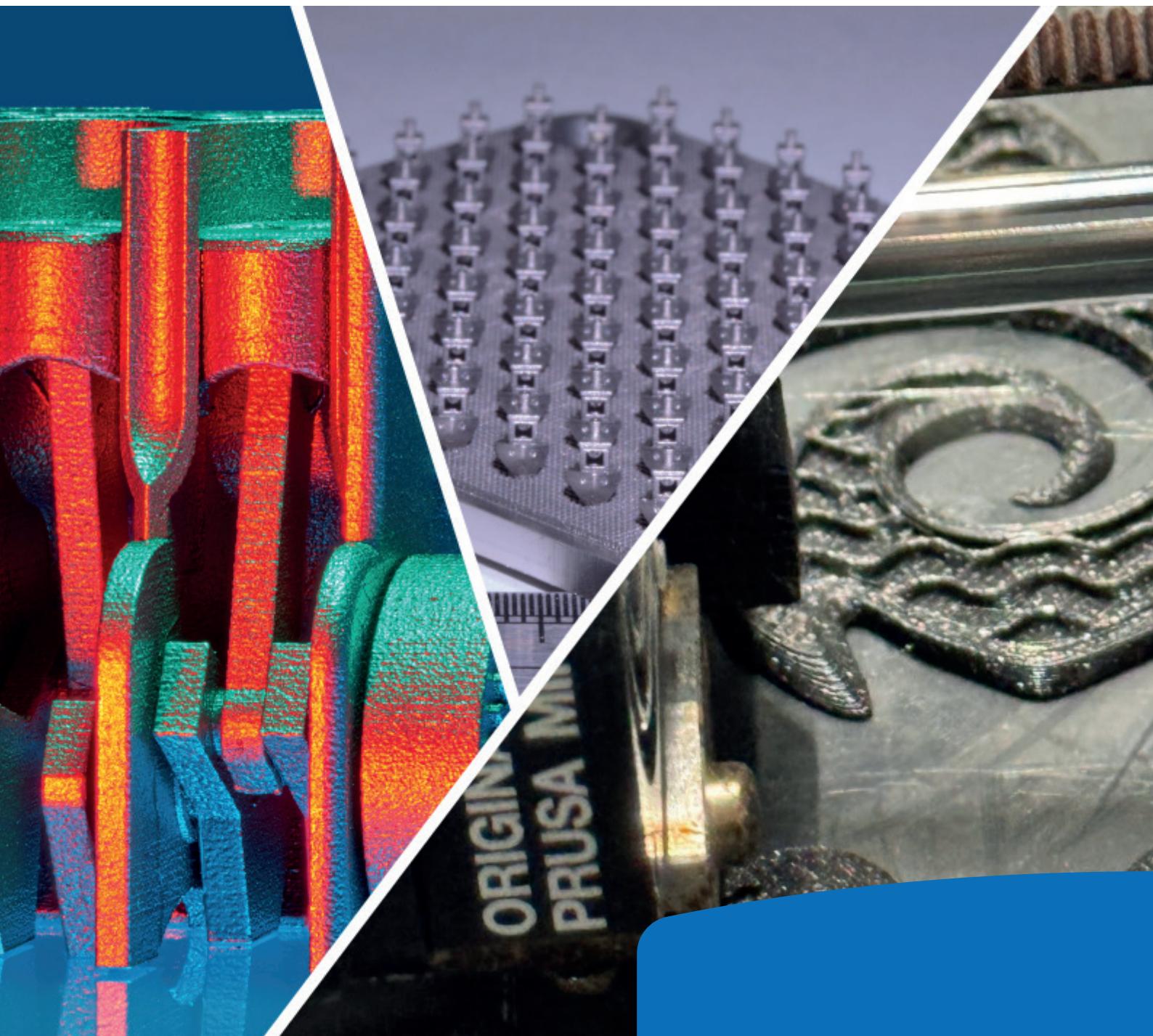




Tagungsband

# **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



**HOCHSCHULE  
MITTWEIDA**  
University of Applied Sciences



**Ernst-Abbe-Hochschule Jena**



Hochschule für Technik,  
Wirtschaft und Kultur Leipzig



## Tagungsleitung

Jörg Matthes, Hochschule Mittweida

Kerstin Michalke, EAH Jena

Constance Möhwald, EAH Jena

Michael Pfeifer, Laserinstitut Hochschule  
Mittweida

Peter Schulze, HTWK Leipzig

## 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

## 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

<b>3D-Hype - sind die fetten Jahre schon vorbei?</b> .....	002
Stefan Roth, Hochschule Schmalkalden	

### Innovative Verfahren und Funktionalisierung

<b>Air Technologies for Additive Manufacturing</b> .....	018
Stefan Jakschick	
ULT AG	

<b>Additiv hergestellter Stich- und Schnittschutz auf textiler Basis</b> .....	028
Fabian Jonas Müller	
Hochschule Mittweida	

<b>Funktionalisierung additiv gefertigter Bauteile mittels Wire Encapsulation Additive Manufacturing (WEAM)</b> .....	043
Valentin Mauersberger	
Fraunhofer IWU	

<b>Können mechanisch gefertigte Bauteile wirklich durch 3D-gedruckte Bauteile ersetzt werden?</b> .....	055
Joachim Kasemann, Mark3D GmbH	

### Materialinnovationen und hybride Lösungen

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

<b>Additive Fertigung der nächsten Stufe: Neue Materialien und Technologien bei Stratasys</b> .....	073
Michael Anton	
Stratasys	

<b>Untersuchungen zum selektiven Laserstrahlschmelzen von Aluminiumoxid für die direkte Herstellung oxidkeramischer Bauteile</b> .....	084
Laura Römer	
Laserinstitut Hochschule Mittweida	

<b>3D-Druck mit Wasserglas – Ein nachhaltiger Ansatz zur laserbasierten additiven Fertigung</b> .....	092
Hassel-Schmidt, R. <sup>1,2</sup> , Barz, A. <sup>1</sup> , Bliedtner, J. <sup>1</sup> , Rädelein, E. <sup>2</sup>	
<sup>1</sup> Ernst-Abbe-Hochschule Jena	
<sup>2</sup> Technische Universität Ilmenau	

### Metallbasierte Additive Fertigung für Hochleistungsanwendungen

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

**Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien .....113**  
**aus Inconel 718**

Florian Heinrich  
Laserinstitut Hochschule Mittweida

**Entwicklung additiv gefertigter Treibstofftanks und Festkörpergelenken aus amorphen .....124**  
**Metallen für Luft- und Raumfahrt**

Maximilian Streinz  
Günter-Köhler-Institut, Jena

**3D-Laserdruckverfahren zur Herstellung von porösen wasserabführenden .....134**  
**Verlaufsstrukturen**

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

## **Prozessüberwachung und Qualitätssicherung**

**Überwachung des 3D-Druckprozess (FFF) mittels Ultraschall .....142**  
Johannes Zawatzky  
SONOTEC GmbH

**Intrinsische Markierung additiv gefertigter Bauteile zur Verifizierung und Identifizierung .....152**  
**von Originalbauteilen**

Stephan Eckstein<sup>1</sup>, Andreas Krombholz<sup>1</sup>, Oliver Neudert<sup>1</sup>, Johannes Zawatzki<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> GMBU e.V.  
<sup>2</sup> SONOTEC GmbH

**Zusammenhänge zwischen der Morphologie, den Verarbeitungsparametern und der .....161**  
**mechanischen Performance additiv gefertigter Kunststoffe**

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

**Metallpulver als Einflussfaktor auf die Bauteilqualität .....174**  
Andreas Pelz  
m4p material solutions GmbH

## **Zukunftsfähige Strategien in der Additiven Fertigung**

**Vom Reststoff zum Prototyp – nachhaltige additive Fertigung im Reallabor SAMsax .....176**  
Leif Bretschneider  
TU Bergakademie Freiberg

**Recycling im Resin 3D-Druck .....186**  
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 Mikopräzision**

**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 .....** .....254  
**durch Mikroextrusion**  
Maurice Hauffe  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

## **Prozesse und Qualitätssicherung**

**KI-basierte Überwachung der Schichtinformation im großvolumigen Schmelzschicht- verhalten .....** .....261  
T. Wille<sup>a</sup>, D. Linke<sup>a</sup>, J. Bliedtner<sup>a</sup>, W. Liao<sup>b</sup>, C. Zhang<sup>b</sup>, G. Notni<sup>b</sup>  
<sup>a</sup> Ernst-Abbe-Hochschule Jena  
<sup>b</sup> 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 <sup>1</sup>, Carsten Schulz <sup>2</sup>, Jörg Bagdahn <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Anhalt

<sup>2</sup> Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

<sup>3</sup> Hochschule Anhalt

**Mit Additiver Fertigung zur Kreislaufwirtschaft im Theaterkulissenbau – Potentiale .....305  
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 additiver .....307  
Fertigungssysteme**

Anna Sorgatz, Sophie Gröger

TU Chemnitz

# **Opening Session**

# Der 3D Hype – Sind die fetten Jahre schon vorbei?

Standortbestimmung und Ausblick



**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



# ...schon vorbei?

Bad News...

