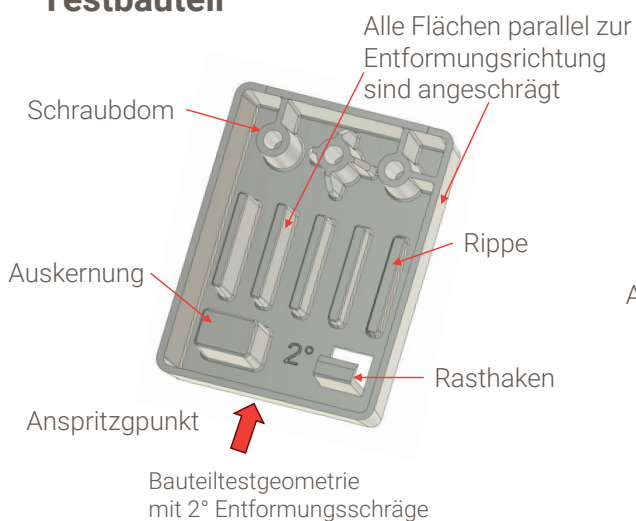
schematische Darstellung des MSLA-Verfahrens



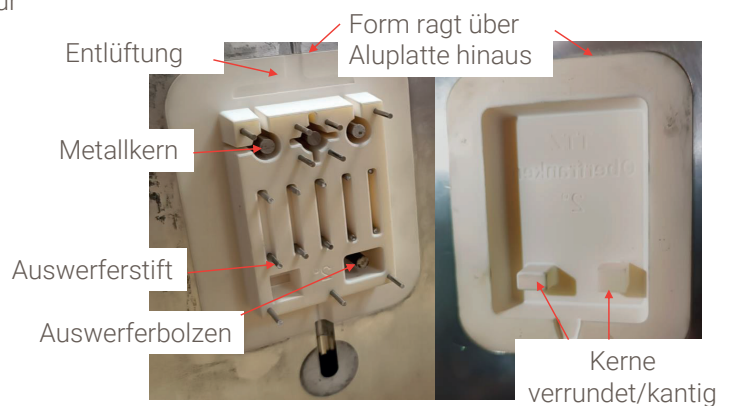
5

Technologievorstellung - Testgeometrie

Testbauteil



Werkzeugeinsatz



Werkzeugeinsatz aus 100% BASF RG 3280 mit dem Kern (links) und der Matrice (rechts)

6

Versuchsaufbau - Harzqualifizierung

Untersuchte Harze

Material	Materialkennwerte					Druck- und Nachbearbeitungsparameter				
	Zugfestigkeit in N/mm ²	Zug-E-Modul in N/mm ²	Bruchdehnung in %	HDT in °C @ 0,45 MPa	Dichte in g/cm ³	Schichtdicke in µm	Belichtungszeit in sec	Waschzeit in min	Nachbelichtungszeit in min	Tempern @ 150°C in min (ohne Rampe)
Basismaterial: BASF RG 3280	70	10300	0,7	>280	1,65	50	1	1	60	180
Anycubic ABS like Pro2	35-45	1600 - 1800	35- 40	n. a.	1,05 - 1,25	50	2,5	1	60	0
Loctite IND 147	67	3190	2,4	235 - 291	1,26	50	8	1	60	180

[1,2,3]



100% BASF RG 3280



20% Anycubic ABS like Pro 2



30% Loctite IND 147

7

Versuchsaufbau - Druckprozessqualifizierung

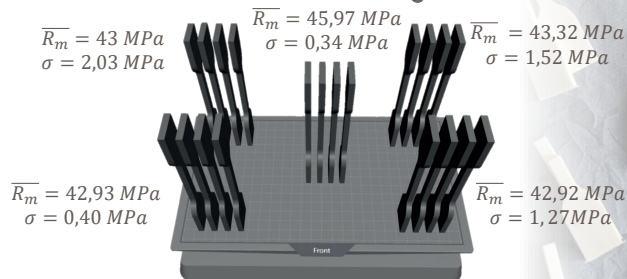
Qualifizierung MSLA-Drucker: ELEGOO Saturn 4 Ultra 16K

Schritt 1: UV-Messungen

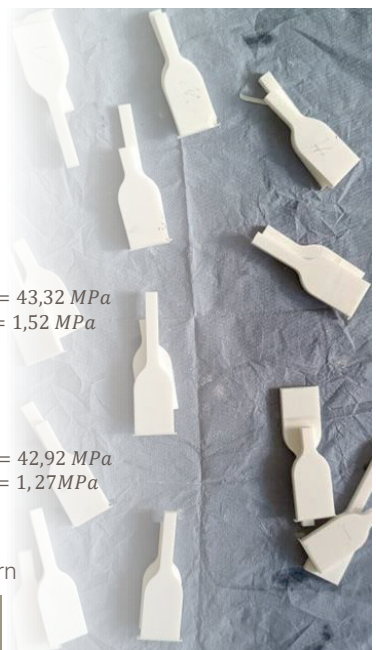
Druckbauplatte		
3,09	3,39	3,12
2,91	3,35	3,05
3,25	3,59	3,22
Front		

UV-Intensität in mW/cm²
Projektoransicht Top-Down

Schritt 2: Validierungsdruck



BASF ohne Nachbelichtung und Tempern



Zugproben nach ASTM D638

Ergebnis: weitere Versuche in den vorderen Ecken da hier gleiche Prozessbedingungen

8

Versuchsaufbau - Parametervariation

Volumenabhängiges Mischverhältnis

	Mischverhältnis in Vol.-%	Belichtungszeit in sec
BASF RG 3280	100	1
Anycubic ABS like Pro2	10 / 90	1,15
	20 / 80	1,3
	30 / 70	1,45
Loctite IND 147	10 / 90	1,7
	20 / 80	2,4
	30 / 70	3,1

Belichtungszeit t_{gemisch}

Volumenabhängige Berechnung:

Bspw.: 20 % Anycubic / (100 - 20) % BASF

$$t_{\text{gemisch}} = 0.2t_{\text{Any}} + (1 - 0.2)t_{\text{BASF}}$$

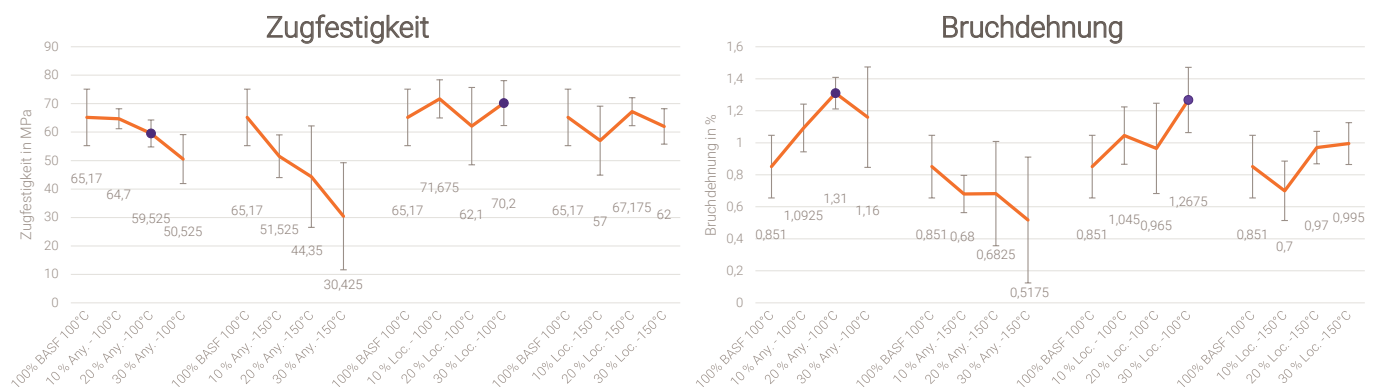


Zugproben nach ASTM D638

9

Ergebnisse - Materialeigenschaften

Zugversuche



● Ausgewähltes Mischverhältnis

10

Versuchsaufbau - Spritzgusswerkzeuge

Spritzgussparameter

Harzmischung	100% BASF	20% Anycubic	30% Loctite
Spritzgussmaterial	PP		
Temp. der Schmelze in °C	200		
Schließkraft in kN	250		
Nachdruck in bar (spez.)	32	32	40
Nachdruckzeit in sec	30		
Zykluszeit im Werkzeug in sec	180	180	150
Schuss 1-80 Kühlzeit @ 50°C offenes Werkzeug in sec	170	140	180
Schuss 81-160 Kühlzeit @ 80°C offenes Werkzeug in sec	20	40	60

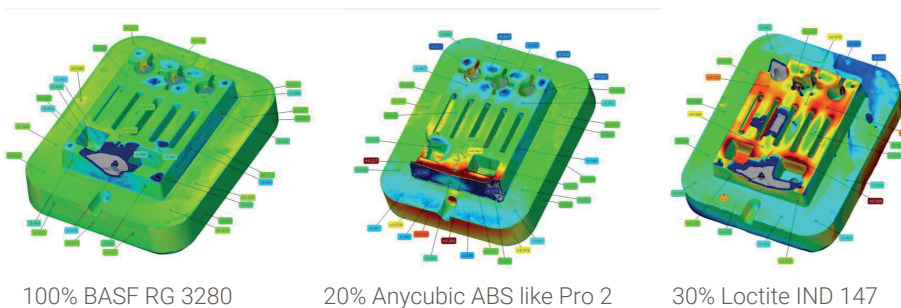


Spritzgussmaschine
ergotech 25/280-120system

11

Ergebnisse - Spritzgussversuche

Vergleich Werkzeughälfte 180 Zyklen



Ergebnis: Das Harzgemisch mit 20% Anycubic weist an der Einspritzseite geringste Beschädigungen



12

Ergebnisse - Spritzgussversuche

3D Scans – Vergleich Matrizen nach 180 Zyklen



100% BASF RG 3280



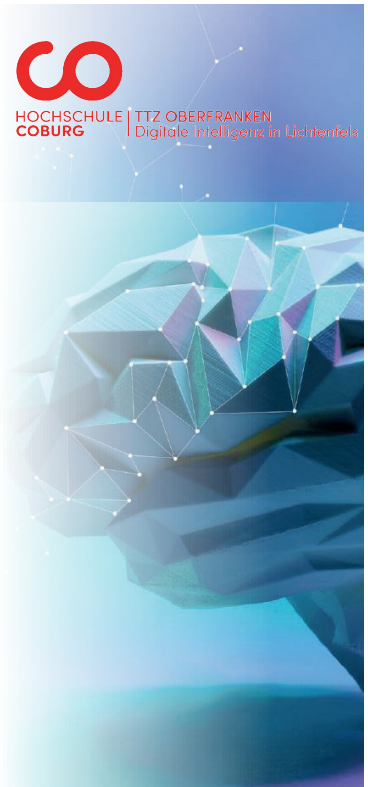
20% Anycubic ABS like Pro 2



30% Loctite IND 147

Ergebnis: Bei geringerer Zugfestigkeit aber höchster Bruchdehnung weist das 20% Anycubic Gemisch keinen Kernausschlag auf

13



Zusammenfassung

- Das Material BASF RG 3280 weist eine niedrige Bruchdehnung und damit sprödes Materialverhalten auf
- Dadurch entstehen Herausforderungen beim Handling, der mechanischen Vorbereitung und im Spritzgussprozess
- Durch Mischung mit kompatiblen Harzsystemen können die Materialeigenschaften für die Spritzgussanwendung verbessert werden
- Auch kostengünstige Harze eignen sich als Mischkomponenten
- Die Beimischung von 20% Anycubic ABS like Pro 2 zu BASF RG 3280 zeigte die höchste Bruchdehnung und den geringsten Anteil von Ausbrüchen im Spritzgussversuch

14



Herzlichen Dank

15

Quellen

- 1: 3Dimensionals, (o.D.), „Forward AM Ultracur3D RG 3280 Resin ceramic filled (BASF)“, [Online], Verfügbar unter: https://www.3dimensionals.de/basf-ultracur3d-rg-3280-resin-ceramic-filled-3317#attribute_values=17,2440,1569,1093,1040,1186,2454,2562, [Zugriff am 06.10.2025]
- 2: Anycubic-DE, (o.D.), „ABS-Like Resin Pro 2“, [Online], Verfügbar unter: <https://de.anycubic.com/products/abs-like-resin-pro-2>, [Zugriff am 06.10.2025]
- 3: Henkel Corporation, (o.D.), „Loctite 3D IND147“, [Online], Verfügbar unter: <https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/Loctite-3D-IND147>, [Zugriff am 06.10.2025]

16



Experimentelle und numerische Analyse von UD-Tape-verstärktem Polycarbonat-FLM-Druck

Dr.-Ing. Hagen Bankwitz



hs-mittweida.de

Agenda

1. Einleitung und Motivation
2. Lösungsansatz und Forschungsziel
3. Methodik und Versuchsaufbau
4. Ergebnisse
5. Diskussion und Ausblick

Potenziale und Grenzen von FLM

Potenziale:

- Werkzeuglose, flexible Fertigung komplexer Geometrien
- Schnelle Umsetzung digitaler Modelle in Bauteile
- Geringe Kosten (Material / Drucker)
- Kosteneffizient für Prototyping und Kleinserien

Grenzen:

- Relativ hohe Fertigungstoleranzen / geringe Auflösung
- Oberflächenqualität
- Druckgeschwindigkeit
- Mechanische Eigenschaften < konventionelle Verfahren
- Anisotropes mechanisches Verhalten (Z-Richtung schwach)

Das Problem: Anisotropie

Anisotropie

- Schichtweiser Aufbau → Richtungsabhängige Eigenschaften
- X/Y-Richtung stärker, Z-Richtung (Richtung des Schichtaufbaus) deutlich schwächer



Das Problem: Anisotropie

Anisotropie

- Schichtweiser Aufbau → Richtungsabhängige Eigenschaften
- X/Y-Richtung stärker, Z-Richtung (Richtung des Schichtaufbaus) deutlich schwächer



Typische Materialien für FLM	E-Modul [MPa] (X-Y)/Z	Zugfestigkeit [MPa] (X-Y)/Z	Quelle
PLA	1882/1869	20,9/18,0	[1]
PETG	1810/1540	34/23	[2]
ASA	2379/???	43,8/27,4	[3]
ABS	2200/1960	33/28	[4]
PA6/PA 6.6 (Luftfeucht)	1053/702	36,4/31,4	[5]
PC	2307/2260	62,7/41,9	[6]

Lösungsansatz: Verstärkung mittels UD-Tapes an der Oberfläche

Prinzip:

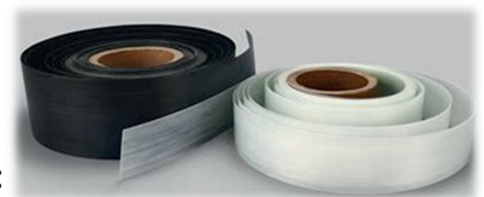
- Integration von Endlosfasern an die Oberfläche der FLM-Struktur nach dem Druck
- Fasern übernehmen Großteil der Last

Thermoplastische UD-Tapes (Unidirektionale Tapes):

- Endlos Fasern in thermoplastischer Matrix
- Lastpfadorientierte Platzierung nachträglich möglich
- Hohe Steifigkeit und Festigkeit in Faserrichtung

Erwarteter Nutzen:

- Kompensation anisotroper Schwächen
- Signifikante Verbesserung der Zug- und Biegefestigkeit/-steifigkeit



[7]

Ziele der Untersuchung

- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von FLM-Polycarbonat-Bauteilen durch UD-Tape-Verstärkung

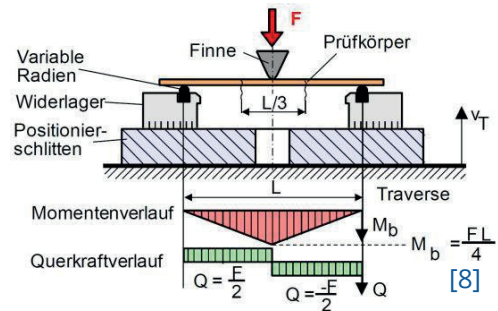
Teilziele:

- Experimentelle Untersuchung

Zugversuch



3-Pkt.-Biegeversuche



- Entwicklung numerischer FEM-Modelle mit orthotropen Materialgesetzen und Hashin-Versagenskriterium

Untersuchte Werkstoffe

Matrixmaterial: Polycarbonat (PC)

- Amorpher Thermoplast
- Hohe Festigkeit

Verstärkung: CF-PC UD-Tapes

- Endlos Carbonfasern in PC-Matrix
- Faservolumengehalt: 45%
- Dicke 0,12 mm

Mechanische Kennwerte:

- PC (FLM): $E \approx 2300 \text{ MPa}$, Zugfestigkeit $\approx 63 \text{ MPa} / 42 \text{ MPa}$
- UD-Tape (CF-PC): $E_1 \approx 111.000 \text{ MPa}$, Zugfestigkeit $\approx 1560 \text{ MPa}$

Probenherstellung und -orientierung

Herstellung:

- FLM-Druck mit PC-Filament
- Parameter: Düsendurchmesser: 0,4 mm, Drucktemperatur 270 °C, Schichthöhe 0,08 mm
- UD-Tapes manuell appliziert & thermisch angebunden

Probenvarianten:

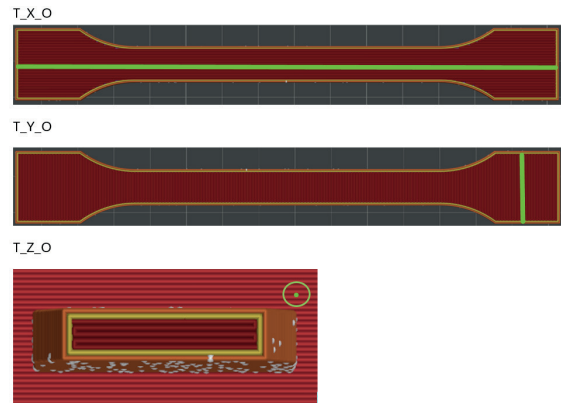
- Unverstärkt (nur PC)
- Verstärkt (PC + UD-Tape an Oberfläche)

Orientierungen:

- X-Richtung (parallel zur Druckrichtung)
- Y-Richtung (quer zur Druckrichtung)
- Z-Richtung (senkrecht zur Schichtebene)

Gesamt:

- 6 Probentypen (3 Orientierungen × mit/ohne Tape)
- Getestet im Zug- und Biegeversuch



Numerische Model (FEM)

Software & Modul:

- ANSYS Workbench – Composite PrepPost (ACP)

Materialmodellierung:

- Orthotrope Materialgesetze für PC & UD-Tape
- →Abbildung anisotroper Eigenschaften

Geometriemodell & Vernetzung:

- Probenabmessungen gemäß Normprüfkörper / DIN EN ISO 527-2 (Zugversuch, Typ 1A) sowie DIN EN ISO 178 (3-Punkt-Biegeversuch)
- Hexaeder-Elemente SOLID186, verfeinertes Netz im Tape-Bereich
- Ideale Haftung Tape–Matrix angenommen

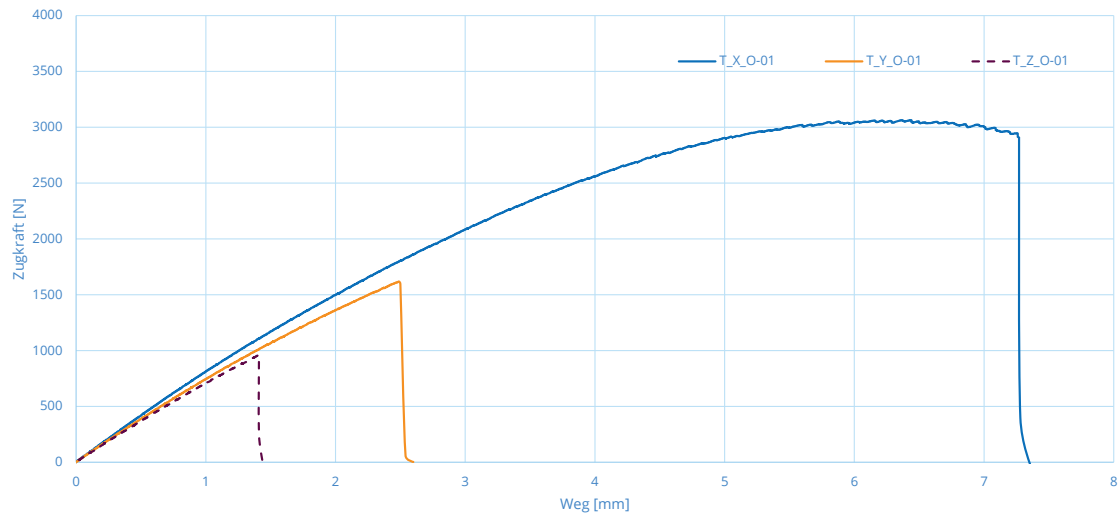
Randbedingungen:

- Zugversuch: Fixierung + axiale Kraft
- Biegeversuch: 3-Punkt-Auflager, zentrale Belastung

Versagensmodell:

- Hashin-Kriterium: Faserbruch, Matrixversagen, Schubversagen

Ergebnisse Zugversuch

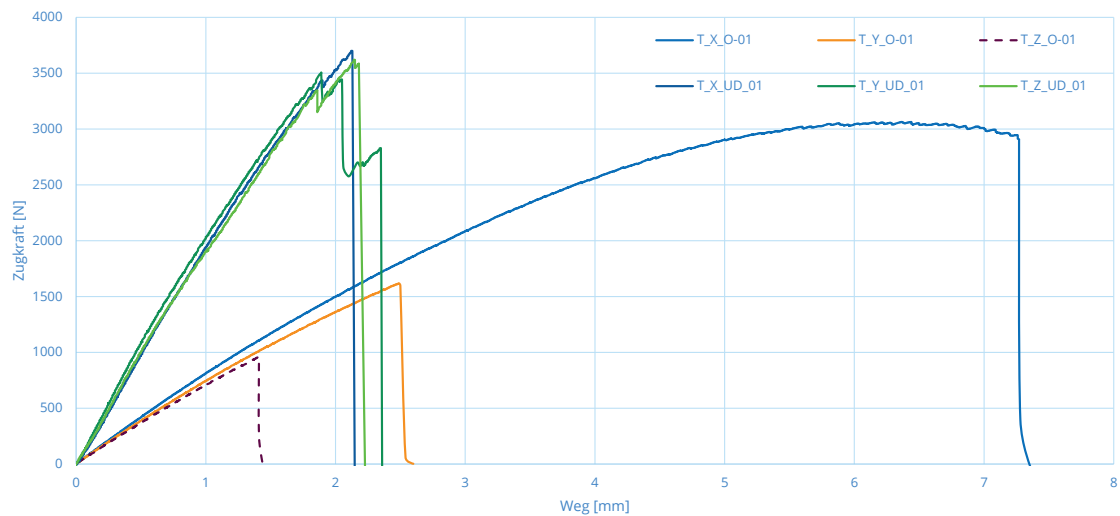


11 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Ergebnisse Zugversuch



12 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

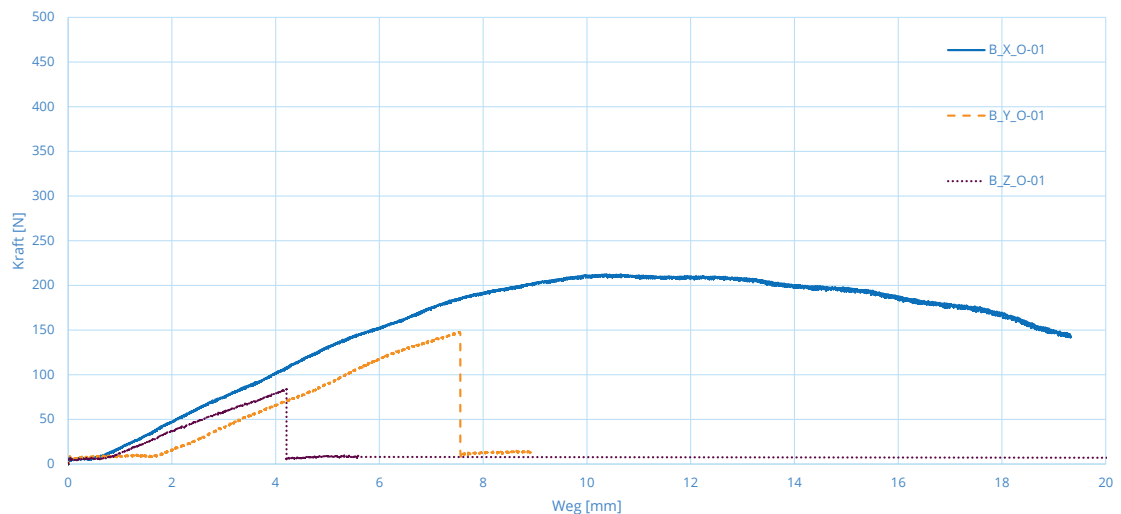
Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



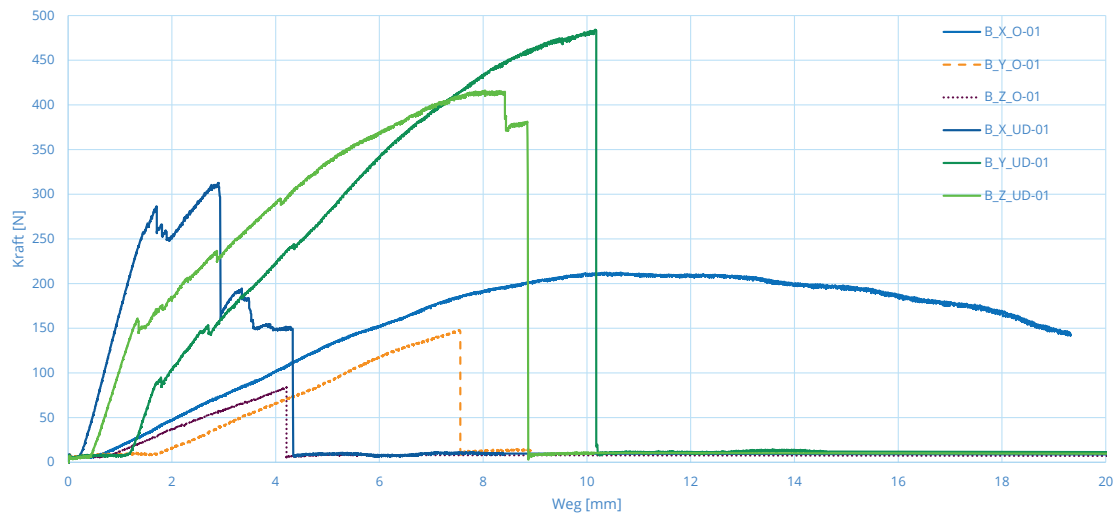
Ergebnisse Zugversuch: Mechanische Kennwerte

Probenart	(mittlerer) E-Modul [MPa]	(mittlerer) Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
T_X_O	2082±23	76,9±0,3	7,80±0,34
T_Y_O	1966±33	43,0±5,0	3,07±0,43
T_Z_O	1756±36	22,0±4,7	1,71±0,23
T_X_UD	5550±240	87,2±5,7	3,02±0,42
T_Y_UD	6018±221	78,6±4,3	2,56±0,22
T_Z_UD	5648±249	82,7±6,5	2,80±0,25

Ergebnisse 3-Punkt-Biegeversuch



Ergebnisse 3-Punkt-Biegeversuch



15 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Ergebnisse 3-Punkt-Biegeversuch: Mechanische Kennwerte

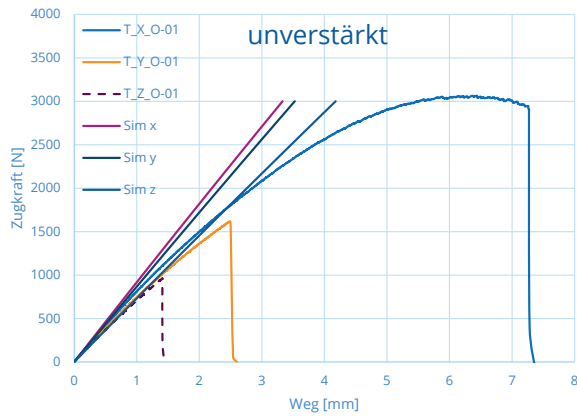
Probenart	Mittlere Biegefestigkeit [MPa]	Max. Durchbiegung [mm]
B_X_O	125,6 ± 2,0	4x kein Bruch / 18,3
B_Y_O	104,8 ± 13,8	1x kein Bruch / 10,3 ± 4,1
B_Z_O	50,0 ± 3,1	4,1 ± 0,2
B_X_UD	164,2 ± 52,3	6,2 ± 1,6
B_Y_UD	221,7 ± 43,70	8,9 ± 2,4
B_Z_UD	204,4 ± 6,5	9,0 ± 1,1

16 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Vergleich Simulation und Experiment: Zugversuch



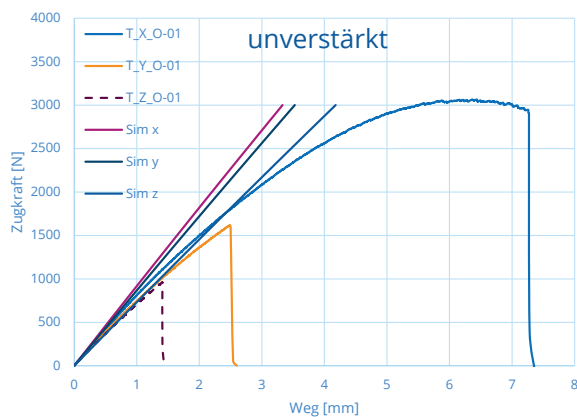
Eigenschaft	Simulation/ Datenblatt	Messungen
Zugfestigkeit x [MPa]	62,7	76,9±0,3
Zugfestigkeit y [MPa]	62,7	43,0±5,0
Zugfestigkeit z [MPa]	41,9	22,0±4,7

17 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

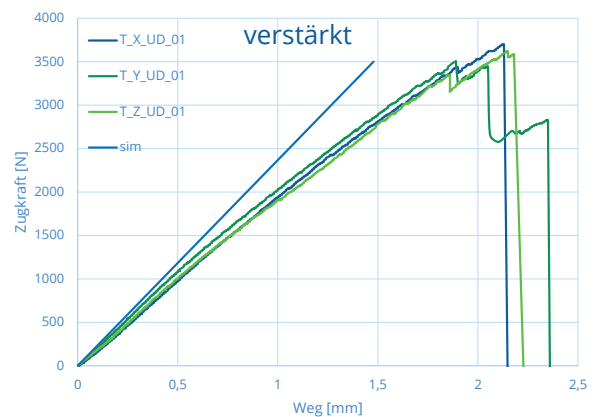
Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften

HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Vergleich Simulation und Experiment: Zugversuch



Eigenschaft	Simulation/ Datenblatt	Messungen
Zugfestigkeit x [MPa]	62,7	76,9±0,3
Zugfestigkeit y [MPa]	62,7	43,0±5,0
Zugfestigkeit z [MPa]	41,9	22,0±4,7



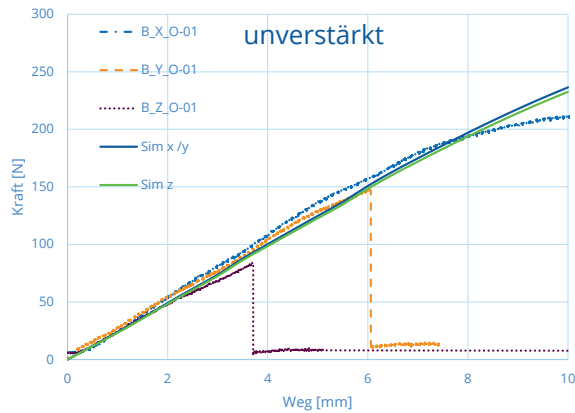
- Hashin-Kriterium ergab einen Sicherheitsfaktor von 1,11 bei einer Zugkraft von 3500N
- Dominierendes Versagen: Faserbruch

18 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften

HOCHSCHULE
MITTWEIDA

Vergleich Simulation und Experiment: Dreipunkt-Biegeversuch



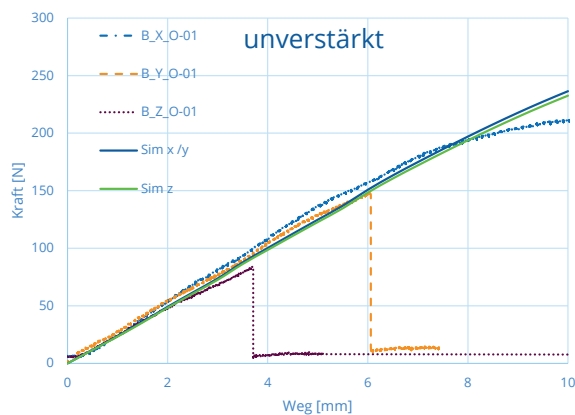
Eigenschaft	Simulation/ Datenblatt	Simulation Weg [mm]	Messungen
Biegefestigkeit x [MPa]	62,7	4,5	125,6 ± 2,0
Biegefestigkeit y [MPa]	62,7	4,5	104,8 ± 13,8
Biegefestigkeit z [MPa]	41,9	3	50,0 ± 3,1

19 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

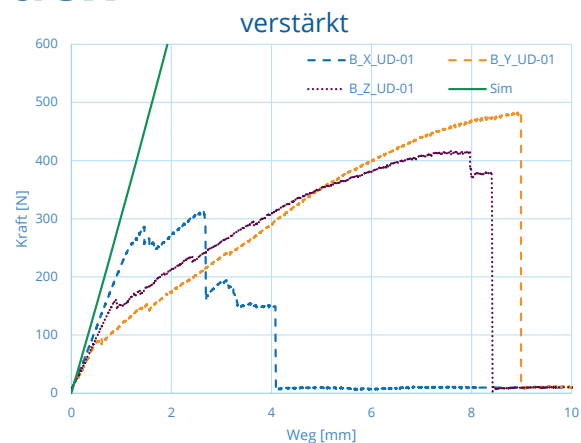
Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Vergleich Simulation und Experiment: Dreipunkt-Biegeversuch



Eigenschaft	Simulation/ Datenblatt	Simulation Weg [mm]	Messungen
Biegefestigkeit x [MPa]	62,7	4,5	125,6 ± 2,0
Biegefestigkeit y [MPa]	62,7	4,5	104,8 ± 13,8
Biegefestigkeit z [MPa]	41,9	3	50,0 ± 3,1



- Hashin-Kriterium ergab einen Sicherheitsfaktor von 1,06 bei einer Durchbiegung von 0,5 mm.
- Dominierendes Versagen: Delamination der Druckseite

20 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Wirksamkeit und Herausforderungen der Verstärkung

Wirksamkeit:

- Lastpfadorientierte UD-Tape-Integration kompensiert Schwächen der schichtweisen Fertigung
- In Z-Richtung Zuwächse bei Zug- und Biegefestigkeit von über 400 %

Limitationen:

- Haftung zwischen UD-Tape und FLM-Matrix
- Lokale Delaminationen und Ausknickerscheinungen auf Druckseite bei Biegung

Grenzen der numerischen Modelle

- Die FEM-Simulationen mit dem orthotropen Ansatz und Hashin-Kriterium eignen sich gut zur Prognose des strukturellen Verhaltens der verstärkten Bauteile.
- Das vereinfachte lineare Materialmodell ist jedoch bei unverstärkten Proben für große Dehnungen limitiert.

Fazit und Technisches Potenzial

Fazit:

- Die Arbeit bestätigt das hohe Potenzial hybrider additiver Fertigungskonzepte.
- Die gezielte Verstärkung mit UD-Tapes ermöglicht eine signifikante Steigerung der mechanischen Leistungsfähigkeit, insbesondere in der Z-Richtung.

Potenzial:

- Ermöglicht lastgerechte Leichtbau-Designs für z. B. Gehäuse, Verbindungselemente und Strukturkomponenten
- Belastungsarten mit hoher Oberflächenspannung (Biegung, Torsion, Zug) profitieren besonders

23 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften



Ausblick: Forschungsperspektiven

Prozessoptimierung:

- Weiterentwicklung der Tape-Integration (z. B. automatisierte Anpressmechanismen oder lokales Vorheizen) zur Steigerung der Verbundqualität.

Materialvielfalt:

- Untersuchung alternativer Matrixmaterialien (z. B. PA6, PP) und/oder Fasern (z. B. GF, Flachs).

Simulation:

- Einbindung von Cohesive-Zone-Modellen zur realitätsnahen Beschreibung interlaminarer Versagensmechanismen
- Integration von nichtlinearen Kunststoffmodellen

Anwendungen

24 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme
Fakultät Ingenieurwissenschaften





**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Hagen Bankwitz
Akademischer Assistent

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

bankwitz@hs-mittweida.de

hs-mittweida.de

Quellen

- | | |
|---|---|
| 1 | https://3d.nice-cdn.com/upload/file/PolyTerra_PLA_TDS_V5.pdf |
| 2 | https://3d.nice-cdn.com/upload/file/Bambu_PETG_HF_Technical_Data_Sheet.pdf |
| 3 | https://3d.nice-cdn.com/upload/file/PolyLite_ASA_TDS_V4.pdf |
| 4 | https://3d.nice-cdn.com/upload/file/Bambu_ABS_Technical_Data_Sheet_V3.pdf |
| 5 | https://3d.nice-cdn.com/upload/file/PolyMide_CoPA_TDS_V5.1.pdf |
| 6 | https://3d.nice-cdn.com/upload/file/PolyLite_PC_TDS_V5.1.pdf |
| 7 | https://topolo-panel.com/wp-content/uploads/2024/02/Continuous-Fiberglass-UD-Tapes.jpg |
| 8 | https://wiki.polymerservice-merseburg.de |

Additive Fertigung monodisperser und anzahlgenauer Mikroplastik- Referenzpartikel durch Mikroextrusion

Maurice Hauße (M.Sc.)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter –
Bereich Polymerchemie HTWD

15.10.2025

Mikroplastik in der Umwelt

Was ist Mikroplastik?



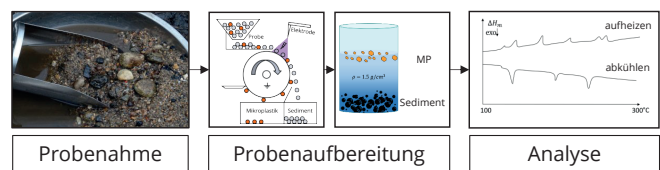
Warum ist es umwelt- und gesundheitsgefährlich?



<https://wir-fuer-recyclat.de/muellimeer-mehr-muell/>



Nachweis von MP aus der Umwelt

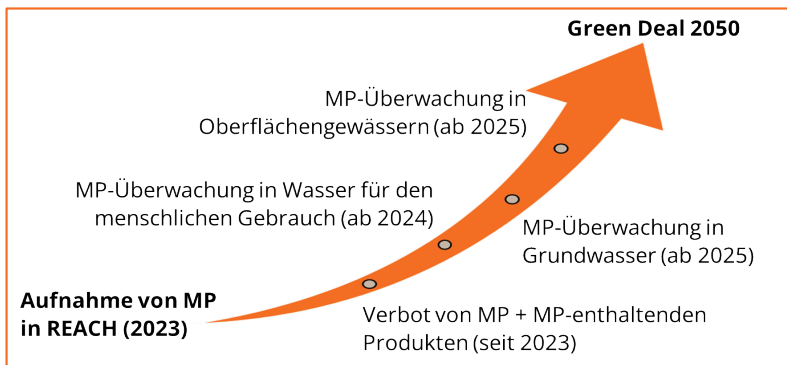


- Kunststoffe durch verschiedene Polymere und Additive sehr unterschiedlich in Eigenschaften
- Veränderung der Eigenschaften der Kunststoffe von Probenahme bis Analyse kann nicht immer ausgeschlossen werden

→ Standards/ Referenzmaterialien benötigt

Kunststoffabfälle als wachsendes globales Problem

- Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffen weltweit wachsend
- 2 Mio. Tonnen/Jahr in 1950 → **414 Mio. Tonnen/Jahr** in 2023
- davon landen etwa 1,5 – 2,0 % als Müll in der Umwelt → **Mikroplastik (MP)**



Hoher Analysenbedarf für Mikroplastik

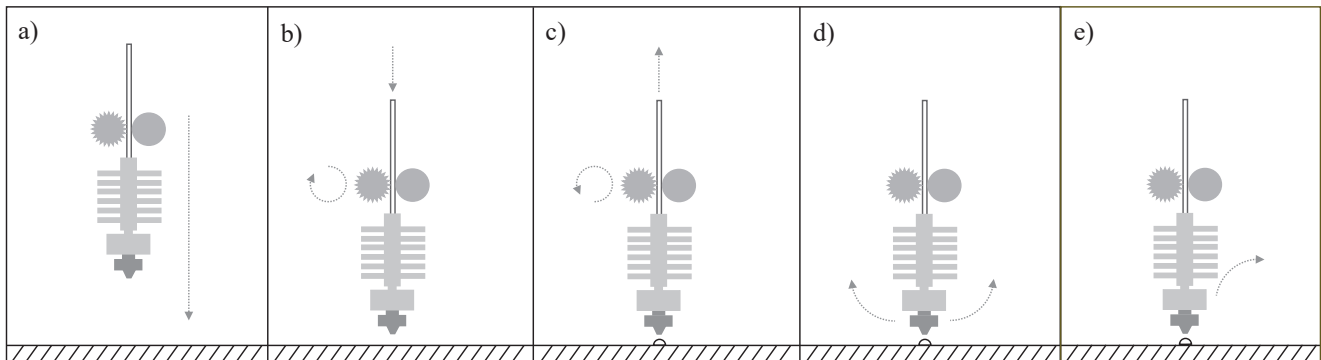
ABER keine geeigneten Referenzmaterialien für

- Validierung von Methoden zur Analyse
- Kalibrierung von Analysegeräten

Referenzmaterialien für die MP-Analytik (Stand d. Technik)

Eigenschaften/ Anforderungen	Kryogenes Mahlen + Siebfractionierung	Direktsynthese durch Emulsionspolymerisation/ Präzipitation	Additive Fertigung durch Mikroextrusion
Partikelform	unregelmäßige Fragmente	sphärische Partikel	halbkugelförmig, verschiedene Formen denkbar
Weitere benötigte Hilfsmittel und -stoffe	flüssiger Stickstoff, Kryomühle, Siebe	Labor + Abzug, Lösungsmittel, Filter	modifizierter 3D-Drucker
Partikelgröße und Größenverteilung	50 – 5000 µm; breite Partikelgrößenverteilung, Eingrenzung durch Siebung	< 20 µm; engverteilte bis monodisperse Partikelgrößenfraktion	100 – 5000 µm; spezifische monodisperse Partikelgröße
exakte Partikelanzahl herstellbar?	nein	nein	ja
Bandbreite möglicher Polymere	fast alle Polymere (schlechtere Verarbeitung, um so niedriger der Glasübergang)	auf einige wenige beschränkt	fast alle Polymere

Herstellungsverfahren



Herausforderungen:

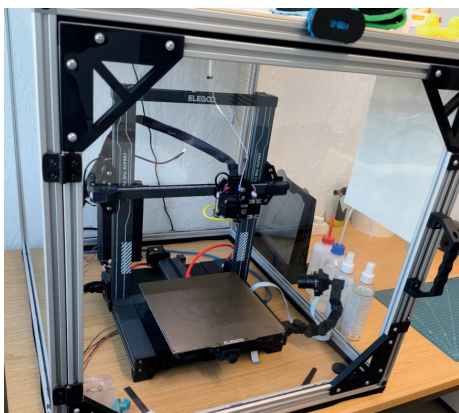
- Stringing an den Partikeln
- wiederholgenaue Extrusionsmenge
- verstopfende Düsen

verwendete Düsen:

- Standard 3D-Druckdüsen aus Messing 0,4 – 0,1 mm
- spezialgefertigte Düsen aus Messing 0,1 – 0,01 mm

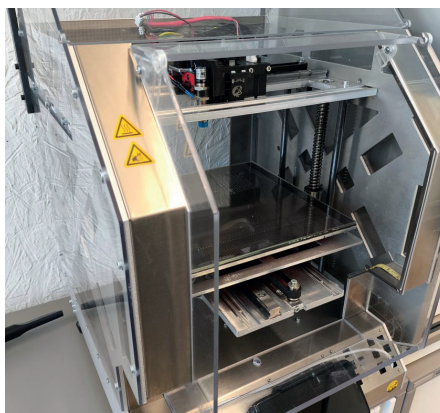
Drucksysteme

01 – modifizierter Elegoo Neptune 4 Pro



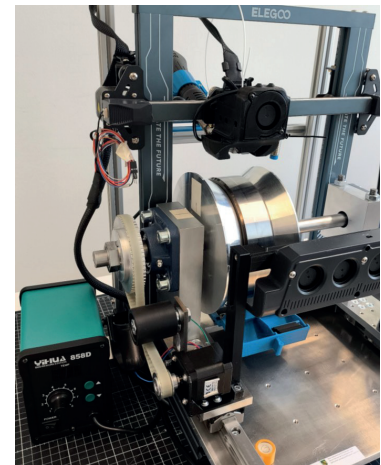
- diskontinuierliche Partikel-produktion auf Druckbett (ca. 7000 Partikel/Platte)
- Produktion von etwa 1000 – 5000 Partikel/h