Themen > Fertigungssysteme > Polymer > AKF- Arburg Kunststoff Freiformen

BRANCHENGESETZEN

## 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...“

Prof. Stefan Roth

Quelle: <https://all3dp.com>

AM veräußern  
Von Carolyn Schwaar · vor 3 Monaten  
**Trumpf steigt aus dem Geschäft mit 3D-Metalldrucken aus.** Der 100 Jahre alte deutsche Werkzeugmaschinenhersteller seine Sparte für additive Fertigung, zu der auch eine Reihe von 3D-Druckern für das **Laser-Pulverbettenschweißen von Metallen** gehört. Das in München ansässige Private-Equity-Unternehmen DUBAG kaufte 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.

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.

Source: Trumpf

Quelle: formnext

DER SPIEGEL

Die fetten Jahre sind vorbei

AKT

Folie 3

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

# Der Markt in Bewegung...

„Revolution in der globalen Massenproduktion“

## SLM Solutions gehört jetzt zu Nikon

01. Februar 2023 · 3 Minuten Lesezeit



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

Quelle: [www.additive-industrie.de](https://www.additive-industrie.de)

3D DRUCK NEWS AKTUELLES

## Nano Dimension übernimmt Markforged und positioniert sich als Marktführer

Am 26. September 2024 von Axel Z. veröffentlicht

In purchasing Markforged, Nano Dimension said it is acquiring a company with scale and efficiency. In 2023, Markforged's revenue was \$92.8 million with a 47.4% gross margin and 48.6% non-GAAP gross margin, and a second quarter of 2024 gross margin of 48.3% and non-GAAP gross margin -1.5%. This has the potential to expand further, added Nano Dimension.

Prof. Stefan Roth

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

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 der 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“.

Stefan Ritt, 2024

Fazit

- Wer große SLM-Bauteile möchte, kommt an China im Moment nicht vorbei
- Die Technologie und Ausführung sind ebenbürtig oder gar vollständiger bzw. besser.
- High-Tech- 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 Pul...

EP-M250 Metal 3D Printer

EP-Laser Large Format Metal Additive Manufacturing System

Highlights:  
Build volume 2050 x 1100 mm both a customizable 2-axis up to 1000 mm x 1000 mm  
3D Laser working together speed up to 1000 mm/s  
Benefit from size & high efficiency  
Excellent quality & good consistency

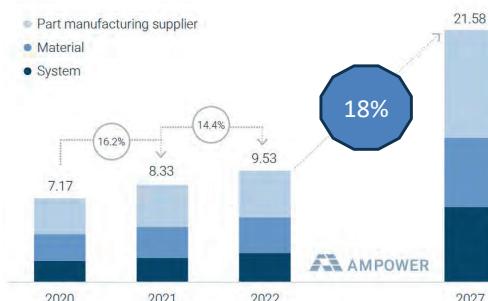
ORCONEC EPW100

AKT

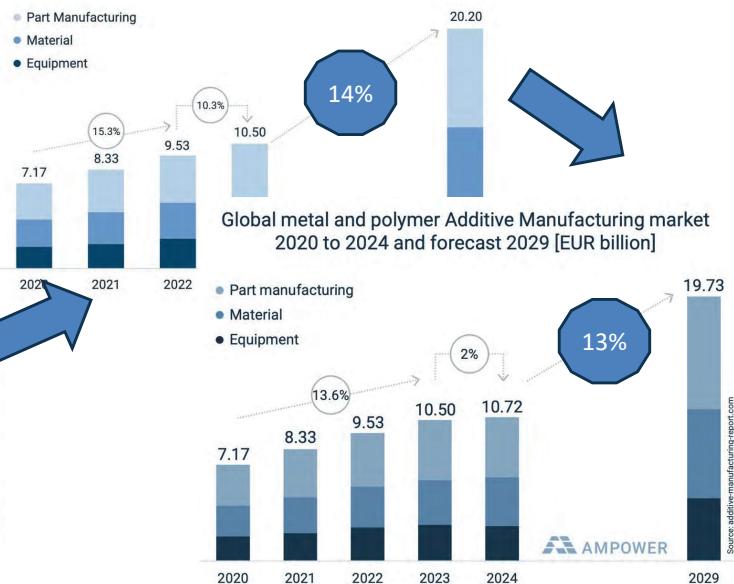
# Der Markt....

- 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]



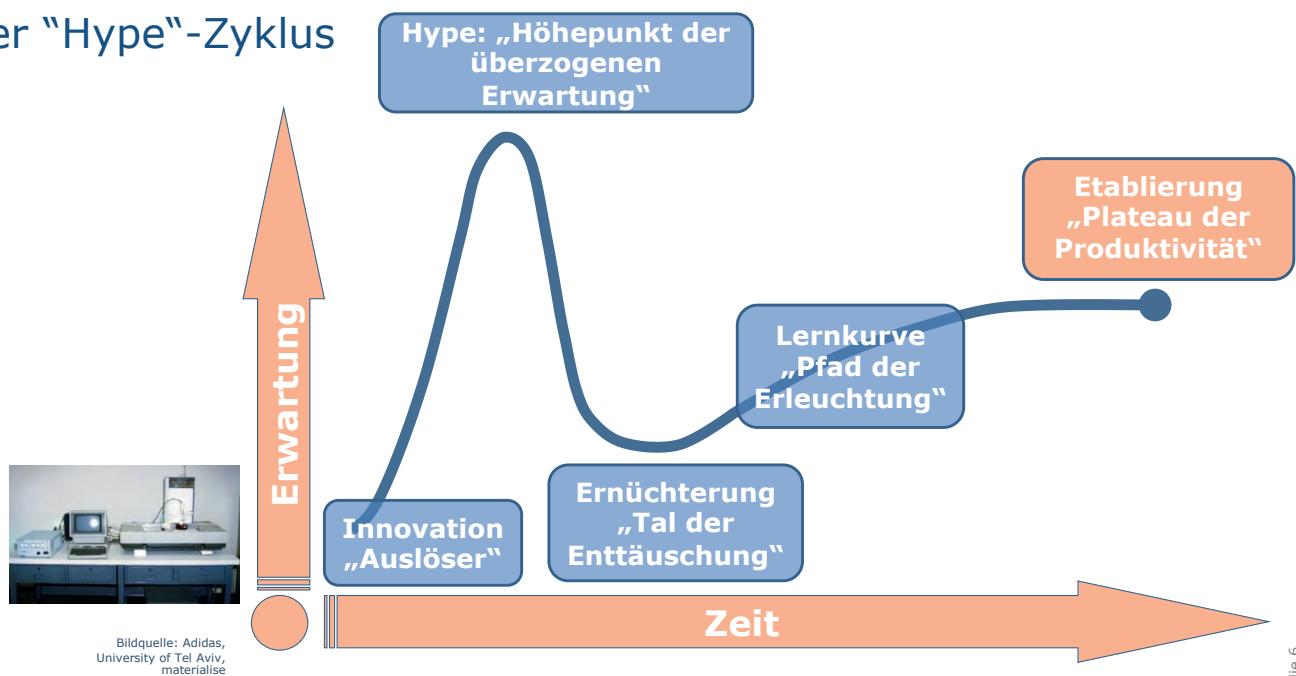
Global metal and polymer Additive Manufacturing market  
2020 to 2023 and forecast 2028 [EUR billion]



Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

## Der "Hype"-Zyklus

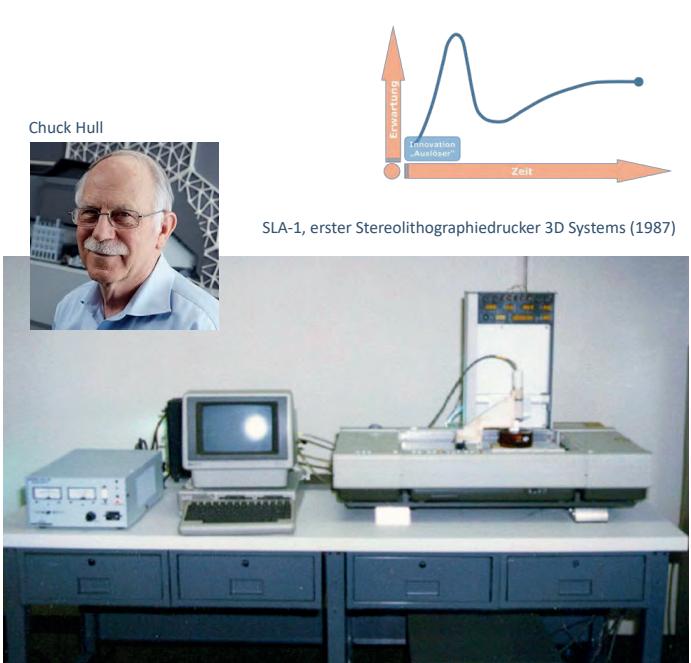


Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

# 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



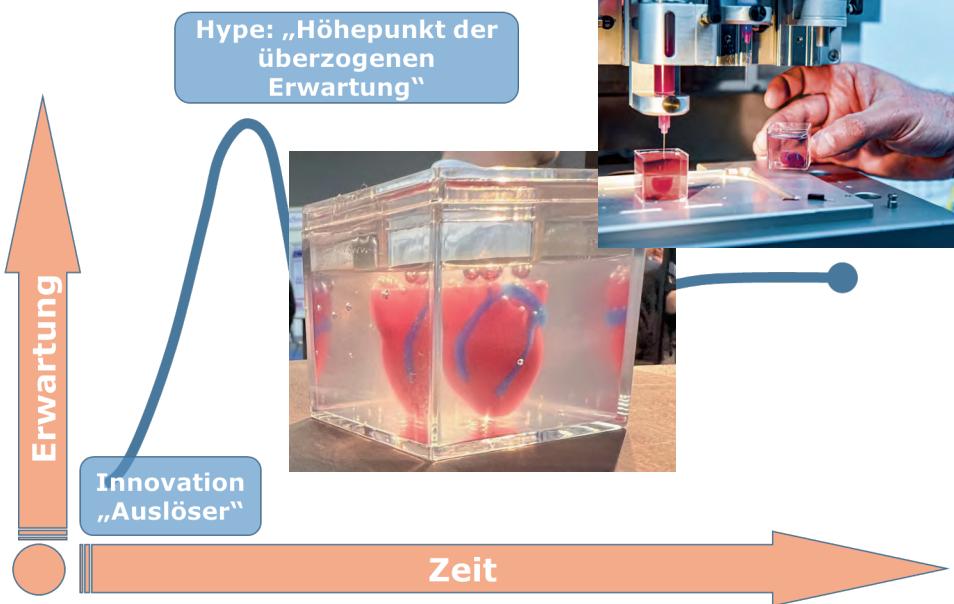
Folie 7

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



# 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](https://reprap.org/wiki/Wealth_Without_Money), 2.12.2004, abgerufen 21.03.21)

Bildquelle: Wolters,  
University of Tel Aviv

Folie 8

Prof. Stefan Roth

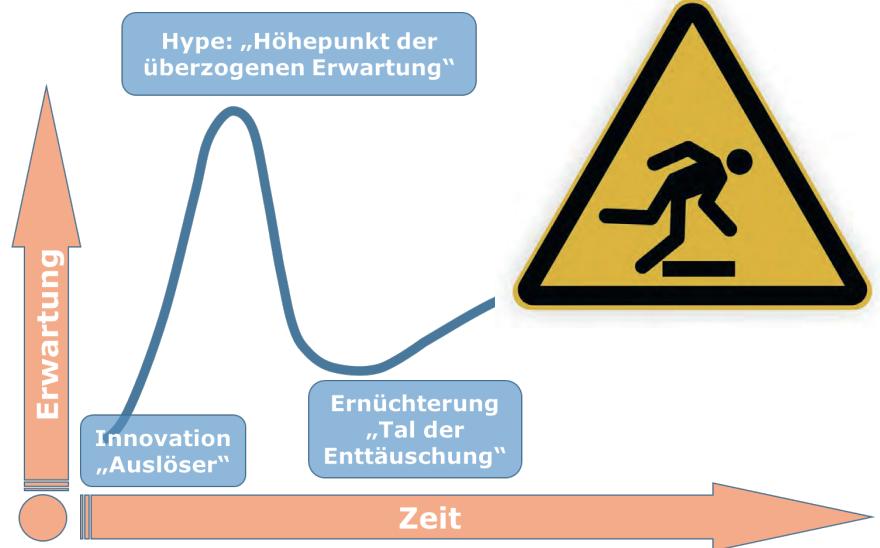
Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



# Die Ernüchterung – Unsere Gegenwart

## Hemmisse

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



Prof. Stefan Roth

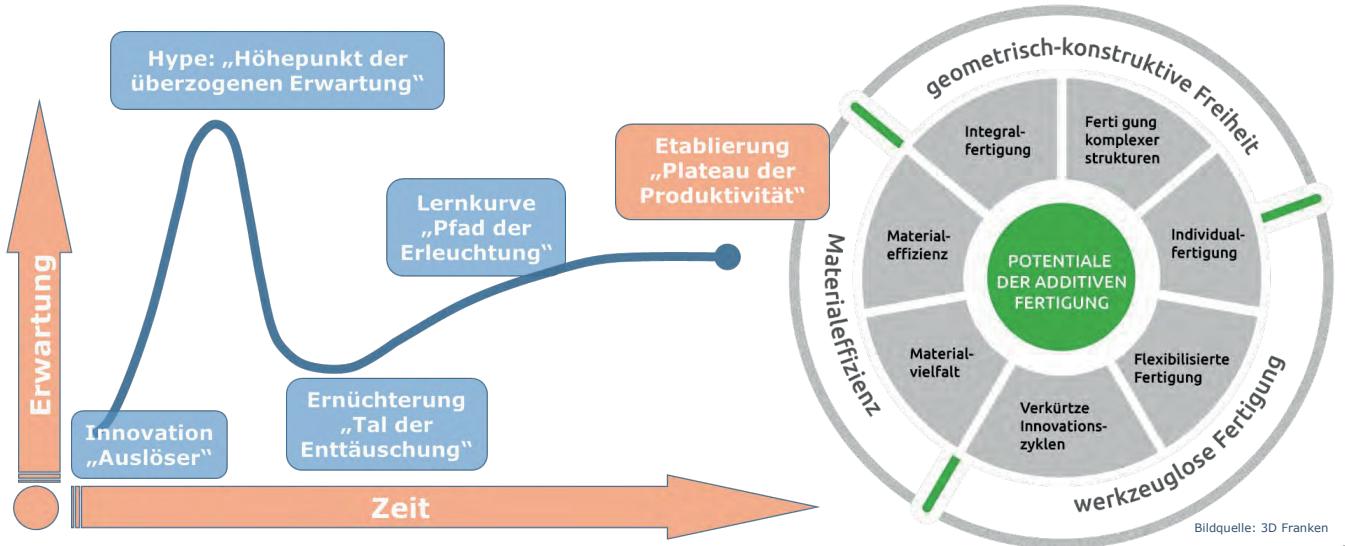
Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

## Ausblick Wege aus dem Jammertal



Bildquelle: Tetsche

# AM – die Potentiale nutzen!



Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 11

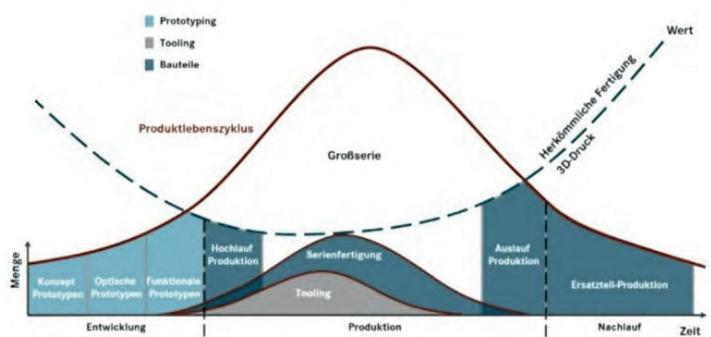
## Rapid Repair – Anwendungsbeispiel Automotive

### 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



Folie 12



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



# Rapid Repair – Deutsche Bahn

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



## Anwendungsbeispiele

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



Bildquelle: Deutsche Bahn



Initiative „mobility goes additive“

Folie 13

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



# 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

Bildquelle: Schunk, igus

## Anwendung Industrie / Automation

- Herausforderung kleine Lösgrößen
- Ersatzteile / Verschleißteile



Das Bild zeigt ein Screenshot der igus iglidur® Designer Software. Es handelt sich um eine CAD-Plattform für die Herstellung von kleinen Serien. Der Bildschirm zeigt verschiedene Werkzeuge und Materialauswahlmöglichkeiten. Ein Beispiel für ein Modell ist dargestellt, mit Preisangaben von 29,73 EUR pro Stück und einer Fertigstellung in 3 Werktagen. Die Software unterstützt verschiedene Herstellungsverfahren wie SLS und FDM.



## Beispiel: Schunk, igus

- Greiflösungen 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=KSIE1F8mtbs>



Prof. Stefan Roth

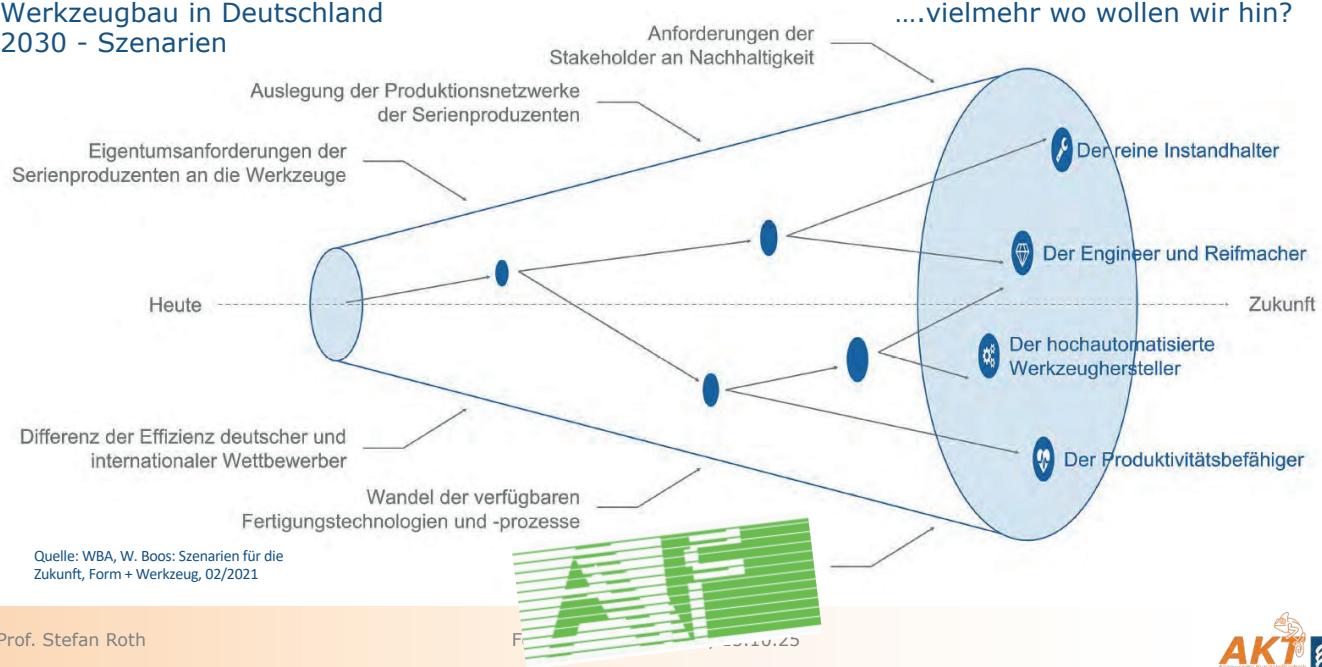
Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 16

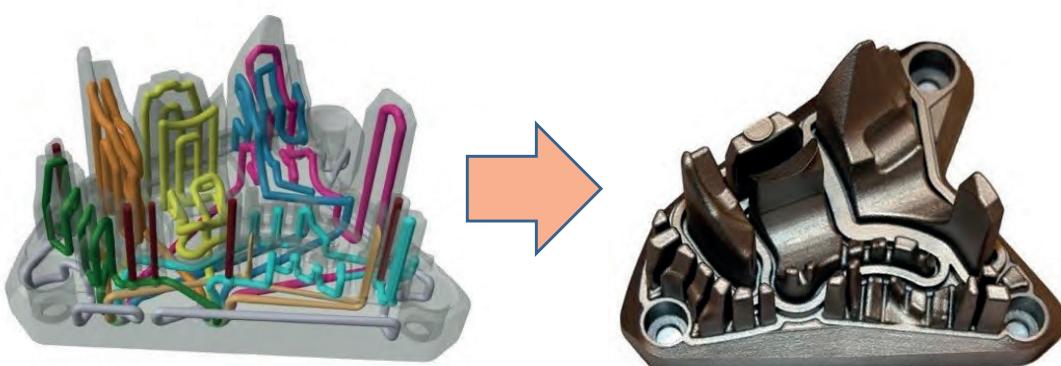
# Wo stehen wir im Werkzeugbau?

## Werkzeugbau in Deutschland 2030 - Szenarien



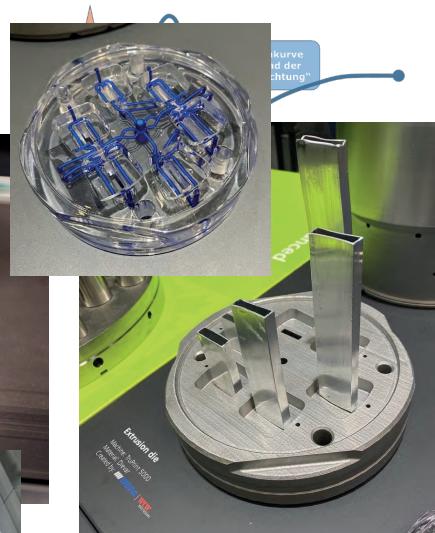
## Anwendung konturnahe Kühlung

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



## Anwendung konturnahe Kühlung

- Beispiel Kühlkanalgeometrie in Spritzgießwerkzeugen



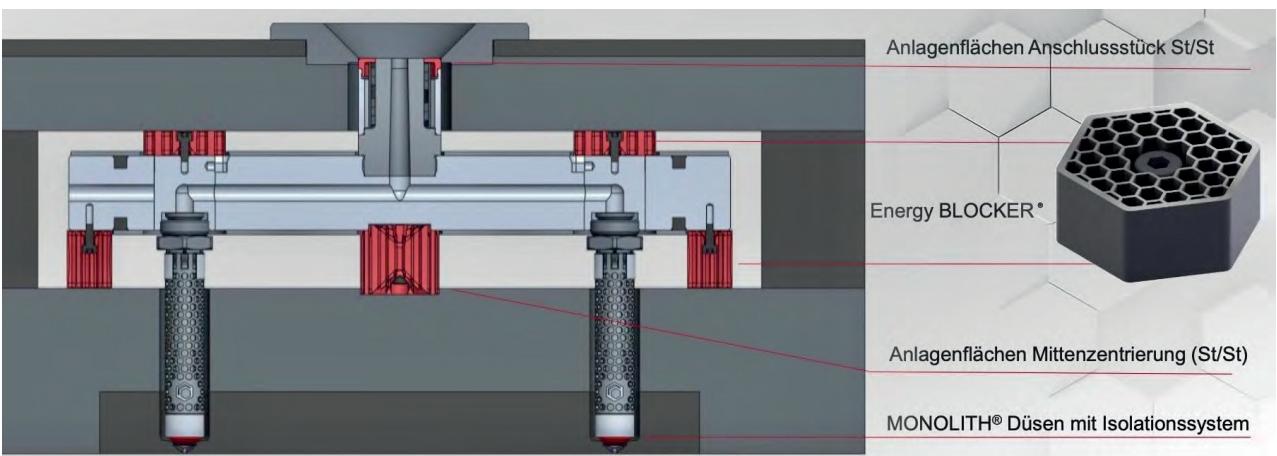
Prof. Stefan Roth

Forum

## Beispiel Spritzgießwerkzeug

### Heißkanalsystem

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

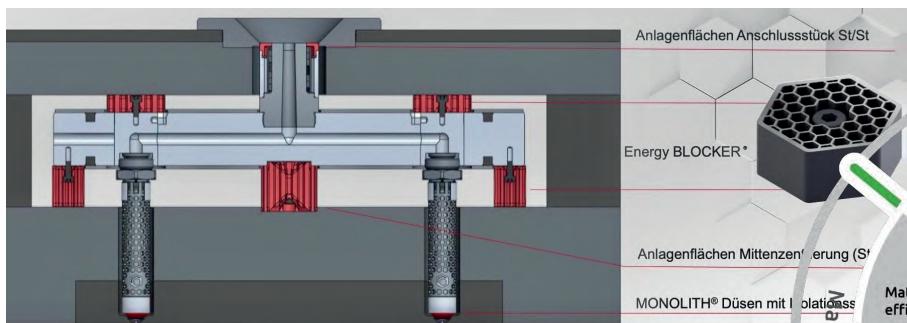


Bildquelle: Witosa

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

# Heißkanalsystem additiv



- Mehrwert durch Additive Fertigung
- Präzision durch Nachbearbeitung

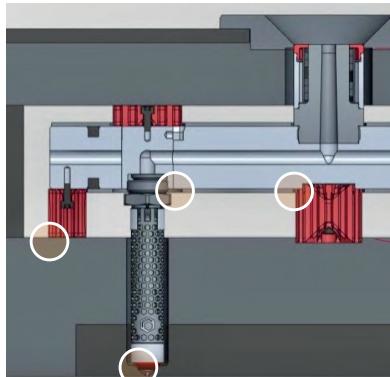
Bildquelle: Witosa

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

# Heißkanalsystem additiv

- Präzision durch Kombination der Verfahren Additiv - Subtraktiv



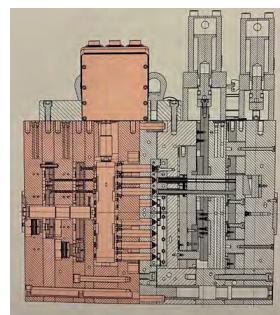
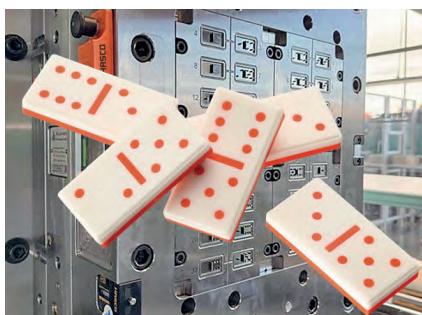
Bildquelle: Witosa