02 – Renkforce RF 10000



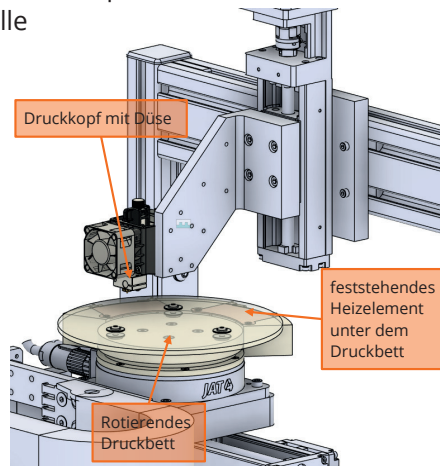
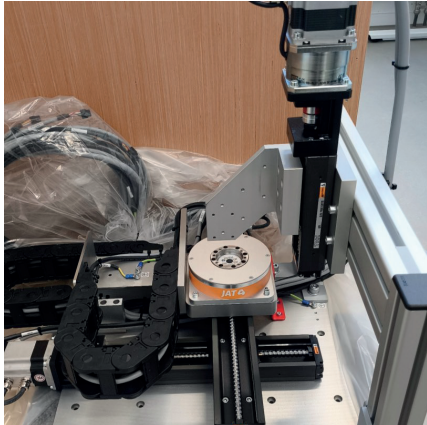
03 – Umgebauter Elegoo Neptune 4 Pro mit Rolle

- für kontinuierliche Partikel-produktion (1000 Partikel/h)



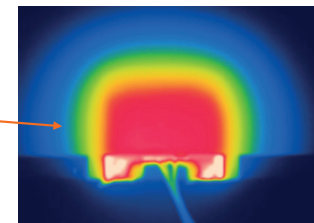
Drucksysteme - #04 – JAT-Demonstrator für präzise Fertigung

- Grundkonstruktion + Achsen mit Fa. JAT geplant und ausgelegt
- Elektroverteilung, Ansteuerung, rotierendes Druckbett mit Heiz- und Kühlzone erweitert
- Ziel: komplette Automatisierung der Partikelproduktion, inkl. bildgestützte Inline-Qualitätskontrolle



Technische Daten

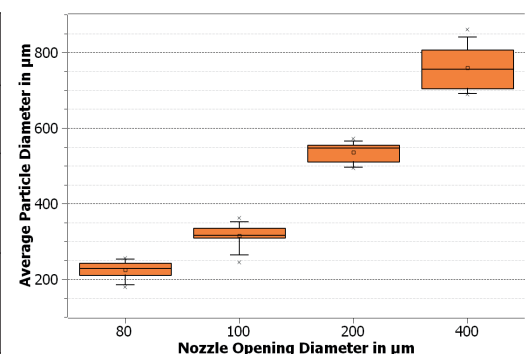
- Positioniergenauigkeit der Achsen: $\pm 10 \mu\text{m}$
- Positionieraufösung: $0,02236 \mu\text{m}$ (x-, y-Achse); $0,045776 \mu\text{m}$ (z-Achse)
- Wiederholgenauigkeit: $3 \mu\text{m}$
- Servomotoren mit Absolutencodern



Temperaturfeld der Heizzone auf der Glasdruckplatte

Ergebnisse – Polymertypen und Partikelgrößen

Düsen- durch- messer in μm	Polymer mit Angabe der Partikelgröße in μm (Mittelwert \pm Standardabweichung)						
	LD-PE	PP	PA6/6.6	PLA	PLA glow	PCL	PMMA
400	991 \pm 32 ($\pm 3 \%$)	913 \pm 166 ($\pm 18 \%$)	-	759 \pm 59 ($\pm 8 \%$)	1213 \pm 67 ($\pm 5 \%$)	1349 \pm 58 ($\pm 4 \%$)	-
200	566 \pm 62 ($\pm 11 \%$)	335 \pm 13 ($\pm 4 \%$)	703 \pm 155 ($\pm 22 \%$)	536 \pm 27 ($\pm 5 \%$)	472 \pm 59 ($\pm 12 \%$)	702 \pm 105 ($\pm 15 \%$)	902 \pm 43 ($\pm 5 \%$)
100	308 \pm 26 ($\pm 9 \%$)	-	575 \pm 75 ($\pm 13 \%$)	315 \pm 32 ($\pm 10 \%$)	-	-	-
80	-	-	-	224 \pm 25 ($\pm 11 \%$)	-	-	-



Partikeldurchmesser von additiv gefertigten Partikeln aus PLA

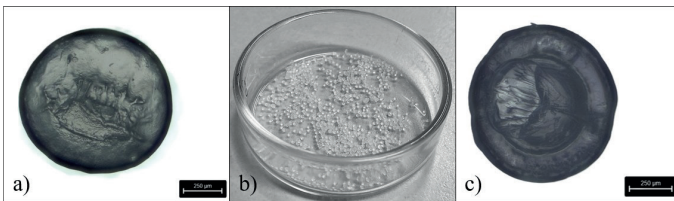
- variabel einstellbare Partikelgröße durch Anpassung der Düsenöffnung und der Druckparameter
- kleinste erreichte Partikelgröße: $150 \mu\text{m}$

Ergebnisse – Partikeleigenschaften

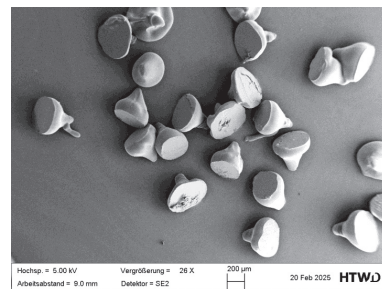
- Anzahlgenaue Produktion von Partikeln
- Druck auf verschiedene Substrate möglich
- Morphologie der Partikel: halbrund bis tropfenförmig
- Herstellung von Partikeln aus allen thermoplastischen Kunststoffen möglich



PA6/6.6 Partikel auf einer zuschneidbaren Folie (auch wasserlöslich möglich)



Additiv gefertigte Referenzpartikel, produziert mit einer 400 μm Düse a) einzelner LDPE-Partikel; b) exakt 1000 LDPE Partikel, c) einzelner Partikel aus PMMA



Rasterelektronenaufnahme von tropfenförmigen LDPE-Partikeln, produziert mit 200 μm -Düse (26-fache Vergrößerung)

HTWD 15.10.2025 Additive Fertigung von Mikroplastik-Referenzpartikel / HTWD / Maurice Hauffe

9

Anwendungsbeispiele der additiv gefertigten MP-Referenzmaterialien

Aggregation und Sedimentation von MP in Flüssen



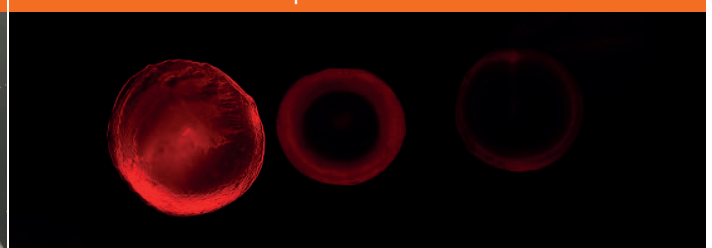
Wechselwirkung von MP und Pflanzenwurzeln



Expositionsversuch von MP an der Elbe



Schwermetalladsorption an MP und Reifenabrieb



HTWD 15.10.2025 Additive Fertigung von Mikroplastik-Referenzpartikel / HTWD / Maurice Hauffe

10

Zusammenfassung und weitere Arbeiten

Zusammenfassung

- neues und einzigartiges Referenzmaterial für die Mikroplastik-Analyse durch additive Fertigung
- anzahlgenaue Partikelfractionen
- Partikelgrößen von 150 µm bis 5000 µm
- Monodispersität der Partikelgröße ($\pm 10\%$)
- Herstellungsverfahren für alle Thermoplaste geeignet
- schnelle und kostengünstige Herstellung mit minimalem Abfallaufkommen

Weitere Arbeiten

- Erweiterung des Polymerangebots
- kleinere Partikelgrößen ($< 100\text{ }\mu\text{m}$)
- Automatisierung des gesamten Prozesses
- Inline-Qualitätskontrolle

		Polymertypen								
		HDPE	LDPE	PP	PA6/6.6	PMMA	PET	PS	PLA	PCL
Größe in µm	1000±95									
	600±90									
	300±45									
	150±25									
	≤ 100									
	≤ 10									
Erfolgreich hergestellt		Machbarkeit nachgewiesen			Mögliches weiteres Forschungsziel			in Prüfung zur Machbarkeit		

Infos und Kontakt:



Vielen Dank!

Hr. M. Sc.
Maurice Hauffe
wissenschaftlicher Mitarbeiter HTWD
T +49 351 462 2165
maurice.hauffe@htw-dresden.de

Prof. Dr.-Ing.
Thomas Himmer
Fakultät Maschinenbau
Tel.: +49 351 462 2555
thomas.himmer@htw-dresden.de

Prof. Dr. rer. nat.
Kathrin Harre
Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie
Tel.: +49 351 462 3250
kathrin.harre@htw-dresden.de



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch
Steuermittel auf der Grundlage des vom
Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Prozesse und Qualitätssicherung

KI-basierte Überwachung der Schichtinformationen im großvolumigen Schmelzschichtverfahren

T. Wille^a, D. Linke^a, J. Bliedtner^a, W. Liao^b, C. Zhang^b, G. Notni^b

^aErnst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

^bTechnische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Gesellschaft für
Fertigungstechnik und
Entwicklung
Long-Schmelzschichtverfahren e.V.



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences

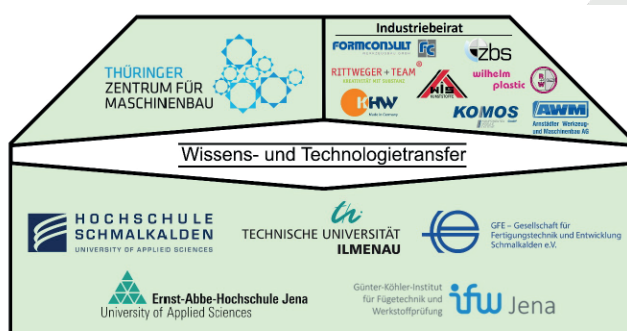


HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN
University of Applied Sciences

EMProBio – gefördert durch TMBWK/TAB, Europäischer Sozialfonds Plus (ESF+) mit der Vorhabens-Nr. 2024 FGR 0077



Energie- und materialeffiziente Produktionsprozesse für biogene Kunststoffe



23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Gesellschaft für
Fertigungstechnik und
Entwicklung
Long-Schmelzschichtverfahren e.V.



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN
University of Applied Sciences

Agenda

1. Grundlagen Materialextrusionsverfahren
2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren
3. Grundlagen der optischen Schichtüberwachung
4. KI-basierte Klassifizierung von Prozessfehlern
5. Messaufbau für Granulat-basiertes MEX-System
6. Versuchsdurchführung
7. Ergebnisdiskussion
8. Ausblick

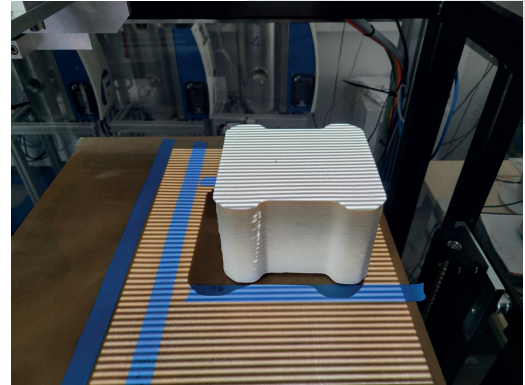


Abb. 1: Streifenprojektion zur Detektion der Schichtinformationen

23.10.2025



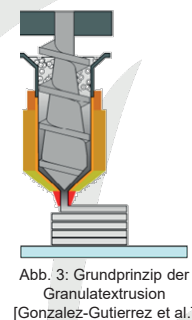
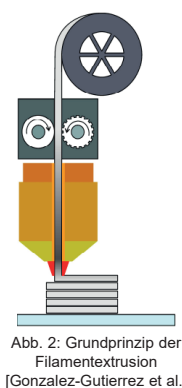
Kofinanziert von der
Europäischen Union



1. Grundlagen Materialextrusionsverfahren

Additive Fertigung mittels Materialextrusion (MEX) nach DIN EN ISO 52900

Filament-basiert	Granulat-basiert
Verfahrensprinzip	
Strangablageverfahren mittels Extrusion thermisch plastifizierten Materials	
Materialförderung	
direkt, Filament als Kolben	indirekt, mittels Förderschnecke
Düsendurchmesser	
≈ 0,4 - 1,0 mm	≈ 1,0 - 6,0 mm
Materialaustragsraten	
≈ 0,01 kg/h	≈ 0,5 - 6,5 kg/h



23.10.2025

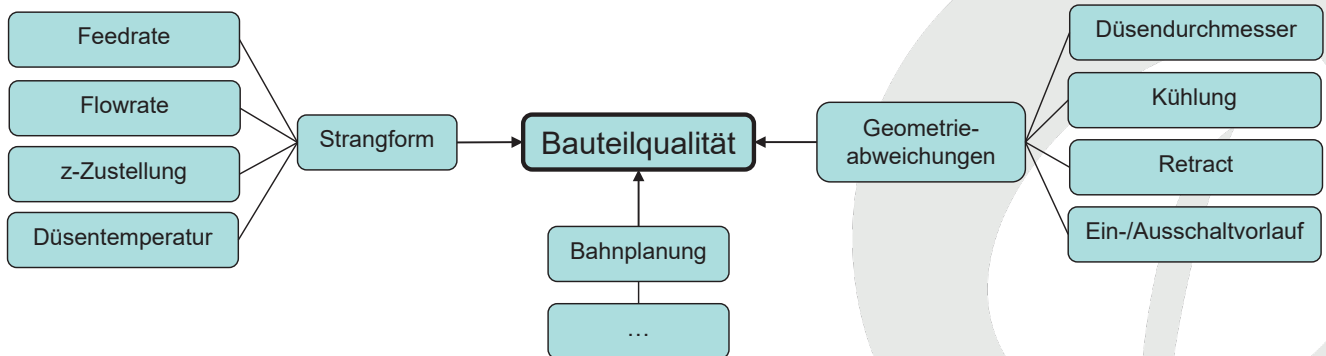


Kofinanziert von der
Europäischen Union



2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren

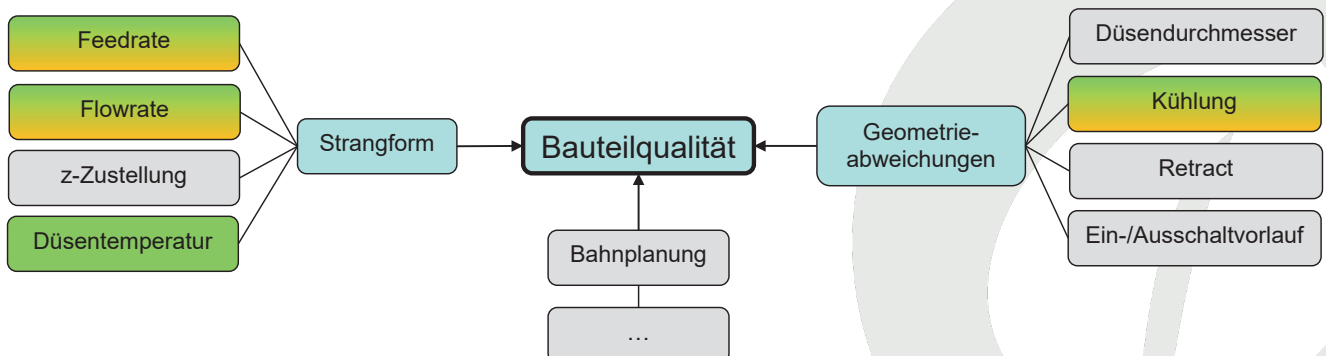
ausgewählte Prozessparameter als Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität



23.10.2025

2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren

ausgewählte Prozessparameter als Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität



live einstellbare Parameter: Filament-basiert ● Granulat-basiert ●

23.10.2025

2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren

- Überextrusion (-> Flowrate)
- Unterextrusion (-> Flowrate)
- Einlaufverhalten des Extruders (-> Einschaltvorlauf)
- Auslaufverhalten des Extruders (-> Ausschaltvorlauf)



Abb 4: Überextrusion



Abb. 5: Unterextrusion

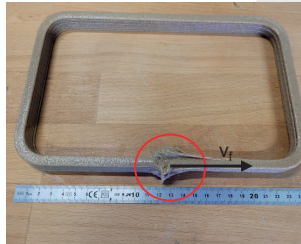


Abb. 6: zu großer Einschaltvorlauf

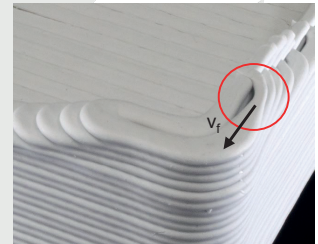


Abb. 7: zu geringer Einschaltvorlauf

live einstellbar: ●

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



THÜRINGER
ZENTRUM FÜR
MASCHINENBAU

Lehrstuhl für
Fertigungstechnik und Erweiterte
Lern-Technologien



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN

2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren

- Stringing (-> Düsentemperatur, Retract)
- Abweichungen zwischen Stranghöhe und Zustellung $h \neq z$ (-> Feedrate, Flowrate, Kühlung)

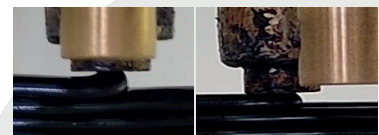


Abb. 9: links: $h \neq z$; rechts: $h = z$ [Wille et al.]



Abb. 8: Stringing

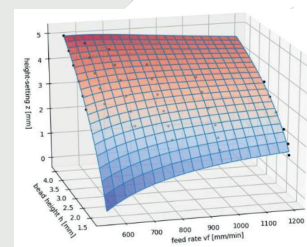


Abb. 10: Prozessmodell nach [Layher et al.]

live einstellbar: ●

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



THÜRINGER
ZENTRUM FÜR
MASCHINENBAU

Lehrstuhl für
Fertigungstechnik und Erweiterte
Lern-Technologien



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN

2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren

- **Warping** (-> Haftvermittler)
- **Wärmestau** (-> **Kühlung**)
- **Delamination** (-> **Kühlung**)

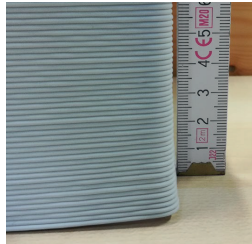


Abb. 11: Warping

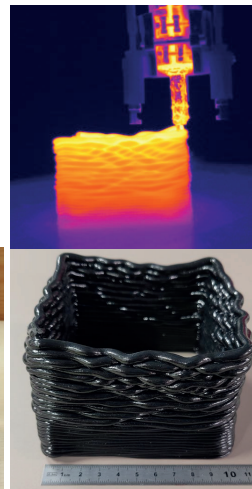


Abb. 12: Wärmestau

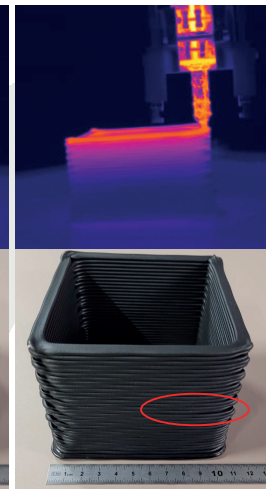


Abb. 13: Delamination

live einstellbar: ●

23.10.2025



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Freistaat
Thüringen
Ministerium
für Bildung,
Wissenschaft und Kultur



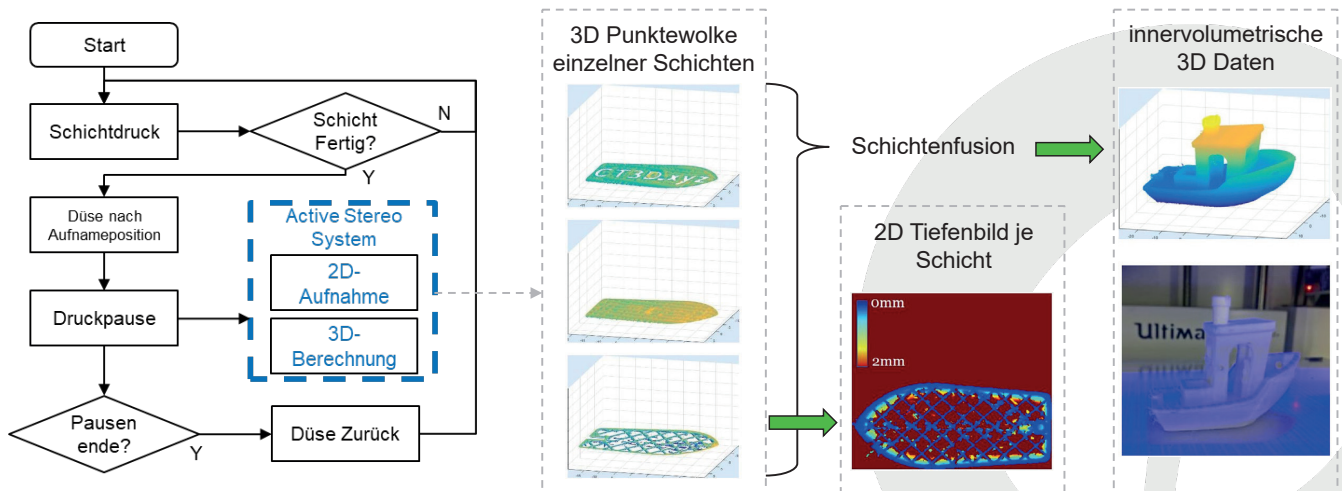
Lehrstuhl für
Fertigungstechnik und Erweiterte
Lang-Schichtanfertigung



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



3. Grundlagen der optischen Schichtüberwachung



23.10.2025



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Freistaat
Thüringen
Ministerium
für Bildung,
Wissenschaft und Kultur