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

# 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

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25



Folie 24

## Projektrahmenbedingungen



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



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

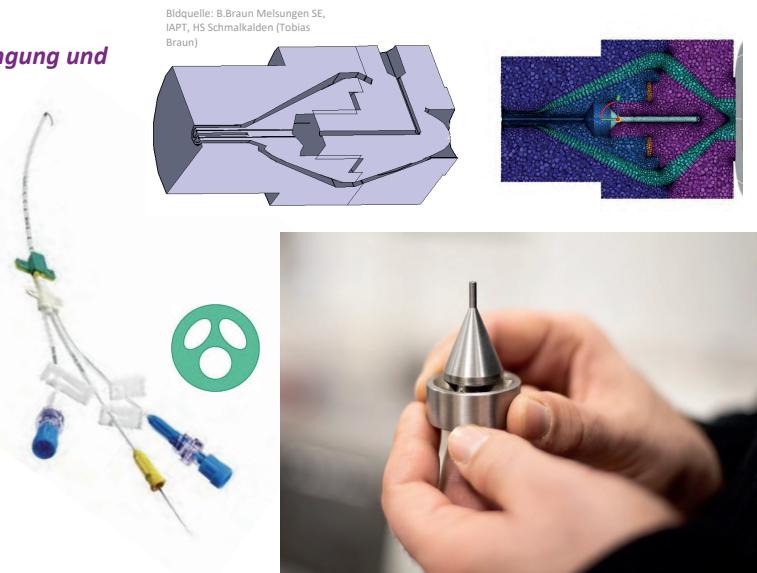
## ExAM - Extrusionswerkzeuge auf Basis von Additive Manufacturing

### Ausgangssituation

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

### Lösungsansatz

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



### Forschungsziel

- Leitfaden zur Gestaltung von Extrusionswerkzeugen mit Hilfe der Additiven Prozesskette

## Anwendungsbeispiel Zahnmedizin

- 3D-gedruckte Bohrschablone zur Implantatsetzung mit provisorischer Versorgung



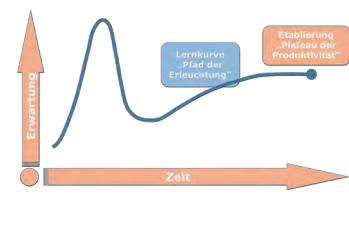
Bildquelle: Primeprint Collection Klinische Fälle, Firmeninformation Dentsply Sirona (2022), eigene Aufnahme



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

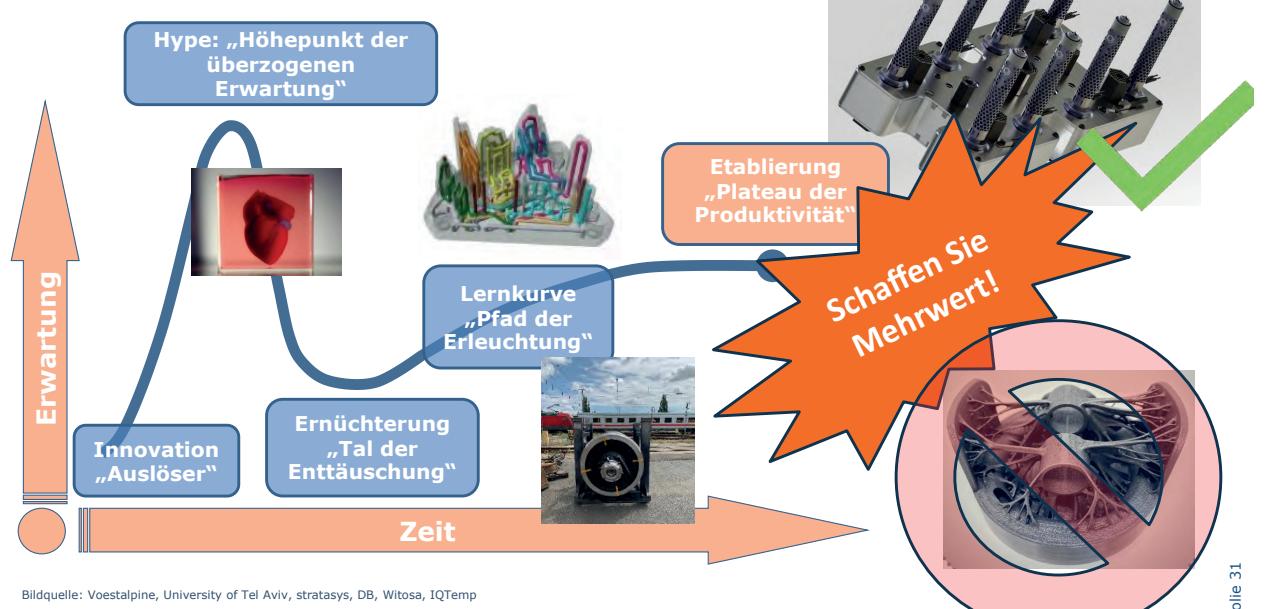
Bildquelle: dreve, specht hören und sehen, eigene Aufnahme formnext 2024

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

## 3D Druck – Standortbestimmung & Ausblick

Zusammenfassung



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

Prof. Stefan Roth

Forum 3D-Druck 2025, 15.10.25

## Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

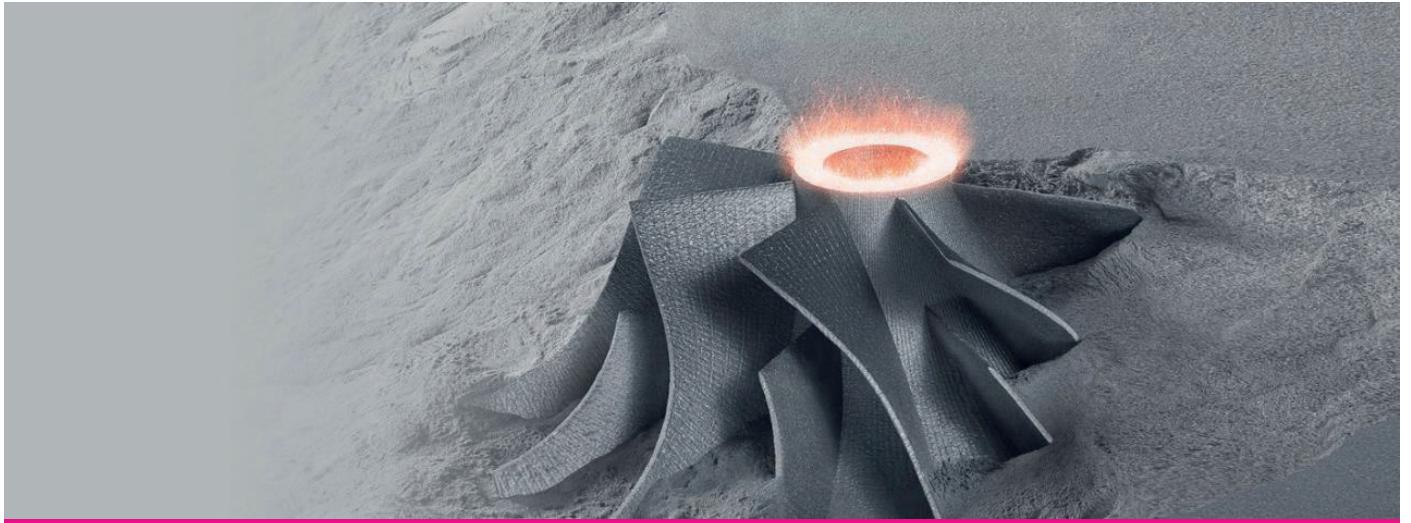
Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth  
Professur Produktentwicklung /  
Konstruktion  
Angewandte Kunststofftechnik (AKT)

Hochschule Schmalkalden  
Fakultät Maschinenbau  
Blechhammer 4-8  
98574 Schmalkalden

E-Mail: [s.roth@hs-sm.de](mailto:s.roth@hs-sm.de)  
[www.hs-schmalkalden.de](http://www.hs-schmalkalden.de)  
[www.angewandte-kunststofftechnik.de](http://www.angewandte-kunststofftechnik.de)



# **Innovative Verfahren und Funktionalisierung**



## Air Technologies for Additive Manufacturing

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



air quality

## Agenda

Motivation

Lasers and Particles

Influence of process gas on:

- The machine
- The product
- The people

Challenges

Solutions

Summary



## Purity Law = Process Control

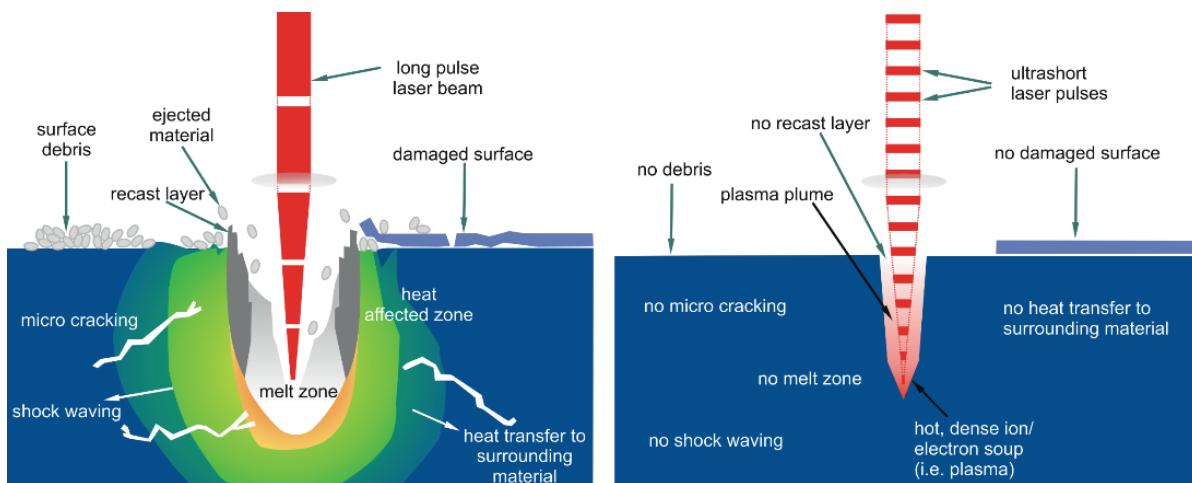


# Airborne pollutants and their impacts



### Application with long pulse laser (e.g. $\mu$ s)

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

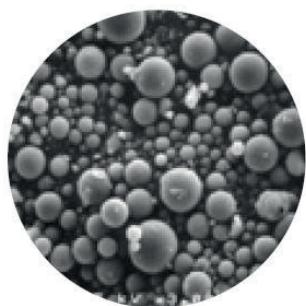


Short pulsed laser processes → Nano particles around 100nm

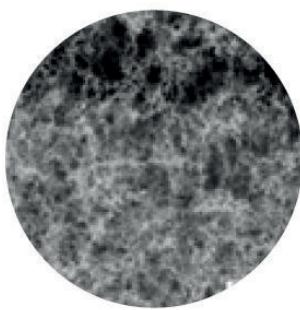


## Particle sizes

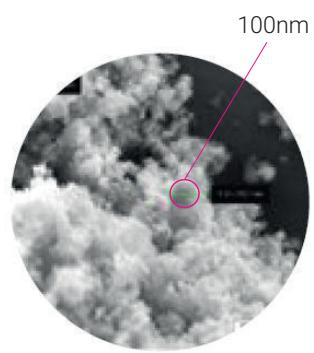
Laser application dust under microscope



Continuous wave laser (cw)  
Nanosecond pulse (ns)



Pikosecond pulse (ps)



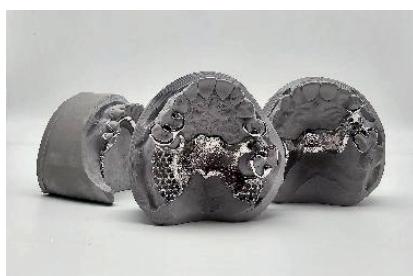
Femtosecond pulse (fs)

5



## Process gas cleaning

Example applications and need for sufficient process gas clean



## Process gas cleaning

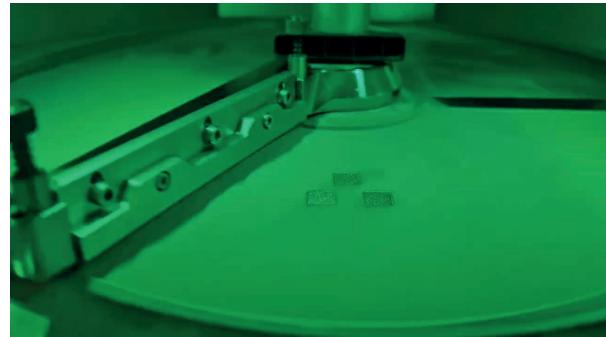
Example applications and need for sufficient process gas clean



**Without** homogeneous gas flow



**With** homogeneous gas flow



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



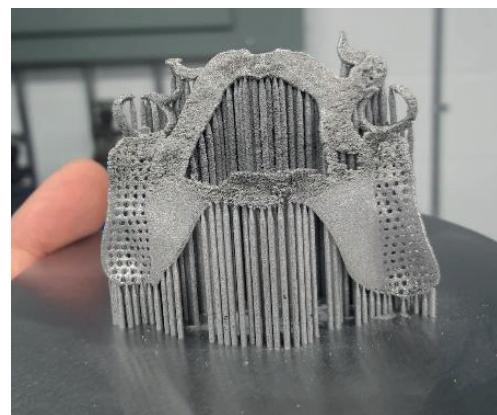
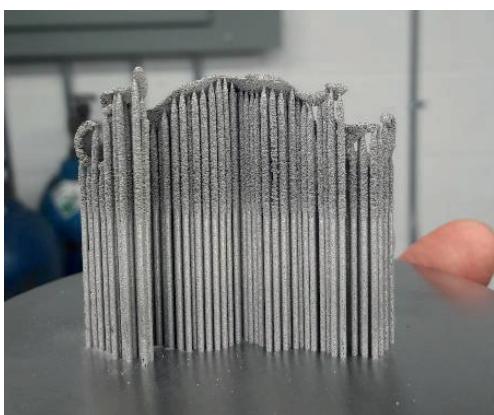
## Process gas cleaning

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



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

Error pattern: Complete failure of process cleaning during printing

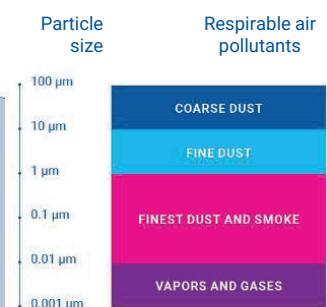
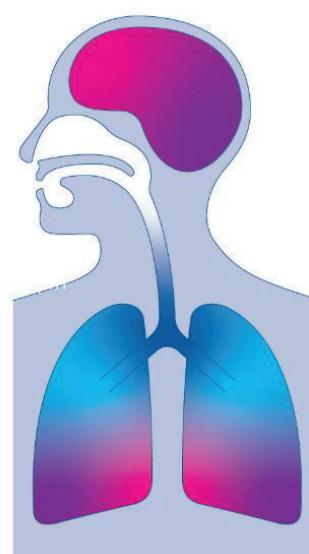


## Material processing releases pollutants

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 m<sup>3</sup>/d)

Air born particles are part of our daily consumption



# Additive Manufacturing LPBF

Contact with powder, condensates and gases during Process

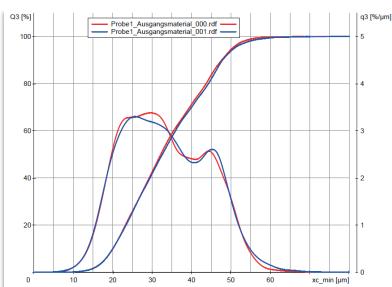
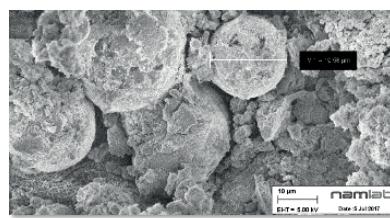
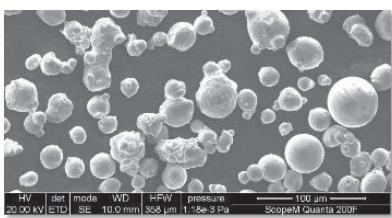


11

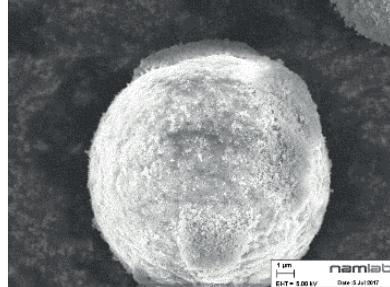


## Dangers and health risks

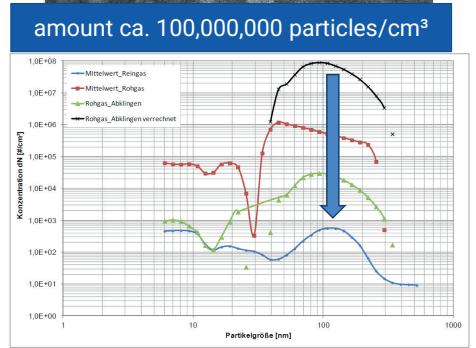
Particle sizes of metal powder and condensates



starting material : 5-60 μm



material from filter



amount ca. 100,000,000 particles/cm<sup>3</sup>  
particle size distribution of raw gas before separator (6-300 nm)