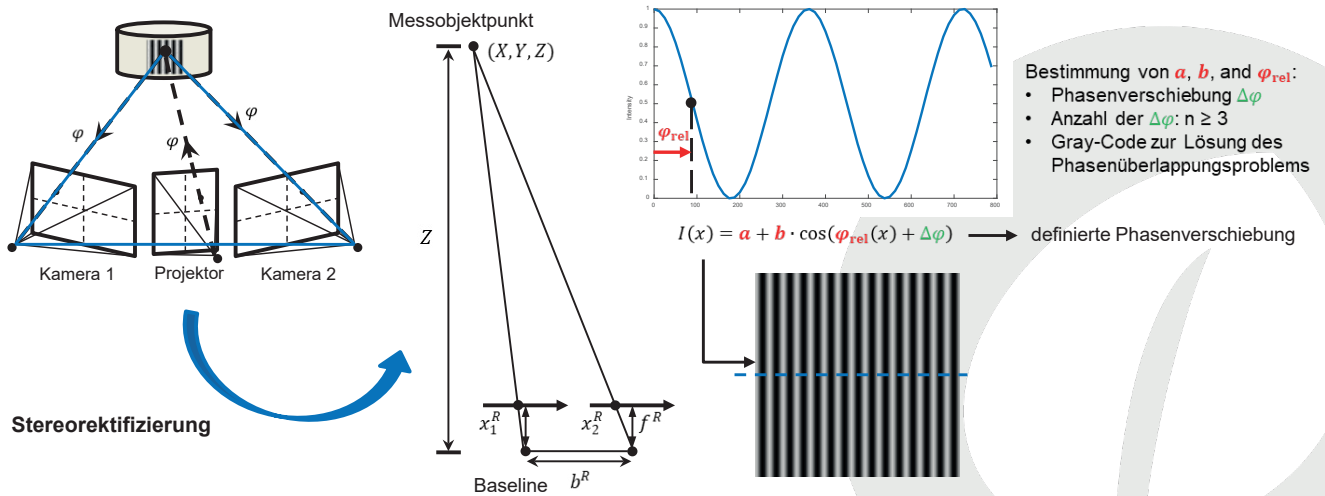
Lehrstuhl für
Fertigungstechnik und Erweiterte
Lang-Schichtanfertigung



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



3. Grundlagen der optischen Schichtüberwachung



23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Institut für
Produktionstechnik und Formungstechnik
Lehrstuhl für Schweißtechnik



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN
University of Applied Sciences

3. Grundlagen der optischen Schichtüberwachung

- geometrische Merkmale wie 3D-Form und Geometriemaße
- Oberflächengüte
- innere Struktur



Schichtinformationen durch 3D
innenvolumetrische Bildinformationen

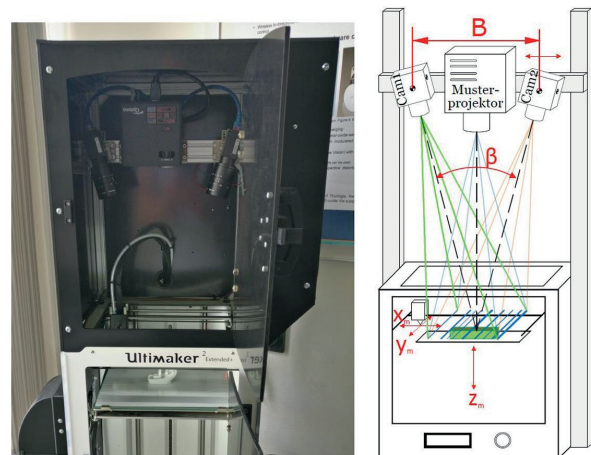


Abb. 14: Proof-of-Concept Aufbau im TUI Labor [Preißler]

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Institut für
Produktionstechnik und Formungstechnik
Lehrstuhl für Schweißtechnik



ifw Jena

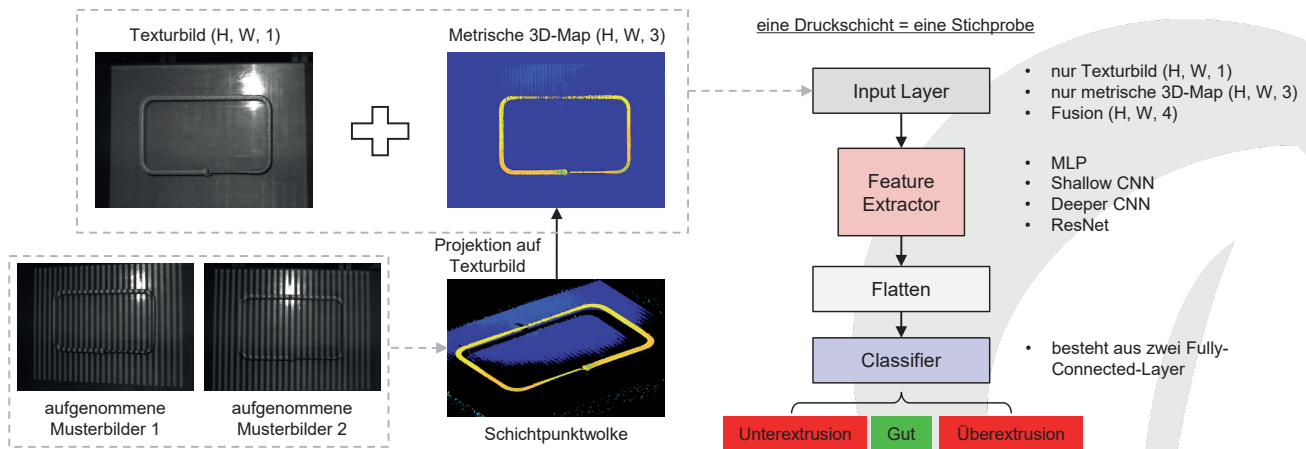


Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN
University of Applied Sciences

4. KI-basierte Klassifizierung von Prozessfehlern



23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Institut für
Produktionstechnik und
Management



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN

5. Messaufbau für Granulat-basiertes MEX-System

- 3-Achs-System mit ortsfestem Extruder und integriertem Kamera-/Projektoraufbau
- automatisierte Lösung direkt über G-Code:
 - schichtweises Anfahren einer Fotoposition
 - angepasste Pausenzeit
 - Triggersignal

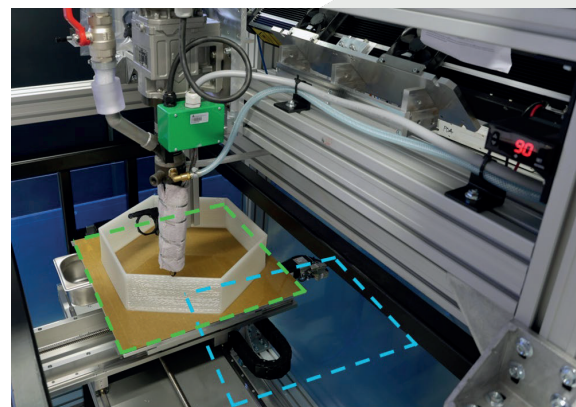


Abb. 15: schichtweise Aufnahme der Geometrie; Bauposition; ● Fotoposition ●

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Institut für
Produktionstechnik und
Management



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN

6. Versuchsdurchführung

- Untersuchung des Extruder-Einlaufverhaltens bei verschiedenen Einschaltvorlauf-Zeiten
- Herstellung einfacher Hohlquader
- für das Proof-of-Concept wurden insgesamt 97 Schichten aufgenommen
(Gut 20, Überext. 34, Unterext. 43)

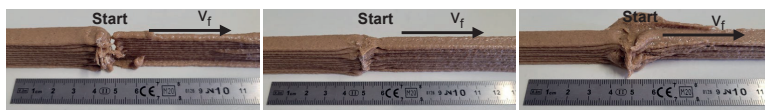


Abb. 16: links: Unterextrusion; mittig: optimierter Einschaltvorlauf; rechts: Überextrusion

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



7. Ergebnisdiskussion

Bewertungsmetriken

1. Level - Fehlerdetektion

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN+FP}$$

$$F1score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$

TP : True Positive
TN : True Negative
FP : False Positive
FN : False Negative

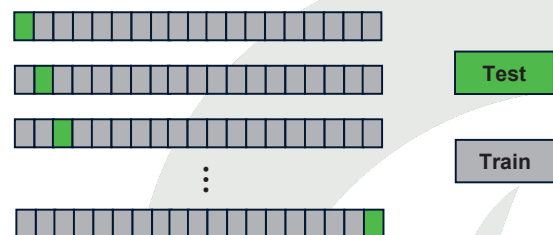
Gut Fehler

2. Level - Dreiklassenklassifikation

- Accuracy
- Confusion Matrix

Unterextrusion Gut Überextrusion

Leave-one-layer-out Validation



- für alle 97 Schichten; **jeweils 96 zum Training und 1 zum Testen**.
- dies wird **alle 97-mal gemacht**, um die finalen Metriken zu berechnen.
- die Vorgehensweise entspricht eher **realen** Anwendungsszenarien.

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



7. Ergebnisdiskussion

Model		MLP			Shallow CNN			Deeper CNN			ResNet 18		
Kanäle		Texturbild	Metrische 3D-Map	Fusion	Texturbild	Metrische 3D-Map	Fusion	Texturbild	Metrische 3D-Map	Fusion	Texturbild	Metrische 3D-Map	Fusion
Fehlerdetektion	Precision	0.8148	0.9125	0.9367	0.8824	0.9241	0.9474	0.9250	0.9481	0.9487	0.8718	0.9595	0.9610
	Recall	0.8571	0.9481	0.9610	0.9740	0.9481	0.9351	0.9610	0.9481	0.9610	0.8831	0.9221	0.9610
	Specificity	0.2500	0.6500	0.7500	0.5000	0.7000	0.8000	0.7000	0.8000	0.8000	0.5000	0.8500	0.8500
	F1-Score	0.8354	0.9299	0.9487	0.9259	0.9359	0.9412	0.9427	0.9481	0.9548	0.8774	0.9404	0.9610
3-Klassen	Accuracy	59.79%	84.54%	88.66%	70.10%	85.57%	88.66%	85.57%	89.69%	90.72%	72.16%	87.63%	92.78%

- Proof-of-Concept-Ergebnisse zeigen **die gute Machbarkeit und Potenzial** dieser auf optischen Methoden und KI basierenden Überwachung der Schichtinformationen im großvolumigen Schmelzschichtverfahren.
- die **Fusion** von 2D-Texturbildern jeder Schicht mit metrischen 3D-Map **outperformt** die Verwendung einer einzelnen Bildmodalität als Input.
- **tiefer, komplexere** Netzwerke extrahieren die physikalischen Informationen eindeutig besser.

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Universität für
Angewandte Wissenschaften
Jena



ifw Jena



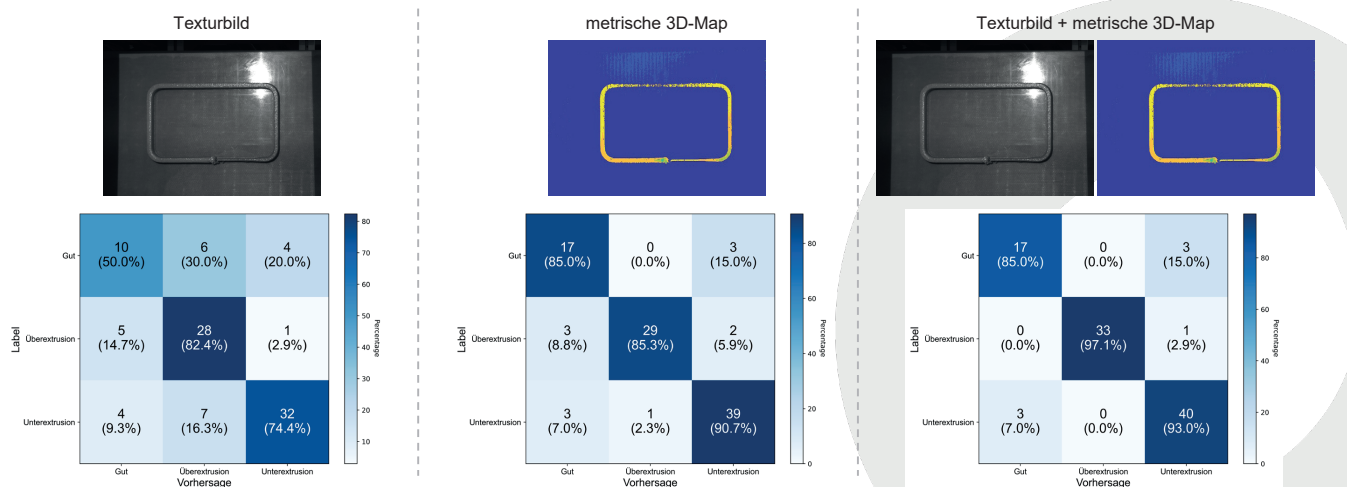
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN
University of Applied Sciences

7. Ergebnisdiskussion

Diskussion der Nutzung verschiedener Bildmodalitäten (unten gezeigte Confusion Matrix basiert auf ResNet18)



23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU



Universität für
Angewandte Wissenschaften
Jena



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE
SCHMALKALDEN
University of Applied Sciences

8. Ausblick

- automatisierte Detektion und Klassifizierung auftretender Fehler mittels KI
- Geometrieabgleich Soll/Ist über erzeugte Punktwolke und CAD-Daten
- KI-basierte Vorschläge für die manuelle Anpassung von Parametern (insbesondere Feedrate, Flowrate, Extruder Vorlauf/Nachlauf, Kühlung)
- Zukunft: Substitution des herkömmlichen Regelkreises durch KI-basierte Anpassung der Prozessparameter um Zielgrößen wie die Stranggeometrie konstant zu halten

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU



Institut für Fertigungstechnik und Innovation
an der HTWK Chemnitz



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE SCHMALKALDEN

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

23.10.2025



Kofinanziert von der Europäischen Union



Freistaat Thüringen

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur



TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU



Institut für Fertigungstechnik und Innovation
an der HTWK Chemnitz



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE SCHMALKALDEN

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.

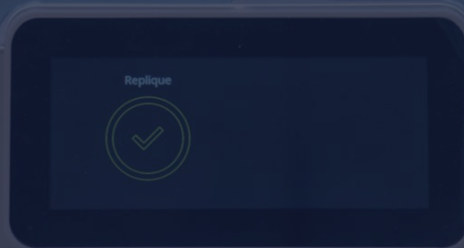
Wille, Toni; Neitmann, Friedrich; Hopf, Andreas; Bliedtner, Jens (2025): Influence of active strand cooling on the interlayer bonding strength in Large Scale Additive Manufacturing. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* DOI: 10.1007/s11740-025-01366-7.

Layher, Michel; Eckhardt, Lukas; Hopf, Andreas; Bliedtner, Jens (2021): Development of a Process Model for Bead Deposition Rates and Cooling Behavior of Large Scale Additive Manufacturing Parts. In: *AMPA 2020: Industrializing Additive Manufacturing*, S. 223–240. DOI: 10.1007/978-3-030-54334-1_16

Preißler, Marc (2025): Empirische Prozessmodellierung durch semantisch-segmentierte In-Prozessdaten am Beispiel des Fused Filament Fabrication Verfahrens. TU Ilmenau. DOI: 10.22032/dbt.63982

Gamechanger 3D-Druck

Aber wie sieht das mit der Qualität aus?



Kurzvorstellung

Amador Miano

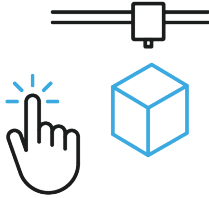
Dipl. Ing-Maschinenbau

Über 25 Jahre im Mittelstand und Großunternehmen aktiv

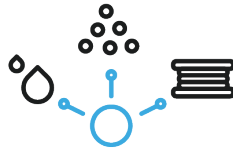
Und letztendlich in einem Startup gelandet 😊



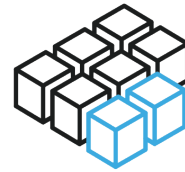
3D-Druck: längst mehr als Nischentechnologie



Teile „auf Knopfdruck“ ohne aufwendige Anlaufphase



breites Materialspektrum an Kunststoffen, Harzen und Metallen



ab Stückzahl 1 bis zu 10.000 und mehr, keine Mindestmengen, keine Lagerung



Warum also warten? Einfach Loslegen! ...Oder?



Der Teufel steckt im Detail

Für welche Teile macht 3D-Druck Sinn?

- Geometrie
- Stückzahl
- Anforderungen
- ...



Welche Technologie ist die richtige?

- Filamentdruck
- Pulverbettverfahren
- Stereolithografie
- ...



Welches Material brauche ich?

- Welcher Hersteller
- Gleiches wie Ursprung?
- Metall, Kunststoff, Harz?
- ...



Brauche ich eine Nachbearbeitung?

- Mechanische Nacharbeit?
- Oberflächenbehandlung?
- Wärmebehandlung?
- ...



Wie erreiche ich die benötigte, reproduzierbare Qualität?



Die richtige Teileauswahl

Wirtschaftlichkeit

Teilegeometrie

Verfügbarkeit

Technische
Einsatzgrenzen



- komplexe Teile
- klein- und mittelvolumig
- kleine und mittlere Losgrößen
- Alternative für Guss- und Spritzgussteile
- Kunststoffe, Metalle, Harze



- Normteile
- einfache Dreh- und Frästeile
- ehem. Blechteile
- Schmiedeteile
- großvolumige Gussteile

Technologie- und Materialauswahl (1)

Technologie		Festigkeit	Optik	Kosten	Komplexität
FDM		★☆☆	★☆☆	★★★	★☆☆
SLS		★★★	★★★	★★★	★★★
SLM		★★★	★★★	★★★	★★★
SLA		★☆☆	★★★★	★★★	★★★★
MJF		★★★	★★★	★★★	★★★

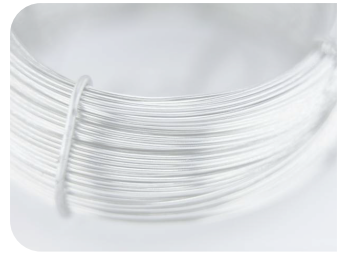
Technologie- und Materialauswahl (2)

Konventionelle Werkstoffe

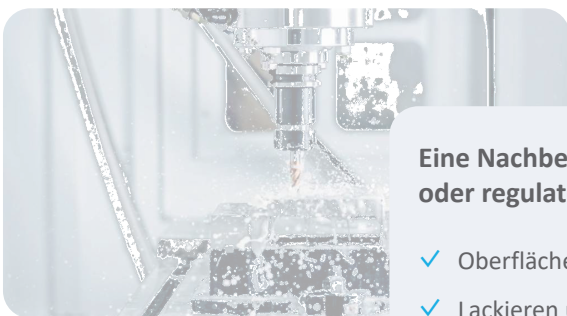
- Normen & Regelwerke (ISO, ASTM...)
- Herstellerunabhängige Kennwerte
- Langzeiterfahrungen
- hinsichtlich Fertigungsverfahren optimiert

Werkstoffe im 3D-Druck

- Keine Normen und Regelwerke
- Lieferantenspezifische Kennwerte
- teilweise fehlende Langzeiterfahrungen
- technologische Einschränkungen

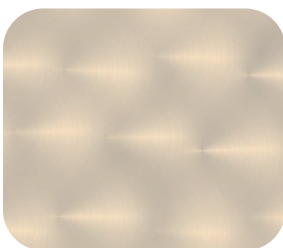


Post-Processing: fertig erst, wenn's passt!



Eine Nachbearbeitung ist oft erforderlich, um technische, optische oder regulatorische Anforderungen zu erfüllen:

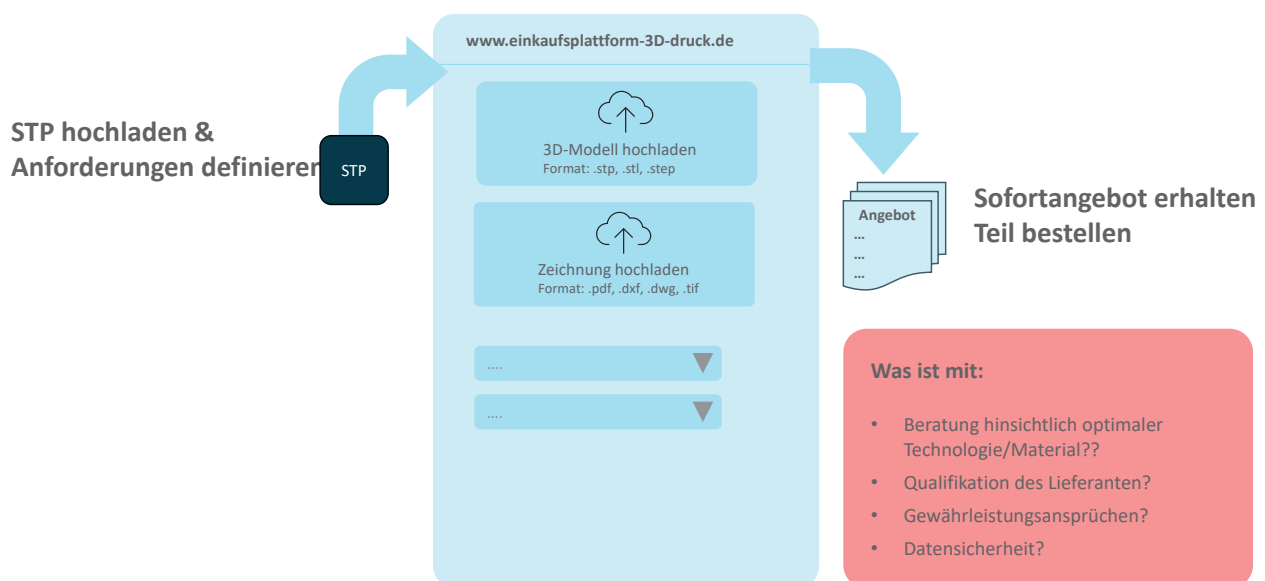
- ✓ Oberflächenbehandlung (Strahlen, chem. Glätten, Schleifen...)
- ✓ Lackieren und Beschichten
- ✓ Mechanische Nacharbeit (Gewinde, Passungen...)
- ✓ Sonstiges (Wärmebehandlung, Sterilisation, Infiltration...)



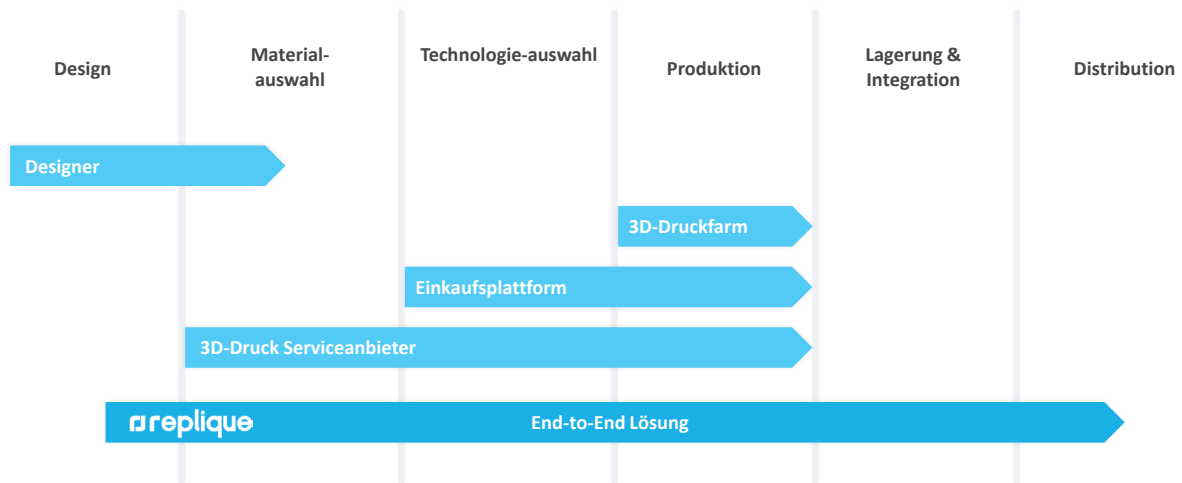
Teile einfach auf Knopfdruck? Es ist etwas komplizierter...



Vorsicht bei Spot-Plattformen



Replique ermöglicht End-to-End Zugang zu 3D-Druck



Zusammenfassung

- 3D-Druck ist für bestimmte Anwendungen eine hervorragende Alternative zu traditionellen Fertigungsverfahren
- Die Auswahl der richtigen Technologie, des passenden Materials und ein entsprechendes Post-Processing sind entscheidend für qualitativ hochwertige Ergebnisse
- Die softwaretechnische Vorbereitung des Drucks beeinflusst ebenfalls die Druckqualität
- Bei anspruchsvollen Teilen mit hohen Anforderungen muss geprüft werden, inwieweit Beschaffungsplattformen diese gewährleisten können

Gamechanger 3D-Druck

Und mit dem richtigen Partner
klappt das auch mit der Qualität!

Amador Miano | amador.miano.prieto@replique.io | www.replique.io

replique

Bildbasierte Fehler- und Prozessanalyse im Extrusions-3D-Druck

M. Sc. Björn Kunz

TU Chemnitz, Prof. Elektrische Energiewandlungssysteme u. Antriebe

Zusammenfassung

Der extrusionsbasierte 3D-Druck bietet eine große Materialvielfalt, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an den Extrusionsprozess stellt. Die Materialzufuhr wird in der Regel offen gesteuert; eine Regelung mit Rückkopplung ist bislang nicht implementiert, da geeignete Sensoren zum Schließen eines Regelkreises entweder zu teuer oder technisch schwer realisierbar sind. Diese Arbeit stellt eine neuartige, bildbasierte Methode vor, mit der die Extrusionsbreite als zentrale Kenngröße präzise gemessen werden kann. Hierzu werden Mikroskopaufnahmen des Extrudats erfasst und mithilfe eines neuronalen Netzwerks (U-Net) automatisiert ausgewertet. Die gemessene Extrusionsbreite wird anschließend mit den Geschwindigkeiten von Druckkopf und Vorschub korreliert, um Fehler quantitativ zu erfassen und das Ein-Ausgangsverhalten der Druckmechanik zu analysieren. Auf diese Weise entsteht die Grundlage für modell- oder KI-basierte Regelstrategien, die eine modellbasierte Echtzeitregelung des Volumenstroms ermöglichen und die Druckqualität nachhaltig verbessern können.

Stichwörter: 3D-Druck, Material-Extrusion, Bildverarbeitung, Data Science

Abstract

Extrusion-based 3D printing offers a wide variety of materials, each of which places different demands on the extrusion process. Material feed is usually controlled openly; feedback control has not yet been implemented because suitable sensors for closing a control loop are either too expensive or technically difficult to implement. This work presents a novel, image-based method that can be used to precisely measure the extrusion width as a key parameter. For this purpose, microscope images of the extrudate are captured and automatically evaluated using a neural network (U-Net). The measured extrusion width is then correlated with the speeds of the print head and feed rate in order to quantitatively detect errors and analyse the input-output behaviour of the printing mechanism. This creates the basis for model- or AI-based control strategies that enable model-based real-time control of the volume flow and can improve print quality in the long term.

Keywords: 3D Printing, Material Extrusion, Image Processing, Data Science

1 Einleitung

Der extrusionsbasierte 3D-Druck gewinnt in der industriellen Fertigung zunehmend an Bedeutung, da er kostengünstig komplexe Geometrien ermöglicht. In Form von Filamenten, Granulaten oder Pasten [1] lassen sich vielfältige Materialien verarbeiten, darunter faserverstärkte Kunststoffe, thermoplastische Elastomere (TPE), Keramik, Metalle oder Hydrogele. Diese Materialien stellen hohe Anforderungen an den Extrusionsprozess: Der Materialfluss muss stets präzise mit den Bewegungen des Druckkopfes synchronisiert werden. Typische Herausforderungen ergeben sich durch die Elastizität von TPE, die Sprödigkeit gefüllter Filamente oder die komplexen rheologischen Eigenschaften pastöser Materialien. Da mechanische Optimierungen allein nicht ausreichen, wurde eine Methodik entwickelt, um Extrusionsfehler präzise zu quantifizieren. Diese basiert auf der optischen Messung der Extrusionsbreite mit einer günstigen Mikroskopkamera in Kombination mit der Druckerkinematik als Messsystem. Ziel ist es, kostengünstige Hardware zu nutzen, die auch im

privaten Bereich einsetzbar ist. Mit Hilfe dieser Messungen kann eine Systemidentifikation durchgeführt werden, die es erlaubt, Parameter für physikalisch basierte Modelle zu bestimmen bzw. rein datengetriebene Modelle zu entwickeln. Mit dieser Systembeschreibung können wiederum modellbasierte Regler entworfen werden, die optimale Bewegungsprofile beispielsweise zur Ansteuerung des Extrusionsantriebes ermitteln, bzw. die Druckgeschwindigkeit an die Materialeigenschaften anpassen.

2 Grundlagen

Für die Erstellung eines Bauteils mittels extrusionsbasierter 3D-Druckverfahren, werden die Geometriedaten zunächst an einen sogenannten Slicer übertragen. Der Algorithmus des Slicers zerlegt das Modell in einzelne Schichten (Layer), die in der Regel einige Zehntelmillimeter hoch sind. Jedes Layer besteht wiederum aus verschiedenen Druckpfaden, die der 3D-Drucker sukzessive aufbaut, indem er den Druckkopf über das Druckbett bewegt und dabei Material durch den Extruder aufbringt. Neben der Druckpfadgeometrie legt der Slicer auch die Tangentialgeschwindigkeit des Druckkopfes, v_{head} sowie indirekt die Drehgeschwindigkeit des Förderrades bzw. der Förderschnecke bei Filament- bzw. Pastenextruders fest. Es wird oft angenommen, dass Drehbewegung und der durch die Düse austretende Volumenstrom Q_{out} konstant proportional zueinander sind. Dieses vereinfachte mathematische Modell kann ausgedrückt werden als:

$Q_{out} = Q_{in}$, wobei für einen Filamentextruder gilt: $Q_{in} = A_{fil} \cdot v_f$, mit der Filamentquerschnittsfläche A_{fil} und der Filamentfördergeschwindigkeit v_f . Um hieraus die Extrusionsbreite zu berechnen, muss v_{head} bekannt sein sowie ein Modell, dass die Querschnittsfläche des Extrudats, A_{ext} beschreibt. Slicer benutzen meist ein Rechteck bzw. ein abgerundetes Rechteck, um die tatsächliche Querschnittsfläche anzunähern (s. Abbildung 1) mit der Extrusionsbreite w und der Layerhöhe h .

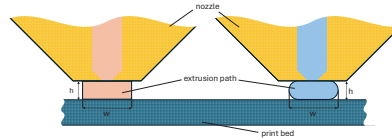


Abbildung 1: Modelle der Extrudatquerschnittsfläche (links: Rechteck, rechts: abgerundetes Rechteck)

Daraus ergibt sich für den abgegebenen Volumenstrom $Q_{out} = v_{head} \cdot A_{ext}$ und für die Annahme eines abgerundeten Rechtecks als Querschnittsfläche:

$$Q_{out} = v_{head} \cdot \left[\frac{\pi}{4} h^2 + h \cdot (w - h) \right] \quad (1)$$

$$= A_{fil} \cdot v_f$$

Bei vorgegebener Geometrie (A_{ext}) und v_{head} ergibt sich somit die Fördergeschwindigkeit zu

$v_f = v_{head} \cdot \frac{A_{ext}}{A_{fil}}$. Dieses stark vereinfachte Modell besagt, dass die Drehgeschwindigkeit des Triebrades (auch Drive Gear) und Druckgeschwindigkeit für eine gegebene Querschnittsfläche in einem festen Verhältnis zueinanderstehen müssen. Anders ausgedrückt: Die Geschwindigkeitsprofile v_f sind idealerweise nur skalierte Versionen von v_{head} . In der Praxis führen jedoch verschiedene Effekte – wie nichtlineare Viskosität, Elastizität des Materials, Schlupf im Fördersystem oder Druckaufbau– dazu, dass der tatsächliche Volumenstrom und damit die Extrusionsbreite nichtlinear von den Antriebsbedingungen abhängen. Es existieren bereits Methoden wie Nonlinear Extrusion Control [2] oder Pressure Advance [3], die versuchen, diese Nichtlinearitäten zu kompensieren. Sie erfordern jedoch einen menschlichen Beobachter, der Kalibriermuster visuell bewertet, und basieren

auf starren Modellen. Die hier vorgestellte Methode automatisiert diesen Prozess vollständig und liefert deutlich genauere Daten. Damit lassen sich komplexere Modelle erstellen, die unterschiedliche Materialeigenschaften abbilden und den Extrusionsprozess verbessern.

3 Methodik

Ziel der Methode ist es, präzise Messdaten zu gewinnen, um das dynamische Verhalten des Extrusionsvorgangs zu charakterisieren und darauf aufbauend Maßnahmen zur Verbesserung der Druckgenauigkeit zu entwickeln. Abbildung 2 veranschaulicht den Ablauf schematisch: Zunächst werden Experimente durchgeführt, in denen die Reaktion des Systems (Materialextrusion) auf verschiedene Stellgrößen u (z. B. v_f , v_{head} , Drucktemperatur) untersucht wird. Auf Basis dieser Daten wird ein Modell erstellt, das das Verhalten möglichst exakt beschreibt und als Grundlage für modellbasierte Regelungsmethoden dient. Diese Methoden ermöglichen wiederum die Bestimmung optimaler Stellgrößen, mit denen der Druckfehler minimiert werden kann.

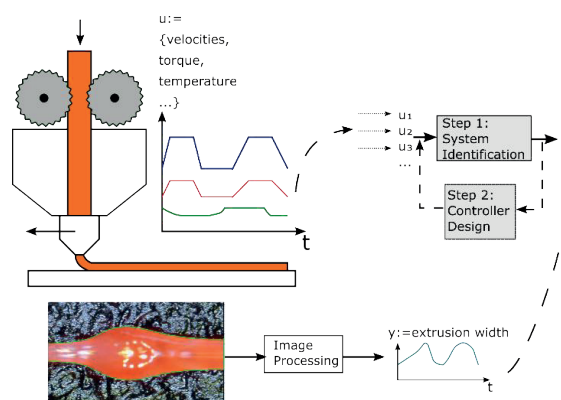


Abbildung 2: Methodikübersicht zur Systemidentifikation und Reglerentwurf für den Extrusionsbasierten 3D-Druck

In dieser Arbeit steht die Gewinnung von Messdaten im Vordergrund. Anhand eines Beispiels wird gezeigt, wie sich daraus ein optimales Geschwindigkeitsprofil ableiten lässt, um den praktischen Nutzen der Methode zu verdeutlichen. Die Methode wurde praktisch nur bei FDM-3D-Druckern angewandt, eine Übertragung auf Extrusionsbasiertem 3D-Druck allgemein sollte möglich sein.

4 Experimentelle Durchführung

Zunächst wurde ein Experiment entworfen, um das Extrusionsverhalten eines FDM-Druckers unter verschiedenen Bedingungen zu untersuchen. Der Drucker erzeugt dabei einen Extrusionspfad mit definierter Breite und Höhe gemäß Gleichung 1. Während der Bewegung über das Druckbett wird v_{head} mehrfach abrupt zwischen einem hohen und einem niedrigen Wert gewechselt, sodass sich der Volumenstrom entsprechend anpassen muss (vgl. Gl. 1). Zur Datenerfassung wurde die Firmware des Druckers so erweitert, dass die Soll-Positionen aller Achsen mit einer Abtastzeit von etwa 2 ms aufgezeichnet werden. Nach Abschluss des Drucks fährt eine Mikroskopkamera (s. Abbildung 3) langsam entlang des Pfades und nimmt mehrere überlappende Bilder auf, die jeweils mit den Koordinaten des Aufnahmeorts im Bezugssystem des Druckers verknüpft werden. In jedem aufgenommenen Bild wird der Extrusionspfad segmentiert und in eine Pixelmaske überführt. Die Breite des Pfades ergibt sich dabei aus der Anzahl der erfassten Pixel. Durch die Verknüpfung der Bilddaten mit den Koordinaten des Druckbetts können die ermittelten Extrusionsbreiten den aufgezeichneten Zeit- und Geschwindigkeitsprofilen zugeordnet werden. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse: dargestellt sind die Extrusionsbreite aus fünf Messungen inklusive Mittelwert und

Standardabweichung, die Geschwindigkeitsprofile v_f und v_{head} sowie die berechneten Volumenströme Q_{in} und Q_{out} .

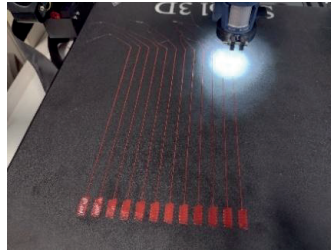


Abbildung 3: Versuchsaufbau

5 Mechanische Korrekturmaßnahmen

Herkömmliche 3D-Drucker verwenden meist Schrittmotoren, die im offenen Regelkreis betrieben werden, sodass die tatsächliche Rotorposition nicht erfasst wird. Um Schrittverluste zu erkennen, wurden Tests durchgeführt, bei denen sich die x- und y-Achse mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus der Endposition bewegten und anschließend langsam zurückgeführt wurden, bis der Endschalter auslöste. Ein Schrittverlust lag vor, wenn die gezählten Schritte nicht der erwarteten Anzahl entsprachen. Mit dieser Methode lassen sich die maximal zulässige Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmen. In den Versuchen zeigte sich jedoch, dass die Firmware durch Begrenzung dieser Werte verhindert, dass mechanische Grenzbereiche überschritten werden – entsprechend traten keine Schrittverluste auf.

Um den Einfluss von Unebenheiten des Druckbetts auf die Extrusionsbreite zu vermeiden, verfügen viele FDM-Drucker über eine automatische Bettnivellierungsfunktion. Dabei scannt ein Abstandssensor die Druckfläche und ermittelt Schiefelage sowie lokale Höhenabweichungen. Während des Drucks korrigiert die Firmware diese durch minimale Anpassungen der Z-Position in Abhängigkeit von den X- und Y-Koordinaten, sodass sowohl die Düse als auch die Mikroskopkamera stets einen konstanten Abstand zum Druckbett einhalten. Die Firmware wurde so verändert, dass eine bilineare Interpolation auf Basis eines sehr feinen Messrasters durchgeführt werden kann, um Fehler zu minimieren. Zusätzlich musste die Genauigkeit des Abstandssensors bewertet werden. Dazu wurde mehrfach an der gleichen Position eine Abtastung vorgenommen. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für 100 Abtastungen. Umgerechnet ergibt sich eine Genauigkeit von $\text{ca } \pm 7\mu\text{m}$ in 95% der Tests und ist somit hinreichend genau.

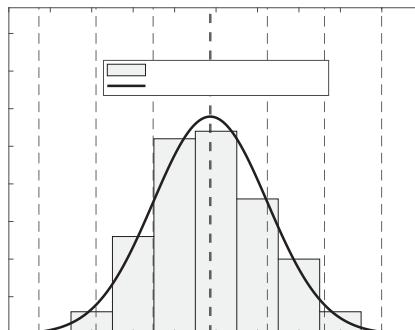


Abbildung 4: Statistische Auswertung der Abtastgenauigkeit des Abstandssensors

6 Bildaufnahme, Referenzierung und Kamerakalibrierung

Die benutzte Mikroskopkamera verfügt über eine Auflösung von 2560x1440 Pixel. Durch eine Kamerakalibrierung werden Abbildungsfehler aufgrund von Linsenverzerrungen bzw. Fehlstellung von Linse und CCD-Sensor korrigiert. Zusätzlich wird der Abbildungsmaßstab gewonnen, um die tatsächliche Extrusionsbreite zu bestimmen. Für die Kalibrierung müssen Punktkorrespondenzen bestimmt werden, also Abbildungspunkte den Objektpunkten zugeordnet werden, die die bekannten Koordinaten in der realen Welt darstellen. Aufgrund der geringen Objektgröße von wenigen Millimetern war es nicht möglich, wie üblich ein Kalibriermuster auf Papier auszudrucken. Stattdessen wurde ein Kalibriermaßstab für Mikroskope benutzt. Ein Algorithmus detektiert die Zellzentren, die sich in einem Rasterabstand von 100µm befinden und ordnet diese Objektpunkten zu (s. Abbildung 5). Um die Kamera im Koordinatensystem des Druckers zu referenzieren und somit später die ermittelte Extrusionsbreite zuzuordnen, wurde diese an einem 3D-gedruckten Kreuz ausgerichtet (s. Abbildung 6; Das blaue Kreuz dient als Referenz.). Die Z-Komponente wird ermittelt, indem der Abstand zum Druckbett variiert wird, bis der dahinterliegende Pfad scharf abgebildet ist.

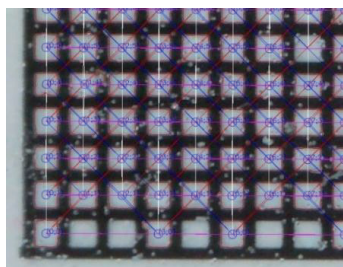


Abbildung 5: Kalibriermuster und detektierte Objektpunkte

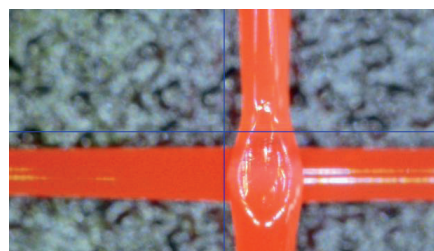


Abbildung 6: Referenzierung der Kamera im Koordinatensystem des 3D-Druckers

7 Segmentierung und Bestimmung der Extrusionsbreite

Zur Bestimmung der Extrusionsbreite ist eine Pixelmaske erforderlich, die das Extrudat vom Hintergrund trennt. Dafür wurden klassische Verfahren wie farbbasierte Schwellenwertbildung, Kantenerkennung (Sobel, Canny, Difference of Gaussian) und K-Means-Clustering untersucht. Diese Methoden erwiesen sich jedoch als wenig robust gegenüber Variationen der Eingangsbilder (s. Abbildung 7): Unterschiede in Filamentfarbe, Hintergrund (z. B. Glas- oder Raues Druckbett, Leim), Lichtreflexionen sowie Transparenzänderungen des Filaments durch variierende Druckhöhen führten zu deutlichen Segmentierungsfehlern. Zur Erhöhung der Robustheit wurde ein neuronales Netz, konkret ein U-Net, trainiert, um die Extrusionspfade im Bild zu segmentieren. U-Net gehört zum Bereich des überwachten maschinellen Lernens und wird häufig für die Segmentierung von Mikroskopaufnahmen eingesetzt, da es mit vergleichsweise wenigen Trainingsdaten auskommt, die lediglich eine grobe manuelle Vorsegmentierung erfordern [4], [5]. Für die Segmentierung in Abbildung 8 (grüne Kontur) wurde das U-Net mit lediglich neun manuell vorsegmentierten Bildern trainiert. Zur Bestimmung der tatsächlichen Extrusionsbreite werden die Pixel der Binärmaske in horizontaler Richtung zeilenweise gezählt. Die realen Abmessungen ergeben sich über den Abbildungsmaßstab aus der vorhergehenden Kamerakalibrierung. Die Zuordnung zum 3D-Drucker-Koordinatensystem erfolgt durch Labeln jedes Bildes mit seinem Aufnahmeort, wobei das Pixel in der Bildmitte mit diesem Ort korrespondiert.

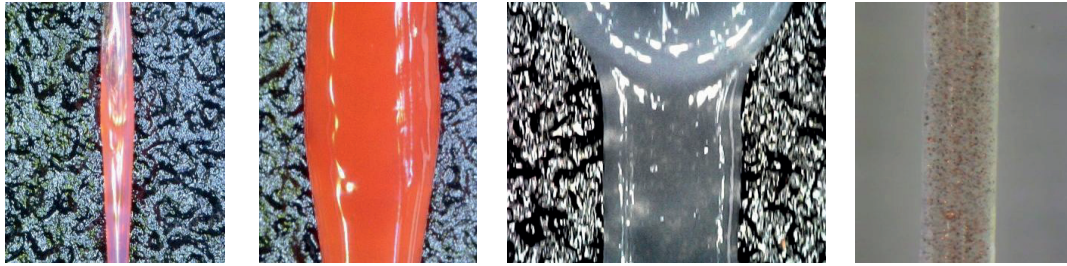


Abbildung 7: Variation der Eingangsbilder

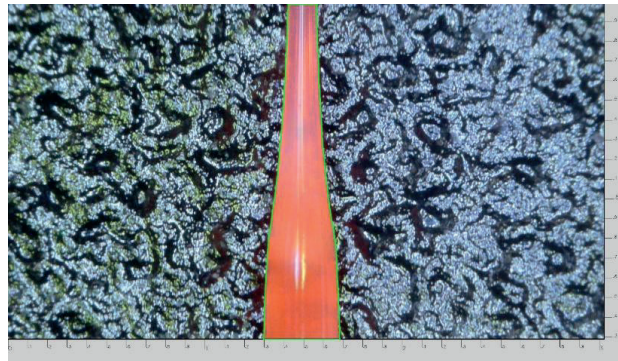


Abbildung 8: Segmentiertes Extrudat und Zuordnung im Koordinatensystem des 3D-Druckers

8 Praktische Anwendung der Methode zur Optimierung der Druckgenauigkeit

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse einer Versuchsreihe, in der ein einfacher Druckpfad mit konstanter Extrusionsbreite von 900 μm gedruckt werden sollte. Die Versuche wurden zwölfmal wiederholt, um die Reproduzierbarkeit zu prüfen (fünf davon in Abbildung 11 dargestellt). Während des Druckvorgangs variiert die Tangentialgeschwindigkeit (rot) zwischen 10 mm/s und 40 mm/s. Die 3D-Drucker-Steuerung skaliert die Geschwindigkeit des Triebrads (blau) entsprechend Gl. 1. Die tatsächlich gemessene Extrusionsbreite weicht jedoch deutlich vom Sollwert ab und zeigt ein dynamisches Verhalten. Im Folgenden wird exemplarisch gezeigt, wie auf Basis dieser Messdaten ein dynamisches Modell entwickelt werden kann, das als Grundlage dient, ein optimales Geschwindigkeitsprofil des Triebrads für das Experiment zu bestimmen.