12

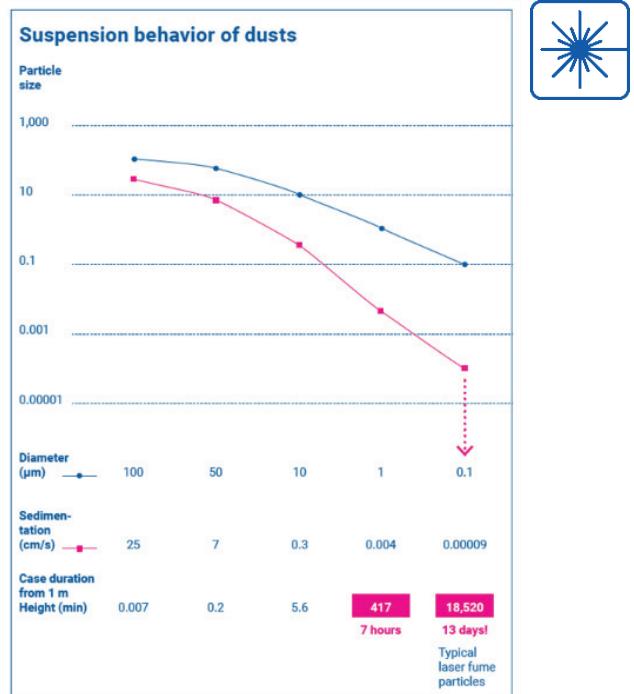


# Particle sedimentation

Different density

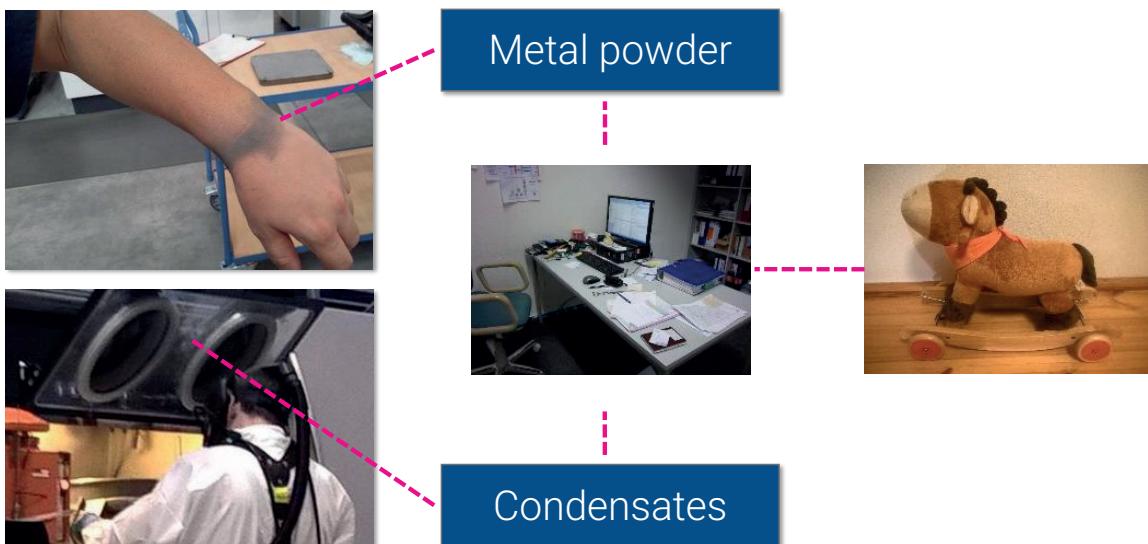
Particles in the size as generated during additive manufacturing may settle never or after very long time.

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



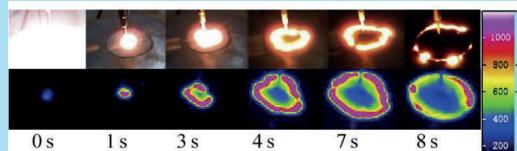
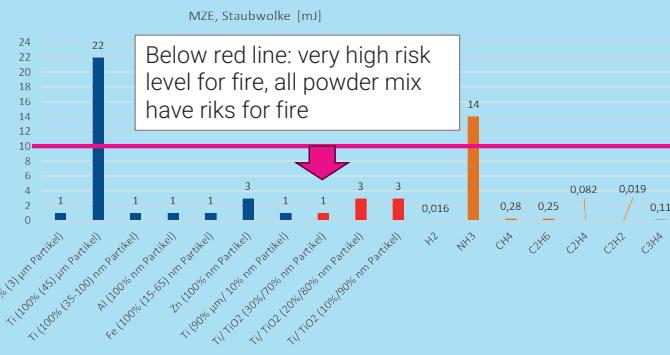
## Dangers and health risks

Example of particles contamination



# 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 hygroscopic 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

# Process gas cleaning

AMF 200 scalable solution

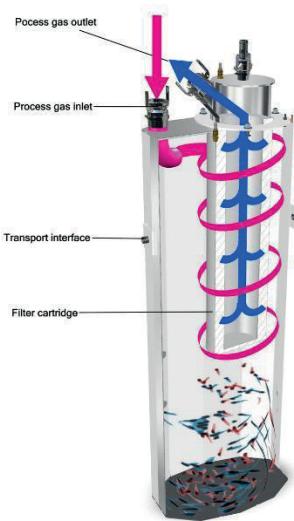
## Features:

- 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



# 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

# 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

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](http://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 %		
2014	33.478	1.548	4,9		62.286	3.680
2015	33.479	111	0,3		63.932	1.646
2016	36.755	3.276	9,8		71.315	7.383
2017	36.441	-314	-0,9		73.897	2.582
*) 2018	38.109	-226	4,6		79.164	5.267
**) 2019	38.635	526	1,4		80.084	920
2020	38.960	525	0,8		84.831	4.747
2020	39.649	689	1,8		88.626	3.795
2022	42.777	3.128	7,9		96.208	7.582
2023	46.218	3.441	8,0		105.708	9.500

[1]

3 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.

13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme

Fakultät Ingenieurwissenschaften



# 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]

4 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.

13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme  
Fakultät Ingenieurwissenschaften



# 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

5 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.

13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme

Fakultät Ingenieurwissenschaften



# 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

6 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.

13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme

Fakultät Ingenieurwissenschaften



# 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 Schutzsystems 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/m<sup>2</sup>

# Experimentelle Untersuchungen

## Materialauswahl

Vorauswahl anhand von spezifischen  
Materialeigenschaften

### Materialeigenschaften

- hohes Energieabsorptionsvermögen
- hohe Oberflächenhärté
- 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

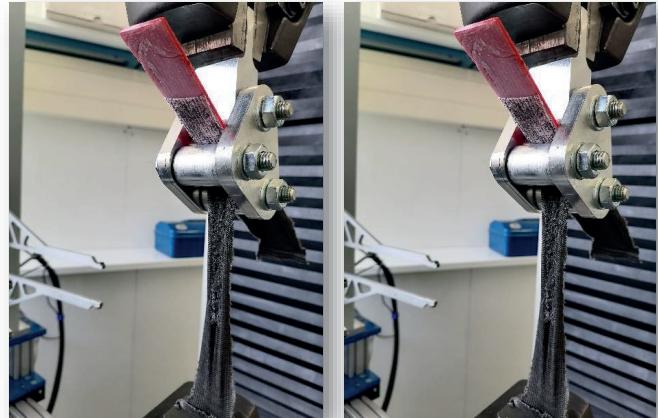
## Materialauswahl

Vorausauswahl 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



# Experimentelle Untersuchungen

## Materialauswahl

Vorausauswahl 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

# 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

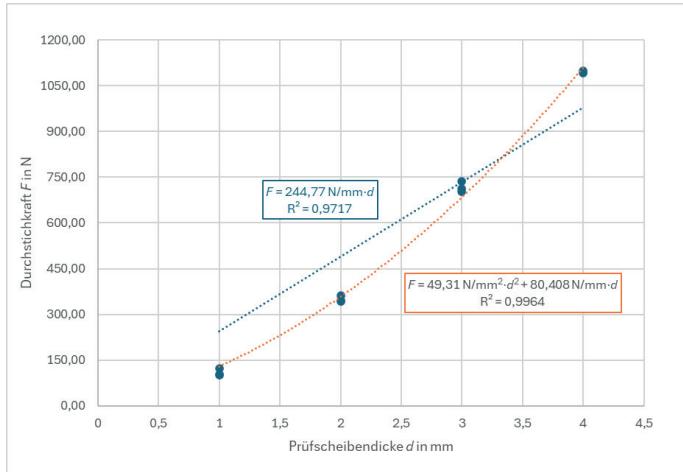
## Voruntersuchungen

- 
- 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 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

# 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

## Haftungsoptimierung

Spannvorrichtung  
für Zugproben



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

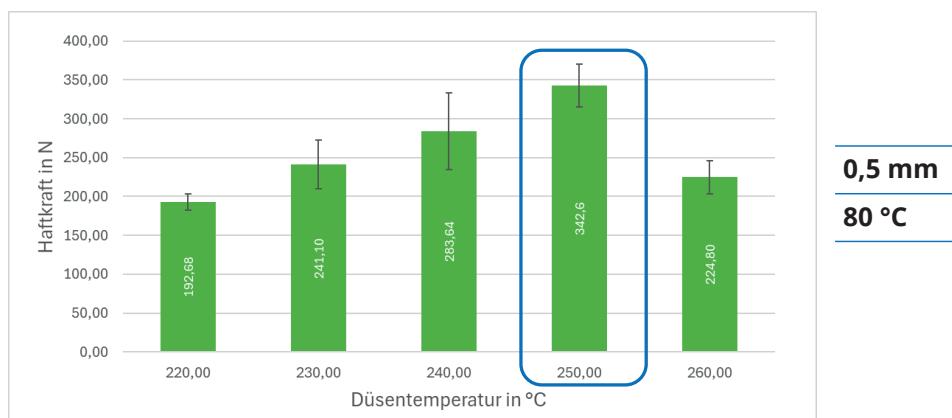
Professur Intelligente Maschinensysteme  
Fakultät Ingenieurwissenschaften