8.1 Systemidentifikation

Ziel ist es, eine Systembeschreibung zu entwickeln, die das Verhalten in Abbildung 11 möglichst genau abbildet. Es wird angenommen, dass die Systemantwort Y sich aus einem statischen Anteil Y_{stat} und einem dynamischen Anteil Y_{dyn} zusammensetzt. Der statische Anteil beschreibt die mittlere Abweichung über einen Vorfaktor K_s , der die Abweichung zwischen Gl. 1 und der mittleren (Median) gemessenen Extrusionsbreite beschreibt. Es wird Schlupf bei der Förderung des Filaments als Ursache vermutet. Um den dynamischen Anteil zu modellieren, muss neben v_f zusätzlich die Beschleunigung a_f betrachtet werden (s. Abbildung 9). Es ist zu sehen, dass das System auf einen Beschleunigungsimpuls zunächst schnell ansteigend reagiert und langsam abfällt. Dieses Verhalten wurde mit einem Bandpass modelliert. Die Parameter der Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{K \cdot s}{(1+s \cdot T_1)(1+s \cdot T_2)}$$

wurden an die Messdaten gefittet, wobei in Abhängigkeit vom Beschleunigungsvorzeichen jeweils ein eigener Parametersatz (K, T_1, T_2) ermittelt wurde, um den nichtlinearen Charakter des Systems abzubilden.

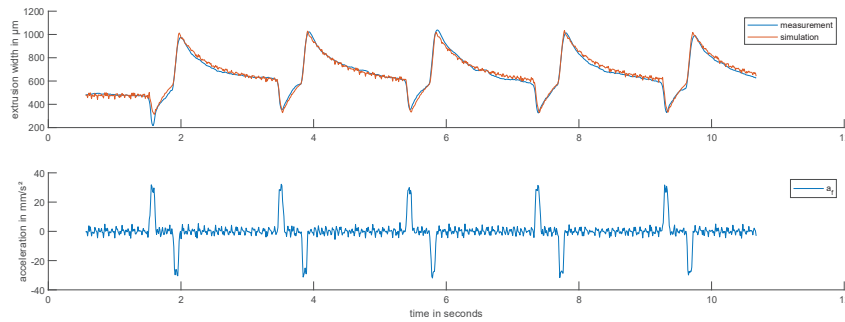


Abbildung 9: Transientenverhalten des Extruders

8.2 Modellbasierte Bestimmung des optimalen Geschwindigkeitsprofils

Das entwickelte Modell dient dazu, ein Geschwindigkeitsprofil des Förderantriebs zu bestimmen, das den Fehler in der Extrusionsbreite minimiert, während die Soll-Druckgeschwindigkeit v_{head} beibehalten wird. Hierfür können verschiedene modellbasierte Regelungsstrategien eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein modellprädiktiver Regler (Model Predictive Control, MPC) implementiert, der das optimale Geschwindigkeitsprofil berechnet. Dabei simuliert der Regler in jedem Zeitschritt mithilfe des Modells und der Sollwertvorgabe (Extrusionsbreite w) ein kurzes Vorhersagefenster mit unterschiedlichen Kombinationen der Stellgrößen (v_{head} , v_f). Die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert dient als Gütekriterium, ergänzt durch die Nebenbedingung, dass die Änderungsrate von v_f (Beschleunigung) begrenzt bleibt. Der Algorithmus wählt die Stellgrößenkombination, die diese Gütefunktion minimiert, übernimmt jedoch nur den ersten Wert. Anschließend wird das Zeitfenster verschoben und der Vorgang wiederholt. Abbildung 10 zeigt das ermittelte Geschwindigkeitsprofil. Die statische Abweichung (erste Sekunde) wird durch eine allgemein höhere Geschwindigkeit kompensiert, während Unterextrusion durch erhöhte und Überextrusion durch verringerte Geschwindigkeiten ausgeglichen wird. Negative Geschwindigkeiten treten ebenfalls auf und entsprechen einer Retraktion. Mit dem verwendeten Modell treten keine Sollwertabweichungen mehr auf, jedoch musste hierzu der Maximalwert von a_f erhöht werden. MPC könnte in solchen Fällen erweitert werden, dass automatisch v_{head} als weiterer Freiheitsgrad begrenzt wird.

Es kann angenommen werden, dass dieses Geschwindigkeitsprofil unter der Voraussetzung optimal ist, dass das Modell die Realität ausreichend genau und generalisierbar abbildet. Ein Anspruch auf absolute Gültigkeit wird jedoch nicht erhoben; das Profil dient primär der Demonstration der Methodik.

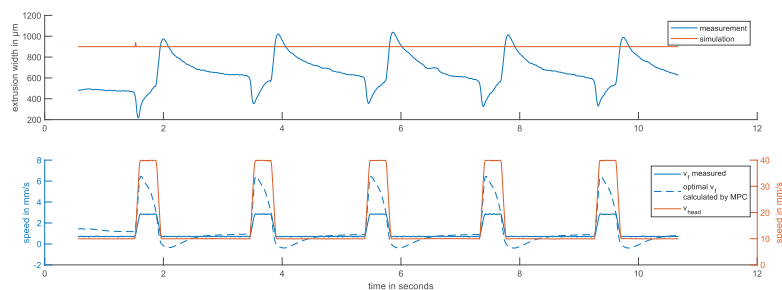


Abbildung 10: Ermittelter Geschwindigkeitsprofil für variierende Druckkopfgeschwindigkeit

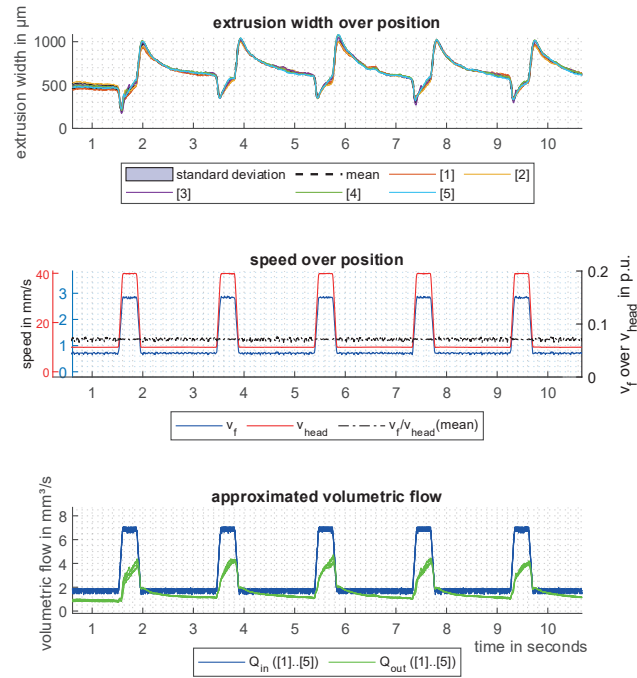


Abbildung 11: Messergebnisse für ein Geschwindigkeitssprungexperiment und einer Soll-Extrusionsbreite von 900 μm

9 Fazit

Die hier vorgestellte Methode zeigt, wie sich durch die Kombination präziser Bildanalyse, dynamischer Systemmodellierung und modellbasierter Regelung die Druckgenauigkeit verbessern lässt. Hierfür genügt die Erweiterung eines herkömmlichen 3D-Druckers um eine Mikroskopkamera. Zukünftige Arbeiten sollten die Entwicklung generalisierbarer Modelle vorantreiben und zusätzlich weitere Prozessgrößen, wie Drucktemperatur oder das Drehmoment des Antriebs einbeziehen. Außerdem sollten effiziente Algorithmen entwickelt werden, die die ermittelten Geschwindigkeitsprofile in Echtzeit auf Mikrocontrollern berechnen.

10 Literatur

- [1] J. Rudolph, F. Lorenz, R. Werner, K. Chaowarat, und B. Kunz, „3D-printed air-gap winding for electric machines in high temperature environment“, in *Electromechanical Drive Systems 2021; ETG Symposium*, 2021, S. 1–5.
- [2] Marlin Firmware Project, „Marlin Firmware G-Code Reference“. [Online]. Verfügbar unter: <https://marlinfw.org/docs/gcode/M592.htm> (abgerufen am 20. September 2025)
- [3] S. A. Tronvoll, S. Popp, C. W. Elverum, und T. Welo, „Investigating pressure advance algorithms for filament-based melt extrusion additive manufacturing: theory, practice and simulations“, *Rapid Prototyp. J.*, Bd. 25, Nr. 5, S. 830–839, Juni 2019, doi: 10.1108/rpj-10-2018-0275.
- [4] O. Ronneberger, P. Fischer, und T. Brox, „U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation“. arXiv, 2015. doi: 10.48550/ARXIV.1505.04597.
- [5] R. Azad u. a., „Medical Image Segmentation Review: The Success of U-Net“, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Bd. 46, Nr. 12, S. 10076–10095, Dez. 2024, doi: 10.1109/tpami.2024.3435571.

Closing Session

Visionen drucken – Zukunft gestalten

Wie wir mit Robotik lokale Ressourcen nutzen und globale Systeme neu denken können

Ada Matthes

Produktdesignerin (B.A.), spezialisiert auf robotische Fertigung, nachhaltige Materialien und spekulatives Design

Einleitung

Designer, Ingenieure, Biologen, Wissenschaftler aus allen Gebieten – wir alle forschen und lernen, um die Welt ein Stück zu verändern. Doch in welche Richtung wollen wir sie verändern?

Mit der Entwicklung des 3D-Drucks hält das Potenzial Einzug, die Massenindustrie neu zu denken: weg von zentralisierter Großproduktion, hin zu dezentralen, adaptiven Systemen, in denen lokale Ressourcen, Reststoffe und digitale Werkzeuge symbiotisch zusammenwirken.

Der Star dieser Vision ist ein kleiner 3D-gedruckter Hocker namens **Galoppi** – gefertigt aus recyceltem Polypropylen mit Glasfaseranteil, gedruckt in rund drei Stunden von einem sechsachsigen Industrieroboter.

Galoppi ist kein bloßes Objekt, sondern ein **Demonstrator für die Zukunft der Fertigung**: für adaptive, lokale, zirkuläre und emotionale Produktionsweisen.



Von der Stuhlgeschichte zur Zukunft der Fertigung

Die Geschichte des Stuhls ist ein Abbild unseres technologischen Fortschritts – vom handwerklich gefertigten Wikingerstuhl über Thonets gebogenen Bugholzstuhl bis zum Bauhaus mit Marcel Breuers Stahlrohrmöbeln. Mit dem Panton Chair der 1960er Jahre begann das Zeitalter der Kunststoffe – demokratisierte Formen, aber auch die Schattenseiten der Wegwerfproduktion. Der allgegenwärtige Monoblock-Stuhl steht heute sinnbildlich für die industrielle Massenfertigung: effizient, billig, global – aber ohne Bindung, ohne Emotionalität, ohne

Rücksicht auf Ressourcen.

Mit dem 3D-Druck eröffnet sich eine neue Perspektive: **Produktion wird wieder lokal, adaptiv und menschennah.**

3D-Druck als Verfahren unserer Zeit

3D-Druck ist das erste wirklich **digitale Handwerk** – eine Brücke zwischen industrieller Präzision und individueller Gestaltung.

Jedes Design beginnt digital und ist **parametrisch** aufgebaut: Maße, Form, Proportionen lassen sich in Sekunden anpassen.

Diese Parametrik ermöglicht **Print-on-Demand** – Produkte werden nur dann hergestellt, wenn sie tatsächlich gebraucht werden.

Der Roboter druckt nur, wenn ein Auftrag existiert. Das spart Transportwege, Lagerflächen und Energie.

Vor allem aber schafft es eine neue Form der Beziehung zwischen Mensch und Objekt. Denn etwas, das eigens für uns gefertigt wurde, behalten wir länger – ein Prinzip, das man im Design als **emotionale Nachhaltigkeit** bezeichnet.



Kreisläufe statt Abfall – Zirkuläres Design

Galoppi ist zirkulär gedacht. Das Material kann geschreddert, aufbereitet und erneut verwendet werden.

So entsteht ein geschlossener Materialkreislauf, der sich auf viele Werkstoffe übertragen lässt: von Beton, Holz und Ton bis zu neuen biobasierten Materialien wie Myzelium.

Myzel – das Wurzelgeflecht von Pilzen – ist dabei ein Beispiel für die Symbiose von Natur und Technologie. Es wächst auf Abfallstoffen, ist biologisch abbaubar und kann zu stabilen Strukturen geformt werden.

Zirkuläres Design bedeutet, **Ressourcen als Teil**

lebendiger Systeme zu verstehen – als Stoffströme, die sich ständig wandeln.

Dezentrale Produktion – globale Wirkung

Ein Galoppi wurde in Berlin entwickelt, ein weiterer in München, ein dritter in Australien. Nur die digitale Datei reiste über den Ozean, nicht das Objekt selbst.

So entsteht eine neue Produktionslogik: **lokal, vernetzt, resilient.**

Mit Unternehmen wie *Ginger Additives* in Mailand, die großformatige Pellet-Extrusionssysteme entwickeln, wird diese Vision greifbar.

Pellet-Extrusion ersetzt teures Filament, reduziert CO₂ und erlaubt die Nutzung lokaler Recyclingstoffe.

Die Technologie wird dadurch demokratisiert – **Robotik wird zugänglich**, auch für kleinere Studios und Werkstätten.

Solarpunk – eine optimistische Zukunft denken

Technologie allein schafft keine Zukunft.

Wir müssen uns entscheiden, in welche Richtung wir sie lenken.

Unsere Gegenwart oszilliert zwischen zwei Zukunftsbildern:

Cyberpunk, der dystopischen Vision einer technokratischen Welt,

und **Solarpunk**, einer Bewegung, die eine positive, kooperative Zukunft entwirft.

Solarpunk verbindet technologische Innovation mit ökologischer Verantwortung.

Es steht für **Gestaltung im Einklang mit der Natur** – für Systeme, die regenerativ statt destruktiv sind.

3D-Druck und Robotik können Werkzeuge dieser Zukunft sein, wenn wir sie zur Stärkung lokaler Ökonomien und zirkulärer Prozesse einsetzen.

Kooperation als Schlüssel – der „Krebs Cycle of Creativity“

Um eine solche Zukunft zu gestalten, müssen wir Disziplinen verbinden.

Designer, Ingenieure und Wissenschaftler sprechen oft unterschiedliche Sprachen – doch Innovation entsteht dort, wo sie sich treffen.

Die Designerin und Forscherin **Neri Oxman** beschreibt dies als „*Krebs Cycle of Creativity*“ – ein Modell, in dem Kunst, Design, Wissenschaft und Technik zyklisch ineinandergreifen.

Diese Idee steht sinnbildlich für die Aufgabe unserer Zeit:

Kooperation statt Konkurrenz.

Wir müssen Systeme nicht zerstören, sondern sanfte umlenken –

vorhandene Strukturen verstehen, mit ihnen arbeiten, sie symbiotisch verändern.

Fazit

3D-Druck ist mehr als ein Fertigungsverfahren – er ist ein kulturelles Werkzeug.

Er ermöglicht, Produktion neu zu denken: demokratisch, dezentral und zirkulär.

Wenn wir beginnen, Technologien als Teil lebendiger Systeme zu begreifen,

dann können wir eine Zukunft gestalten, die nicht dystopisch, sondern regenerativ ist.

Galoppi mag wackelig sein – aber er steht auf den festen Beinen einer Vision.

Posterpräsentation

Einfluss von Hatchingstrategie und Hatchingabstand auf das Eigenspannungspotenzial in LPBF-AlSi10Mg – Qualitative Bewertung mittels Cantilever-Methode

Sebastian Gersch ^{1*}, Carsten Schulz ², Jörg Bagdahn ³

^{1*} Hochschule Anhalt University of Applied Sciences ; sebastian.gersch@hs-anhalt.de

² Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg ; carsten.schulz@oth-regensburg.de

³ Hochschule Anhalt University of Applied Sciences ; joerg.bagdahn@hs-anhalt.de

* Korrespondenz-Autor: sebastian.gersch@hs-anhalt.de ;ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8842-274X>

Zusammenfassung

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) von AlSi10Mg führt aufgrund hoher lokaler Temperaturgradienten und wiederholter Aufheiz-/Abkühlzyklen zu ausgeprägten Eigenspannungszuständen, die Verzug und Bauteilversagen verursachen können. Die Hatchingstrategie, also die Anordnung und Abfolge der Belichtung der Schmelzspuren innerhalb einer Schicht, und der Hatchingabstand, d. h. der laterale Abstand zwischen zwei benachbarten Schmelzspuren, gehören zu den prozessseitigen Stellgrößen, mit denen diese Spannungen beeinflusst werden können. In dieser Arbeit wird das Eigenspannungspotenzial ausgewählter Hatchingstrategien qualitativ über die Verformung eines standardisierten Cantileversystems bewertet. Hierzu werden Cantilever in orthotroper Anordnung (X-/Y-Orientierung) aus AlSi10Mg im LPBF-Prozess gefertigt und nach einer optionalen Spannungsarmglühung (ASTM F3318 Condition SR1, 285 °C, 120 min, Luftabkühlung) durch Funkenerosion freigeschnitten. Die daraus resultierenden Versätze in Z-Richtung werden taktil vermessen und als Maß für das freigesetzte Eigenspannungspotenzial interpretiert.

Die Ergebnisse zeigen eine ausgeprägte Anisotropie: Y-orientierte Cantilever weisen im as-built-Zustand (AB) um den Faktor $\approx 1,8$ höhere Verformungen auf als X-orientierte. Innerhalb der Parallelstrategie führt ein abnehmender Hatchingabstand in X-Orientierung zu reduzierten Verformungen, während in Y-Orientierung der kleinste Hatchingabstand (P05, 50 μm) das maximale Verformungsniveau erzeugt. Das Spannungsarmglühen nach SR1 reduziert die absoluten Versätze auf etwa 40 % des ursprünglichen Niveaus, ändert jedoch die relative Rangfolge der Strategien nicht. Insgesamt zeigt sich, dass Hatchingstrategie, Hatchingabstand und Bauorientierung stark gekoppelt wirken und bereits auf Scanpfad-Ebene ein wirksamer Hebel zur qualitativen Beeinflussung des Eigenspannungspotenzials vorliegt. Die Cantilevermethode erweist sich dabei als robustes Werkzeug zur schnellen Bewertung solcher Strategiekombinationen.

Schlagwörter: Laser Powder Bed Fusion, AlSi10Mg, Eigenspannungen, Scanstrategie, Hatchingabstand, Cantilever

1 Einleitung

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) von Aluminiumlegierungen wie AlSi10Mg hat sich für Leichtbau- und Strukturbauteile etabliert, da komplexe Geometrien mit hoher Gestaltungsfreiheit und guten spezifischen mechanischen Eigenschaften realisiert werden. [1, 2] Gleichzeitig gelten prozessinduzierte Eigenspannungen als zentrale Herausforderung: Sie entstehen durch steile Temperaturgradienten, hohe Heiz- und Abkühlraten sowie die Behinderung der thermischen Dehnung an der Bauplatte und können zu Verzug, Rissbildung und eingeschränkter Maßhaltigkeit führen. [3]

Die Ausbildung dieser Eigenspannungen wird wesentlich durch die Wahl der Scanstrategie gesteuert. Schichtweise geführte Hatchingvektoren, deren Orientierung, Überlappung und Rotationsschema bestimmen die lokale Energiedichte, die effektive Scanvektorstärke und die Wärmestrompfade im Bauteil und damit den Spannungsaufbau. [4, 5]

Zahlreiche Arbeiten zeigen, dass unterschiedliche Scanmuster die Spannungsverteilung, die Verzugsneigung und die mechanischen Kennwerte in LPBF-Bauteilen signifikant beeinflussen. [4, 5, 6, 7]

Zur Bestimmung von Eigenspannungen stehen direkte Verfahren (z. B. Lochbohrmethode, Röntgen- oder Neutronenbeugung) sowie indirekte Verzugs- und Cantilevermethoden zur Verfügung. [8] Letztere nutzen die Verformung eines definierten Probekörpers nach Freischnitt als Maß für das gespeicherte Spannungsniveau und sind im LPBF-Kontext weit verbreitet, da sie einfach umzusetzen sind und sich gut mit numerischen Modellen koppeln lassen. [5]

Für AlSi10Mg existieren verschiedene Spannungsarmglühkonzepte. Die ASTM-Norm F3318 definiert hierfür standardisierte Zustände welche in Studien vielfach als Referenzzustand verwendet werden. [9]

In früheren Arbeiten wurde der Einfluss verschiedener Scanstrategien auf Spannungen und Verzug häufig in Kombination mit Simulationen untersucht, wobei Cantileverversuche als Kalibrierbasis dienten. [10]

Die vorliegende Arbeit löst die Cantileverversuche aus einem solchen erweiterten Kontext heraus und fokussiert bewusst die rein experimentelle, qualitative Bewertung des Eigenspannungspotenzials aus Cantileververformungen.

Die Ziele sind:

- systematische Untersuchung des Einflusses von Hatchingstrategie und Hatchingabstand auf das Verzugsverhalten eines standardisierten Cantileversystems in orthotroper Anordnung (X/Y),

- Bewertung der Wirkung einer Spannungsarmglühung nach ASTM F3318-SR1 auf das Eigenspannungsniveau,
- Ableitung von Tendenzen zur Auswahl spannungsarmer Scanstrategien im LPBF-Prozess für AlSi10Mg.

2 Material und Methoden

2.1 Werkstoff, Anlage und Prozessparameter

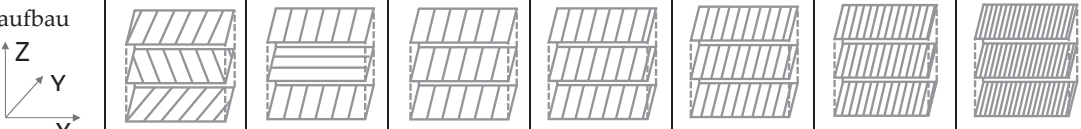
Als Werkstoff wurde AlSi10Mg-Pulver mit Partikelgrößenverteilung 20 - 63 μm der Firma EOS verwendet. [11] Die Proben wurden auf einer LPBF-Anlage des Typs SLM 280 HL (Nikon SLM Solutions) unter Argonatmosphäre gefertigt (Restsauerstoff < 4ppm). Die Schichtdicke betrug 30 μm . Der Volumenschmelzprozess erfolgte mit einer Laserleistung von 350 W und einer Scangeschwindigkeit von 1335 mm/s; der Laserstrahldurchmesser lag im üblichen Bereich für die Maschine (ca. 80 - 90 μm). Die eingesetzten Parameter entsprechen typischen Prozessfenstern für dichte AlSi10Mg-Bauteile.

Es wurden drei Hatchingstrategien betrachtet (vgl. Tabelle 1)

- Rotationsstrategie (Rotation): layerweise Drehung der Hatchingrichtung um einen festen Winkel von 66,7°,
- Orthogonalstrategie (OT): alternierende 0°/90°-Orientierung der Hatchvektoren,
- Parallelstrategie: konstante Scanrichtung entlang der Y-Achse mit variierenden Hatchingabständen.

Innerhalb der Parallelstrategie wurden Hatchingabstände von 50 μm , 80 μm , 110 μm , 140 μm und 170 μm untersucht. Diese werden im Folgenden als P05, P08, P11, P14 und P17 bezeichnet.

Tabelle 1: Schematische Darstellung der drei Hatchingstrategien (ROT, OT, P)

Strategie	Rotation	Ortho- gonal	Parallel				
Hatch- Winkel	66,7°	90°	0°				
Linien- Abstand	170 μm	170 μm	170 μm	140 μm	110 μm	80 μm	50 μm
Bez.	ROT	OT	P17	P14	P11	P08	P05
Schicht- aufbau							

2.2 Cantilevergeometrie und orthotropes Setup

Zur qualitativen Bewertung des Eigenspannungspotenzials wurde eine standardisierte Cantilevergeometrie verwendet. Der Bauteilkörper besitzt Abmessungen von 70 mm \times 10 mm \times 9 mm (vgl. Abbildung 1). In Längsrichtung ist ein Kammprofil ausgebildet: vertikale Stege und Zwischenräume weisen jeweils 1 mm Breite auf. Der horizontale Kammsteg hat eine Höhe von 3 mm und eine freie Länge von 50 mm, die den verformungsaktiven Bereich bildet.

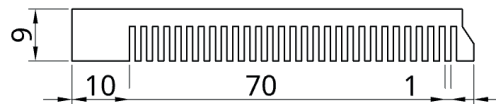


Abbildung 1: Bemaßung der Cantilevergeometrie (Tiefe = 10mm) [5]

Die Cantilever wurden in einem orthotropen Layout auf der Bauplatte angeordnet: Je Hatchingstrategie wurde ein Cantilever mit Längsachse in Maschinen-X-Richtung und ein Cantilever mit Längsachse in Maschinen-Y-Richtung aufgebaut. Dieses orthotrope Setup bildet die Richtungsabhängigkeit der Scanvektoren und der daraus resultierenden thermomechanischen Randbedingungen ab.

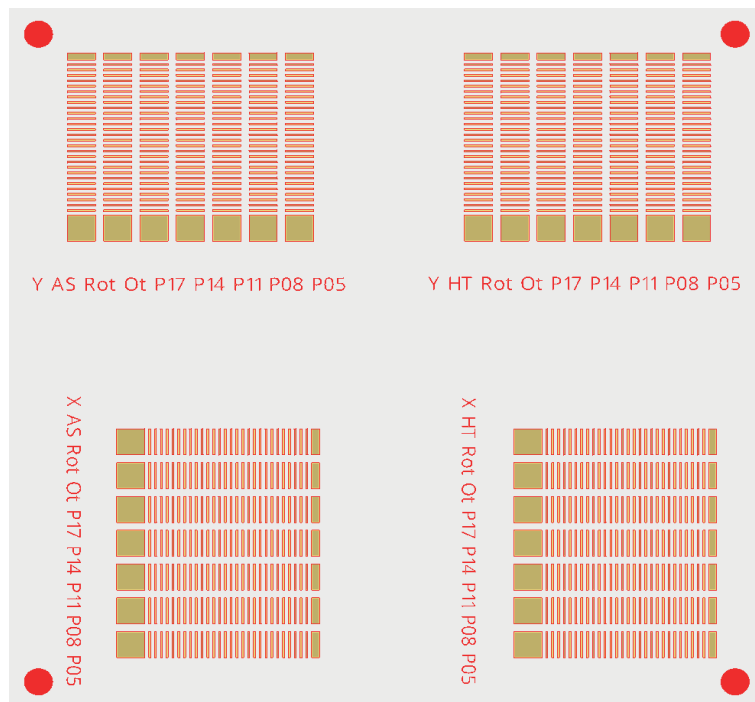


Abbildung 2: Schematische Anordnung der Cantilever auf der Bauplatte mit X- und Y-Orientierung. Draufsicht auf Fertigungsebene (X-Y) mit „as-build-Setup“ links und „HT-Setup“ rechts

2.3 Wärmebehandlung

Zur Untersuchung des Einflusses einer Spannungsarmglühung wurden die auf der Bauplatte befindlichen Cantilever nach dem Aufbau einer Wärmebehandlung in Anlehnung an ASTM F3318-18, Condition SR1, unterzogen. In normativen Dokumenten und Materialdatenblättern für LPBF-AlSi10Mg ist SR1 als Spannungsarmglühen bei 285 °C (± 14 °C) für 120 min (± 15 min) mit anschließender Luftabkühlung definiert. [9]

In dieser Arbeit wurden identische Parameter verwendet; der so behandelte Zustand wird im Folgenden als HT (heat treated) bezeichnet. Die Cantilever blieben während der Wärmebehandlung an die Bauplatte gebunden; der Freischnitt erfolgte erst anschließend (vgl. Abschnitt 2.4). Damit repräsentiert die nach SR1 gemessene Cantileververformung das relaxierte, aber nicht vollständig eliminierte Eigenspannungspotenzial der jeweiligen Strategiekombination. Ähnliche Spannungsarmglühungen wurden in der Literatur für AlSi10Mg und verwandte Al-Legierungen verwendet und zeigen einen signifikanten Spannungsabbau bei vergleichsweise geringer Gefügeumwandlung. [12]

2.4 Freischnitt und Verformungsmessung

Der Freischnitt der Cantileverkämme erfolgte mittels Funkenerosion mit einer Plattenelektrode aus Kupfer. Dieses Verfahren ist Stand der Technik in Cantilever-basierten Studien, da der Wärmeeintrag lokal begrenzt bleibt und der Einfluss des Trennprozesses auf den globalen Verzug im Vergleich zum vorgelagerten LPBF-Prozess als vernachlässigbar angesehen werden kann. [13]

Die Verformungen wurden taktil mit einer CNC-Koordinatenmessmaschine und 1-mm-Kugeltaster erfasst. Vor und nach dem Freischnitt wurden Referenz- und Messpunkte im Bereich der maximalen Durchbiegung relativ zu einem Koordinatensystem in der Bauplattenebene aufgenommen (vgl. Abbildung 3, links). Die Z-Koordinate dieses Punktes diente zur Bestimmung der Verformung Δz .

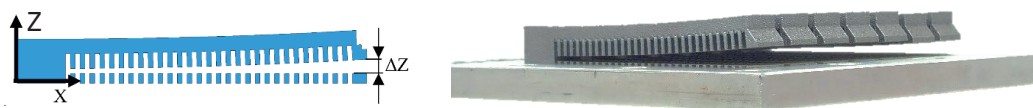


Abbildung 3: Schematische Darstellung Δz und Messpunkt nach Trennung des Cantilever links [5]; Foto der Cantilever nach dem Freischnitt: Sichtbare Verformungsspalte zwischen Kammsteg und Bauplatte

Positive Werte entsprechen einem Aufbiegen des Cantilevers von der Bauplatte weg. Die Cantileververformung wird als qualitatives Maß für das freigesetzte Eigenspannungspotenzial interpretiert (vgl. Abbildung 3, rechts). [14]

3 Ergebnisse

Zur Auswertung wurden die Versätze Δz der Cantileverspitze für alle Strategien in X- und Y-Orientierung sowohl im as-built-Zustand (AB) als auch nach Spannungsarmglühung (HT, SR1) betrachtet. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Cantilever Verformung aller Strategien

Strategie	X AB [mm]	Y AB [mm]	X HT [mm]	Y HT [mm]
ROT	1,51	2,14	0,7	0,93
OT	1,58	1,95	0,71	0,87
P17	1,49	2,55	0,69	1,03
P14	1,37	2,7	0,72	1,03
P11	1,29	2,71	0,48	1,03
P08	1,21	2,74	0,32	1,05

P05	1,15	2,8	0,22	0,95
-----	------	-----	------	------

3.1 Einfluss der Bauorientierung

Im as-built-Zustand liegen die Versätze in X-Orientierung zwischen 1,15 mm (P05) und 1,58 mm (OT). Der Mittelwert über alle Strategien beträgt 1,37 mm. In Y-Orientierung ergeben sich deutlich höhere Werte zwischen 1,95 mm (OT) und 2,80 mm (P05) bei einem Mittelwert von 2,51 mm. Die Y-orientierten Cantilever weisen damit ein um den Faktor $\approx 1,8$ höheres Verformungsniveau auf als die X-orientierten.

Nach Spannungsarmglühen sinkt die mittlere Verformung in X-Richtung auf 0,55 mm, in Y-Richtung auf 0,98 mm. Dies entspricht einer Reduktion auf etwa 40 % des ursprünglichen Niveaus; das Verhältnis der Mittelwerte bleibt mit einem Faktor von rund 1,8 nahezu unverändert.

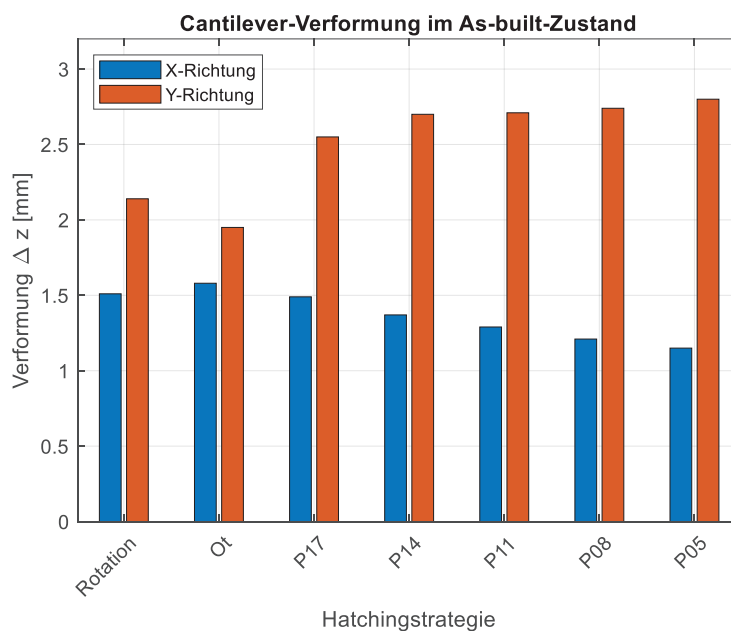


Abbildung 4: Balkendiagramm der Verformungen Δz im as-built-Zustand für alle Strategien, dargestellt für X- und Y-Orientierung

Die ausgeprägte Anisotropie deckt sich mit anderen Untersuchungen, die für LPBF-Bauteile eine starke Orientierungsabhängigkeit von Eigenspannungen und Verzugsneigung berichten. [15] Besonders kritisch ist demnach die Kombination aus Scanvektoren parallel zur Bauteillängsachse und hoher geometrischer Schlankheit, wie sie im Y-orientierten Cantilever vorliegt.

3.2 Einfluss von Hatchingstrategie und -abstand im as-built-Zustand

In X-Orientierung zeigt sich im as-built-Zustand ein systematischer Einfluss der Hatchingstrategie und des Hatchingabstands (siehe Abbildung 4).

Innerhalb der Parallelstrategie steigt der Verformung mit zunehmendem Hatchingabstand an. Kleine Hatchingabstände mit hoher Überlappung (P05, P08) führen damit in X-Orientierung zu einem vergleichsweise niedrigen Eigenspannungspotenzial, während große Abstände (P17) und die Orthogonal- bzw. Rotationsstrategie höhere Versätze verursachen.

In Y-Orientierung ergibt sich ein invertiertes Bild (vgl. Abbildung 4). Hier führt eine Verringerung des Hatchingabstands innerhalb der Parallelstrategie zu einer Zunahme der Verformung; P05 weist das höchste Verzugsniveau auf. Die Orthogonalstrategie bildet in Y-Orientierung dagegen den unteren Rand des Verzugsbereichs.

Die gegensätzlichen Trends in X- und Y-Orientierung machen deutlich, dass der Einfluss des Hatchingabstands stark richtungsabhängig ist. Ohne Berücksichtigung der Bauorientierung könnte der Eindruck entstehen, kleine Hatchingabstände seien generell spannungsarm; die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass dies nur für bestimmte Orientierungen zutrifft.

Abbildung 4 visualisiert diese Zusammenhänge und erlaubt den direkten Vergleich der Strategien im as-built-Zustand.

3.3 Wirkung der Spannungsarmglühung (SR1)

Die Spannungsarmglühung nach SR1 reduziert die Cantileverversätze für alle Strategien deutlich. Beispiele:

- P05, X: 1,15 mm → 0,22 mm (Reduktion um ≈ 81 %)
- P05, Y: 2,80 mm → 0,95 mm (Reduktion um ≈ 66 %)
- OT, X: 1,58 mm → 0,71 mm (Reduktion um ≈ 55 %)
- OT, Y: 1,95 mm → 0,87 mm (Reduktion um ≈ 55 %)

Über alle Strategien hinweg sinken die Versätze in X von 1,37 mm auf 0,55 mm und in Y von 2,51 mm auf 0,98 mm; der mittlere Abbau beträgt somit etwa 60 %.

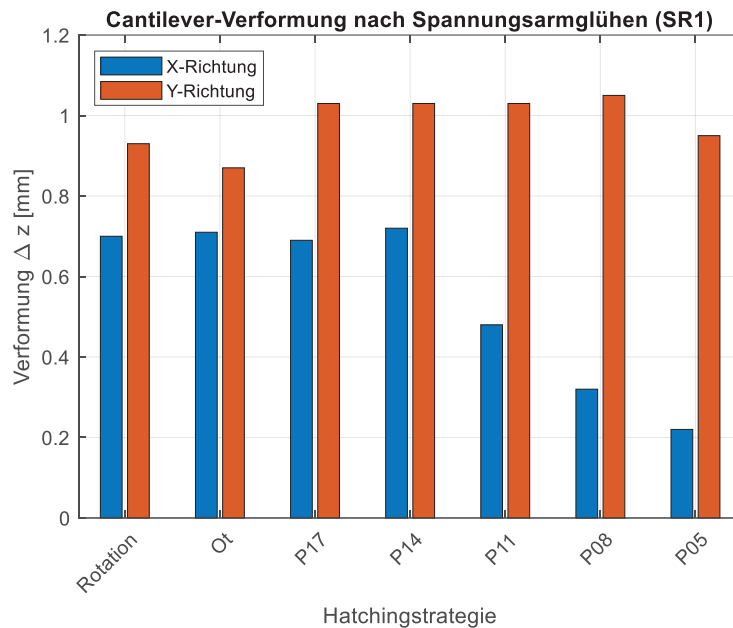


Abbildung 5: Balkendiagramm der Versätze Δz nach Spannungsarmglühen (HT) für alle Strategien, X- und Y-Orientierung.

Die relative Rangfolge der Strategien bleibt erhalten: Strategien, die im as-built-Zustand hohe Versätze aufweisen, bleiben auch nach Wärmebehandlung am oberen Ende des Verformungsspektrums. Dies stimmt mit Literaturbefunden überein, wonach Spannungsarmglühungen das Niveau von Eigenspannungen deutlich reduzieren, die durch Geometrie und Scanstrategie vorgegebenen Spannungsverteilungen jedoch nicht vollständig nivellieren. [16]

4 Diskussion

Die Cantileverversuche zeigen klar, dass die Bauorientierung einen dominanten Einfluss auf das Eigenspannungspotenzial besitzt. Die Y-orientierten Cantilever mit Scanvektoren, die näherungsweise entlang der Bauteillängsachse verlaufen, weisen sowohl im as-built-Zustand als auch nach Spannungsarmglühen deutlich höhere Versätze auf als die X-orientierten Proben. Dies ist konsistent mit dem in der Literatur beschriebenen Zusammenhang zwischen Scanvektorenlänge, Temperaturgradienten und verzugsrelevanten Eigenspannungen: Längere Vektoren und gerichtete Wärmeströme erhöhen die Dehnungsgradienten und damit das Risiko für hohe Residualspannungen. [17]

Die Hatchingstrategie wirkt in enger Wechselwirkung mit der Orientierung. In X-Orientierung führen kleine Hatchingabstände zu einer Verkürzung der effektiven Scanvektoren und zu einer stärkeren lateralen Überdeckung der Schmelzspuren, wodurch die thermischen Gradienten reduziert und die Eigenspannungen teilweise kompensiert werden. In Y-Orientierung koppeln dieselben Hatchingabstände mit langen, zur Bauteillängsachse parallelen Vektoren und hoher lokaler Energiedichte und verstärken damit die Spannungsbildung. Eine ähnliche Sensitivität

gegenüber Orientierung und Scanmuster wird in Arbeiten zu Stahl- und Nickelbasislegierungen berichtet. [15]

Die Spannungsarmglühung nach SR1 reduziert die Absolutwerte der Cantileverversätze deutlich, vermag aber die durch Prozessführung und Geometrie bedingte Anisotropie nicht zu eliminieren. Das entspricht dem allgemeinen Bild, dass bei moderaten Spannungsarmtemperaturen hauptsächlich Versetzungsdichten reduziert und lokale Spannungsmaxima abgebaut werden, während der grundlegende Spannungszustand in Form seiner Verteilung weitgehend erhalten bleibt. [16]

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich bewusst auf die Cantileververformung als indirektes Spannungsmaß, was im Kontext einer schnellen, experimentellen Strategiebewertung bewusst in Kauf genommen wird. Eine Kopplung mit direkten Spannungsmessungen (z. B. Lochbohrmethode, Röntgendiffraktometrie) oder mikroskopischen Analysen der Mikrostruktur (Textur, Porenverteilung) würde zusätzliche Einblicke in die Ursache-Wirkungs-Ketten liefern, war jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Auf Basis der orthotropen Cantileverversuche in LPBF- AlSi10Mg lassen sich folgende Kernaussagen treffen:

1. Bauorientierung als Haupttreiber des Verzugs:

Y-orientierte Cantilever zeigen im as-built-Zustand etwa 80 % höhere Versätze als X-orientierte Proben und bleiben auch nach Spannungsarmglühen die kritische Konfiguration. Die Bauorientierung ist damit ein primärer Hebel zur Beeinflussung des Eigenspannungspotenzials.

2. Richtungsabhängige Wirkung des Hatchingabstands:

In X-Orientierung führt ein kleiner Hatchingabstand (P05, P08) zu reduzierten Versätzen, in Y-Orientierung dagegen zum maximalen Verzugsniveau. Der Hatchingabstand kann somit nicht losgelöst von der Bauorientierung bewertet werden.

3. Einfluss der Hatchingstrategie:

Orthogonal- und Rotationsstrategien liegen in X-Orientierung am oberen, in Y-Orientierung teilweise am unteren Ende des Verzugsbereichs. Parallelstrategien mit großem Hatchingabstand sind in beiden Orientierungen spannungsintensiv, während kleine Abstände nur in günstiger Orientierung (X) vorteilhaft wirken.

4. Spannungsarmglühen als ergänzende Maßnahme:

Die Wärmebehandlung nach ASTM F3318-SR1 reduziert die Cantileverversätze um rund 60 % in beiden Orientierungen, verändert aber die relative Rangfolge der Strategien nicht. Strategisch ungünstige Kombinationen bleiben auch nach HT relativ kritisch.

5. Cantilevermethode als Werkzeug zur Strategiebewertung:

Die Kombination aus orthotropem Cantileverlayout, Erodierfreischnitt und taktiler Vermessung erlaubt eine robuste, experimentelle Bewertung des Eigenspannungspotenzials unterschiedlicher Hatchingstrategien und Bauorientierungen und eignet sich damit als Screening-Werkzeug für die Prozessentwicklung.

Zukünftige Arbeiten sollten die hier experimentell beobachteten Trends mit lokalen Spannungsmessungen und mikrostrukturellen Untersuchungen koppeln sowie den Einfluss weiterer Prozessvariablen (z. B. Schichtdicke, Vorwärmung, Rescanning) einbeziehen. Darüber hinaus bietet sich die Verwendung der vorliegenden Cantileverdaten zur Kalibrierung und Validierung vereinfachter inhärenter Dehnungsmodelle an, um spannungsarme Strategien auch numerisch effizient bewerten zu können.

Literatur

- [1] J. Noronha, Y. Conde, L. Thijs und J. Luyten, „AlSi10Mg hollow-strut lattice metamaterials by laser powder bed fusion with superior strength-to-weight efficiency,” *Materials Advances*, Bd. 5, Nr. 9, 2024, doi: 10.1039/d3ma00813d. pp. 4981- 4995
- [2] L. Zhao, A. A. Popovich und V. Sufiiarov, „Review on the correlation between microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg fabricated by laser powder bed fusion,” *Materials and Design*, Bd. 221, 110971, 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110971.
- [3] S. Chen, C. Li, X. Li, Z. Zhang, J. Liu und Y. Liu, „Review on residual stresses in metal additive manufacturing,” *International Journal of Extreme Manufacturing*, Bd. 4, Nr. 4, Art. 042002, 2022, doi: 10.1088/2631-7990/ac9c9e. pp. 5 - 9
- [4] A. Paraschiv, G. Matache und M. Vladut, „Assessment of Residual Stresses in Laser Powder Bed Fusion Manufactured IN 625,” *Materials*, Bd. 17, Nr. 2, Art. 413, 2024, doi: 10.3390/ma17020413. pp.10 - 14
- [5] S. Gersch, C. Schulz und J. Bagdahn, „Impact of Hatching Strategy on Mechanical Properties and Residual Stresses in Additively Manufactured AlSi10Mg Components,” in *The Minerals, Metals & Materials Series, TMS 2025 154th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 170 - 181.
- [6] M. Strantzä, D. Huber, G. Bruno und M. Köhler, „Effect of the scanning strategy on the formation of residual stresses in laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V,” *Additive Manufacturing*, Bd. 47, Art. 102278, 2021.
- [7] N. D. Dejene, H. O. Ahmed und M. A. Mazid, „Characterisation and prediction of mechanical properties in L-PBF AlSi10Mg using machine learning,” *Mater. Sci. Technol.*, early access, 2024.
- [8] S. Gersch, U. Noster, C. Schulz und J. Bagdahn, „Influence of the process-related surface structure of L-PBF manufactured components on residual stress measurement using the incremental hole drilling method,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 18, art. 9861, 2025, doi: 10.3390/app15189861.
- [9] ASTM International, „Standard Specification for Additive Manufacturing of AlSi10Mg Alloy (Laser Powder Bed Fusion),” *ASTM F3318-18*, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [10] C. Li, J. F. Liu und Y. B. Guo, „Efficient multiscale prediction of cantilever distortion by selective laser melting,” in *Proc. 27th Annu. Int. Solid Freeform Fabr. Symp.*, Austin, TX, USA, 2016, pp. 236 - 246.

- [11] EOS GmbH, "EOS Aluminium AlSi10Mg – Material Data Sheet," Krailling, Germany, zugegriffen am 25.11.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-materials/data-sheets/mds-eos-aluminium-alsi10mg>
- [12] J. Merino, J. M. Aldazabal, M. Lamikiz und A. Iturrioz, "Multiple, comparative heat treatment and aging schedules for controlling the microstructures and mechanical properties of laser powder bed fusion fabricated AlSi10Mg alloy," J. Manuf. Process., vol. 68, 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.04.062. pp. 160 - 176
- [13] V. Ananda, S. Kaynak, D. Koker und G. Ulutan, "Distortion prediction in Inconel-718 part fabricated by laser powder bed fusion using lattice support homogenization," Metals, vol. 12, no. 9, art. 1447, 2022.
- [14] M. Käß, S. Weihe und M. Werz, "Residual stress and distortion analysis of laser powder bed additive manufactured parts using the incremental hole drilling method and the cantilever method," J. Adv. Joining Process., vol. 12, no. 100336, 2025, doi: 10.1016/j.jajp.2025.100336.
- [15] C. J. Hassila, A. Malmelöv, A. Lundbäck und U. Klement, "Influence of scanning strategy on residual stresses in laser-based powder bed fusion manufactured Alloy 718: Modeling and experiments," Metals, vol. 14, no. 2, art. 228, 2024, doi: 10.3390/met14020228.
- [16] I. Roveda, I. Serrano-Muñoz, T. Mishurova et al., "Influence of stress relief heat treatment on the residual stress state of a L-PBF AlSi10Mg alloy," Int. J. Fatigue, vol. 180, art. 107808, 2024, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107808.
- [17] C. Li, J. F. Liu, X. Y. Fang und Y. B. Guo, "Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting," Addit. Manuf., vol. 17, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.08.007. pp. 157 - 168

Mit Additiver Fertigung zur Kreislaufwirtschaft im Theaterkulissenbau – Potentiale und Herausforderungen des MEX-CRB mit Holzreststoffen

Leif Bretschneider, Henning Zeidler

Potentiale

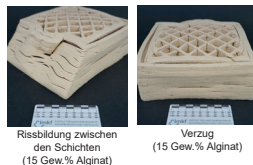
Im Theaterkulissenbau werden, vor allem bei geometrisch herausfordernden Skulpturen oder Zierelementen, Polystyrol und andere petrochemische Materialien genutzt, um die gewünschten Requisiten herzustellen. Gleichzeitig gibt es in der Branche eine große Motivation nachhaltiger Materialien einzusetzen sowie ein internes Recycling im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu etablieren. In einem gemeinsamen Forschungsprojekt arbeiten die TUBAF und die Städtischen Theater Chemnitz unter dem Titel „TheAMter“ an dem Ansatz, Holzreststoffe aus der Theaterwerkstatt (Schleifstäube, Säge- und Hobelspäne), unter Zugabe von Bindemitteln und Wasser, mittels Materialextrusion (MEX-CRB) für den 3D-Druck neuer Requisiten einzusetzen. Dieses innovative Konzept soll ermöglichen, dass eigene Reststoffe nicht im Müll enden, sondern als Ersatz für petrochemische Werkstoffe im Rahmen einer digitalen Fertigung zirkulär genutzt werden können.

Herausforderungen

Derzeitige Einschränkungen der Technologie sind:

- Viskositätsbedingt begrenzte Bauhöhe (20 cm)
- Lange Trocknungsdauer (≈ 5 Tage)
- Schrumpfung (15 – 20 %) und Verzug
- Rissbildung

Zudem bedingt die Nutzung des Reststoffs aus der Werkstattabsaugung, dass das Holzpulver hinsichtlich Zusammensetzung (Holzarten) sowie Partikelgrößenverteilung und –formen variiert.

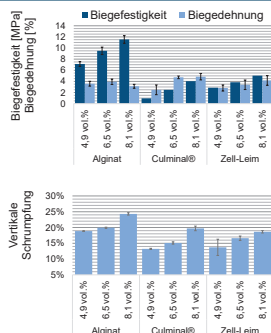


Lösungsansätze

Die begrenzte Bauhöhe lässt sich durch Materialanpassungen (Binderauswahl) steigern. Zudem ermöglicht eine entwickelte Slicing-Strategie die Segmentierung von Requisiten in druckbare Elemente, die sich anschließend zusammenfügen lassen. Zur Reduzierung der Trocknungsdauer wurden Konzepte für einen gezielten Wärmeeintrag im Düsenbereich entwickelt. Die Schrumpfung kann durch präzise Dosierung von Bindemittel und Feuchtigkeit der Paste reduziert sowie reproduzierbar eingestellt werden. Eine vorhersagbare Schrumpfung kann mit der entwickelten Slicing-Strategie kompensiert werden. Die Rissbildung kann durch die Auswahl und den Anteil des bio-basierten Bindemittels reduziert werden. Hierzu wurden mehrere Bindemittel, darunter Alginat, Culminal® und Zelluloseleim erprobt und verglichen.

Binderauswahl

- Drei bio-basierte Binder zeigen sich als vielversprechend: Alginat, Culminal® und Zell-Leim (Celluloseleim)
- Mechanische Eigenschaften und Schrumpungsverhalten als relevante Kenngrößen
- Bestimmung der Biegefestigkeiten und -dehnungen an je acht Biegebalken (ca. 20 x 20 x 80 mm)
- Probekörper wurden nach dem Druck für vier Tage getrocknet (24h an der Luft, danach bei 50°C im Ofen)
- Vertikale Schrumpfung wurde an drei Hohlzylindern ($\phi = 46$ mm, $h = 64$ mm) gemessen
- Zell-Leim zeigt geringste Rissbildung



→ Kompromiss zwischen zulässiger Schrumpfung und erforderlicher Festigkeit notwendig

Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts „TheAMter“ wird die Weiterentwicklung des beschriebenen Ansatzes vorangetrieben. Weitere bio-basierte Binder sowie eine Kombination mehrerer Binder werden untersucht, um einen optimalen Kompromiss aus Festigkeit und Maßhaltigkeit zu erreichen. Zur Recyclingfähigkeit sind ebenfalls weitere Messreihen geplant, um die benannten Recyclingstrategien vergleichen zu können und die Einflüsse des Binders sowie einer zusätzlichen Binderzugabe je Zyklus auf die Materialeigenschaften zu bestimmen. Der Einfluss der Variation des Reststoffpulvers (Partikelgrößenverteilung und –form sowie Holzarten) auf die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Maßhaltigkeit ist ebenfalls zu bestimmen, sodass entsprechende Strategien zur Materialaufbereitung abgeleitet werden können. Die Werkstatt der Städtischen Theater Chemnitz nimmt derzeit einen 3D-Drucker für das MEX-CRB in Betrieb, sodass der Prozess, unterstützt durch die TUBAF, etabliert werden kann.

Gefördert durch:

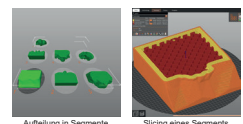


Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Prozesskette

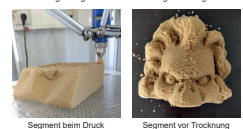
Slicing

- Nach Möglichkeit keine Deckflächen zur besseren Trocknung
- 5 Randschichten und 40 % Infill (Grid)
- Kompensierung der Schrumpfung (X,Y: 5 %, Z: 22 %)
- Schleifzugabe oben und unten (je 4 mm)
- Segmenthöhe abhängig von Tankvolumen des Druckers



Fertigung

- Partikelgröße des Holzreststoffs: ≤ 250 μ m
- Binderart und –anteil: 15 Gew.% Alginat
- Feuchtigkeit der Paste: 75 %
- Zugabe von Essig zur Schimmelprävention (3 % bezogen auf die Wassermenge)
- Düsendurchmesser: 4 mm
- Drucker: WASP 40100 Clay



Trocknung

- 24 h bei Raumtemperatur mit Ventilator
- Anschließend im Trockenofen bei 50°C
- Tägliches Wiegen der Bauteile zur Bestimmung der Restfeuchte
- Gesamte Trocknungsdauer ca. fünf Tage
- Abhängig von Geometrie



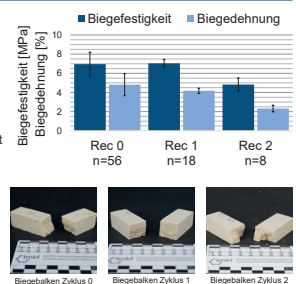
Nachbearbeitung

- Gedruckte Bauteile können mit den gängigen Methoden der Holzverarbeitung nachbearbeitet werden. Dazu zählen Schleifen, Sägen, Bohren und Verleimen.
- Zusätzlich kann die pastöse Formmasse genutzt werden, um Risse zu kaschieren oder Details nachzuarbeiten.
- Gedruckte Segmente für die Theaterkulissen werden zunächst Plangeschleift. Anschließend werden die Segmente miteinander verleimt und nachmodelliert (Risse kaschiert, Details nachgearbeitet).



Recyclingfähigkeit

- Gleichbleibende Materialqualität als Schlüsseleigenschaft für Kreislauffähigkeit
- Verschiedene Strategien zur Aufbereitung gedruckter Strukturen:
 - Auflösen in Wasser (Zeitintensiver)
 - Mechanische Zerkleinerung (Energieintensiver)
- Erste Testreihe mit 15 Gew.% (5,2 Vol.%) Alginat und dem Auflösen getesteter Prüfkörper in Wasser
- Biegefestigkeit bleibt nach erstem Recyclingzyklus konstant und nimmt im zweiten Zyklus um 31 % ab, Materialverhalten wird durch jedes Recycling spröder
- Optisch wird das Holz-Alginat-Compoundmaterial mit jedem Recyclingzyklus dunkler.



→ Ergebnisse vielversprechend. Weitere Recyclingzyklen, zusätzliche Binderzugabe sowie Zerkleinerungsansatz zu untersuchen

Untersuchungen zur Pulver-rheologie und Bauteilfestigkeit im Powder Bed Fusion (PBF)

Lukas Kube, Simon Hamblyn, Franziska Schlimpert, Ingo Reinhold
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur (HTWK) Leipzig, Center for Additive
Multi-Material Manufacturing, Karl-Liebknecht-Straße 132, 04277 Leipzig

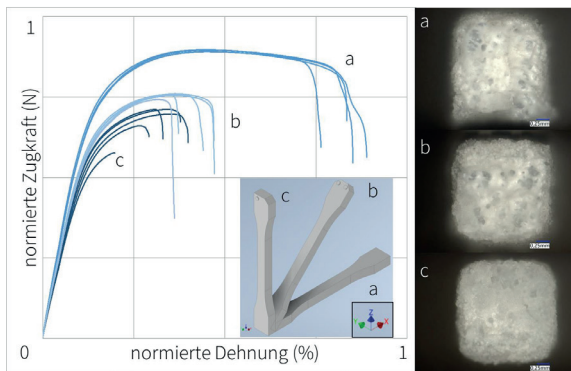


Abb. 1: Zugkurven für Hantelproben aus Druckjob 1 in drei unterschiedlichen Ausrichtungen (links), Mikroskopie der Bruchflächen (rechts)

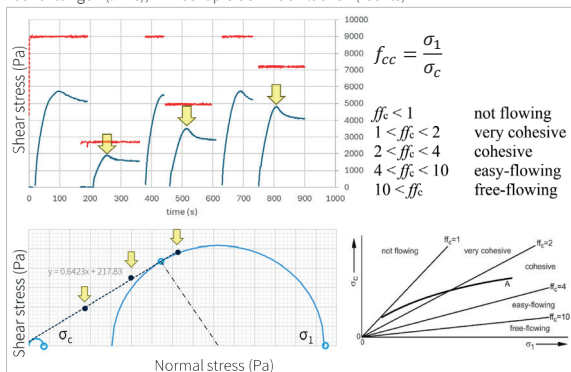


Abb. 2: Messung der Fließfähigkeit der Pulver durch Pulver-Scherversuche (oben links), zur Bestimmung u. a. des Fließsorts (unten links) und der Fließfähigkeit (rechts)

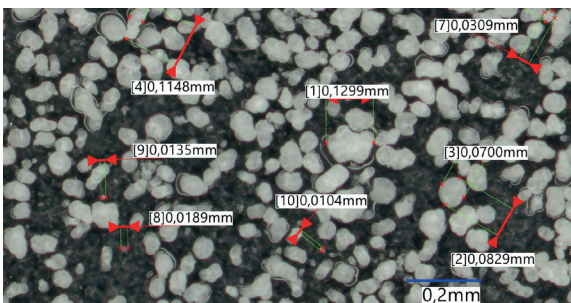


Abb.3: PA12-Pulver, fixiert auf Klebeband, von welchem zuvor überschüssiges Pulver mit einem zweiten Klebeband entfernt wurde, 200fache-Vergrößerung

Einleitung: Die Fließeigenschaften der verwendeten Pulver beeinflussen im PBF die Prozessstabilität. Ein variierendes Fließverhalten kann zu einem ungleichmäßigen Pulverauftrag und ungleichmäßigen Bauteileigenschaften führen.

Ziel: Durch pulverrheologische Messungen, Mikroskopie und Zugversuche sollen mögliche Zusammenhänge zwischen Pulver- und Bauteileigenschaften ergründet werden.

Methoden: In aufeinanderfolgenden Baujobs mit Polyamid 12 (PA 12) wurden Pulverproben entnommen. Zusätzlich zu den regulären Bauteilen wurden Prüfkörper nach ISO 527-2, Typ 1BB gefertigt. Die Prüfkörper wurden auf einer Zugprüfmaschine (ZwickRoell Z020 mit 200N-Kraftmessdose) in Anlehnung an ISO 527-1 und 2 geprüft. Die Pulverproben wurden mit einem Rheometer (Anton Paar, MCR) mit Pulverschercelle und Temperiereinheit untersucht. Durch die Ermittlung von Fließort, Druckfestigkeit σ_c und Verfestigungsspannung σ_1 wurde die Fließfähigkeit f_{cc} bestimmt. Die Pulverproben und Bruchkanten sind mit einem Digitalmikroskop (Keyence VHX 7000) mikroskopiert worden.

Ergebnisse (vorläufig):

- 1) Die für die additive Fertigung typische Richtungsabhängigkeit der Bauteileigenschaften konnte bestätigt werden.
- 2) Die Streuung der Bauteileigenschaften (Maximalkraft, Bruchdehnung) innerhalb eines Baujobs ist kleiner gegenüber der Streuung zwischen den Baujobs.
- 3) Ein signifikanter Unterschied der Fließeigenschaften zwischen den Pulverproben aus unterschiedlichen Druckjobs konnte bislang nicht festgestellt werden. Ferner zeigen Neupulver und Abfallpulver in den bisherigen Messungen ein ähnliches Fließverhalten.
- 4) Die bisherigen mikroskopischen Messungen des Pulvers zeigen keine wesentliche Veränderung der Pulvergrößenverteilung und Pulverform (Verhältnis orthogonaler Feret-Durchmesser).

Ausblick:

- 1) Andere Messmethoden zur Quantifizierung der Pulverrheologie sind zu erproben (z. B. Schüttversuche ähnlich ISO 13517).
- 2) Eine Anpassung der Probenpräparation für die Mikroskopie ist nötig, um die Pulver gleichmäßig und reproduzierbar zu dispergieren, ohne dabei Pulver-Agglomerate aufzubrechen (z. B. Dispergieren in Flüssigkeit, Ultraschallbehandlung).
- 3) Weitere Versuche zur statistischen Absicherung der Ergebnisse sind erforderlich.
- 4) Weitere Analysen zur Quantifizierung physikalischer und chemischer Veränderungen des Pulvers sind erforderlich (z. B. IR-Spektroskopie, DSC-Analyse).

Quellen:

Schulze, D. Flow Properties of Powders and Bulk Solids. 2014

HTWK

Gefördert durch

DFG

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

IM

Fakultät
Informatik und Medien

ING

Fakultät
Ingenieurwissenschaften

ISO GPS zur Beschreibung systemspezifischer geometrischer Abweichungen additiver Fertigungssysteme

Anna Sorgatz, Sophie Gröger

TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Fertigungsmesstechnik,
Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz

Die additive Fertigung gewinnt zunehmend an Bedeutung, was sich in einer wachsenden Anzahl von Normen und Richtlinien widerspiegelt. In Bezug auf Qualitätssicherung und Zertifizierung fordern Kunden oft die etablierten Normen konventioneller Verfahren, einschließlich Abnahme- und Bestätigungsprüfungen auch für additive Systeme. Der vorgestellte Ansatz analysiert geometrische Abweichungen im gesamten Fertigungsprozess gemäß den Spezifikations- und Verifikationsstrategien von ISO GPS. Dadurch ist es möglich, systemspezifische Eigenschaften der Fertigungssysteme zu definieren und sie anschließend in der Produkt- und Prozessplanung zu berücksichtigen.

Die additive Fertigung hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, was sich auch in der steigenden Anzahl von Normen und Richtlinien widerspiegelt, wobei trotz dieser Entwicklungen die Anzahl der Normen im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren nach wie vor begrenzt ist.

In der Praxis zeigt sich, dass viele Kunden mit den etablierten Normen für konventionelle Verfahren vertraut sind und diese auch in der additiven Fertigung fordern. Dazu zählen zum Beispiel auch Abnahme- und Bestätigungsprüfungen für additive Fertigungssysteme. In diesem Zusammenhang bereits bestehende Richtlinien bzw. Normen sind die VDI 3405 Blatt 3.2 und DIN EN ISO 17296-3, die sich auf die Systemgrenzen, wie etwa minimal mögliche Abstände, Formen oder Neigungswinkel ohne Stützstrukturen, konzentrieren, jedoch die funktionalen Eigenschaften des gefertigten Werkstücks außer Acht lassen.

Eine alternative Betrachtungsweise ist die Beurteilung des gefertigten Werkstücks unter Berücksichtigung der in der Geometrischen Produktspezifikation (ISO GPS) beschriebenen Spezifikations- und Verifikationsstrategien. Das ISO GPS-System ist ein umfassendes Normensystem, das nicht nur die Spezifikation eines Werkstücks, d. h. die geometrischen Anforderungen und Toleranzen, sondern auch die Regeln für die Verifikation, d. h. die Qualitätssicherung des Werkstücks, beschreibt. Der im Vortrag vorgestellte Ansatz zur Ermittlung und Bewertung geometrischer Abweichungen betrachtet diese als Gesamtbudget und berücksichtigt ihre Entstehung über den gesamten Fertigungsprozess hinweg. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Betrachtung sind die jeweiligen Fertigungssysteme mit ihren spezifischen Eigenschaften wie Verfah- und Positionierungsungenauigkeiten. Die o. g. Normen und Richtlinien lassen aufgrund von Uneindeutigkeiten im beschriebenen Vorgehen der messtechnischen Erfassung und Auswertung Interpretationsspielräume zu, sodass es zu unterschiedlichen Ergebnissen der Untersuchungen kommen kann. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Nutzung des ISO GPS-Systems durch die Verwendung von Geometrieelementen zur Spezifikation und Verifikation eine eindeutige Zuordnung und Interpretation der Messergebnisse. Somit soll es für die Anwender möglich sein, die systemspezifischen Eigenschaften zu definieren und sie anschließend in der Produkt- und Prozessplanung zu berücksichtigen.

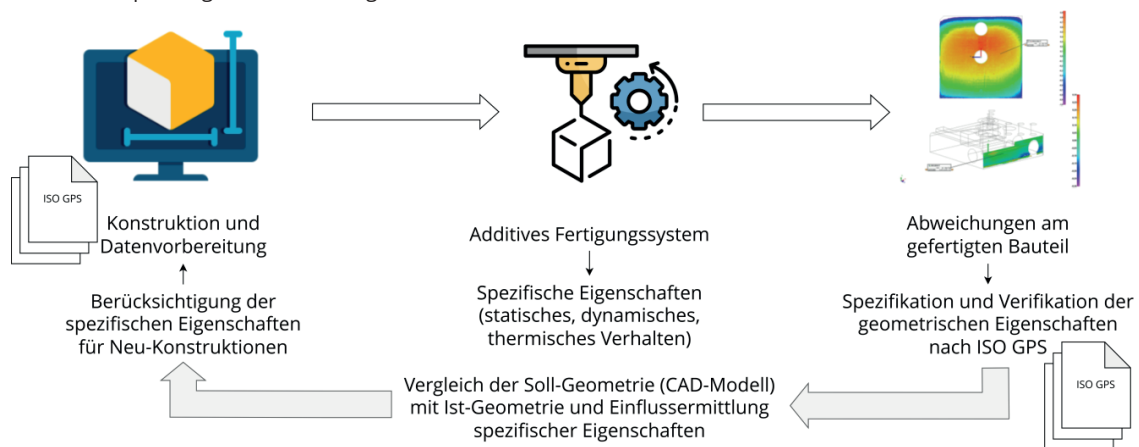


Abb. 1: Definition der systemspezifischen Eigenschaften mittels ISO GPS