# Experimentelle Untersuchungen

## Haftungsoptimierung

Beispiel: Einfluss der Düsentemperatur



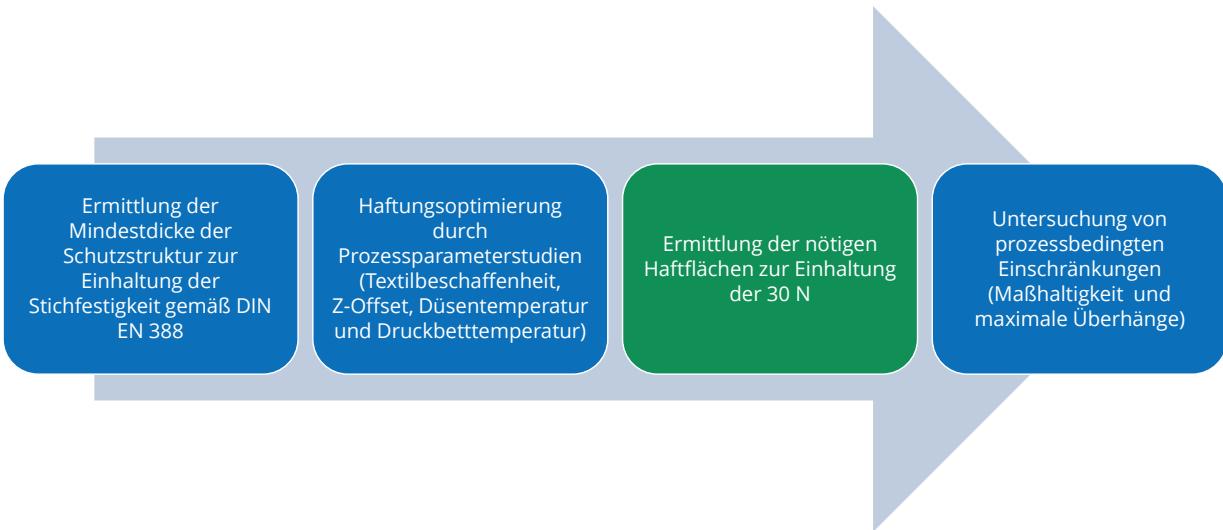
18 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.  
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme  
Fakultät Ingenieurwissenschaften



# Experimentelle Untersuchungen

## Voruntersuchungen

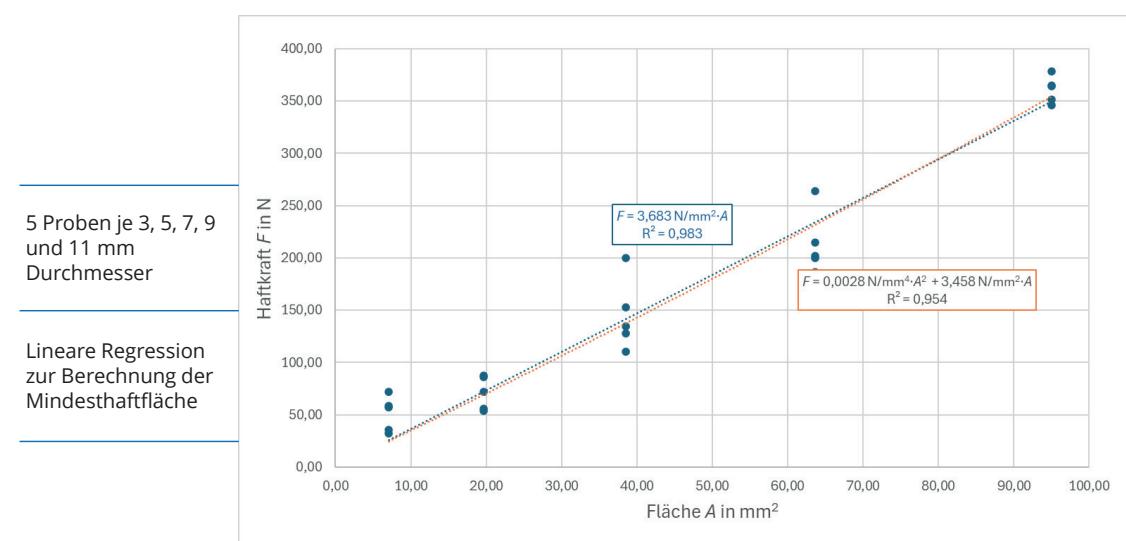


19 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.  
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme  
Fakultät Ingenieurwissenschaften | HOCHSCHULE  
MITTWEIDA

# Experimentelle Untersuchungen

## Ermittlung der nötigen Haftflächen

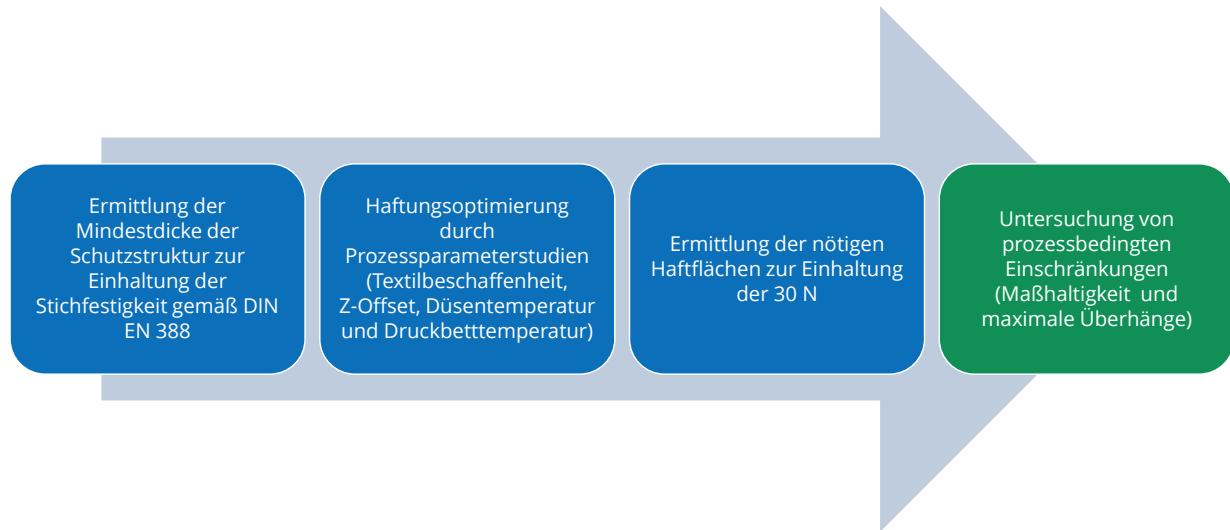


20 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.  
13.11.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme  
Fakultät Ingenieurwissenschaften | HOCHSCHULE  
MITTWEIDA

# Experimentelle Untersuchungen

## Voruntersuchungen



# Experimentelle Untersuchungen

## Prozessbedingte Einschränkungen

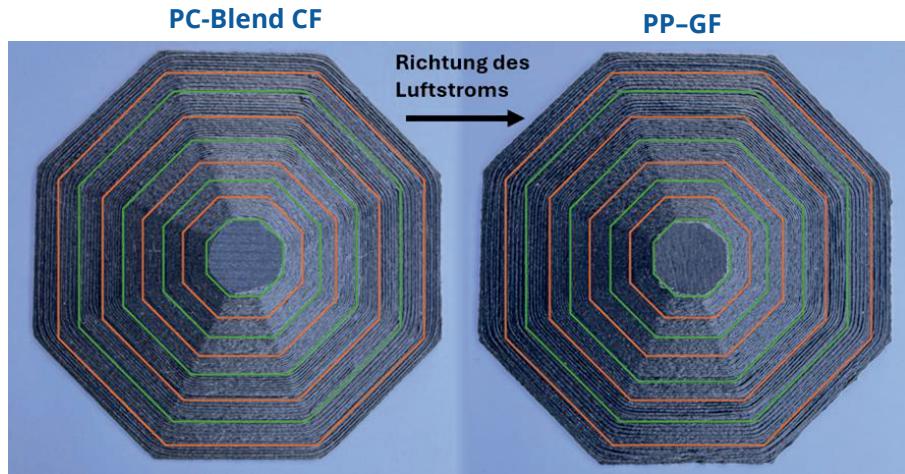
Minimaler Spalt



# Experimentelle Untersuchungen

Prozessbedingte Einschränkungen

Überhänge

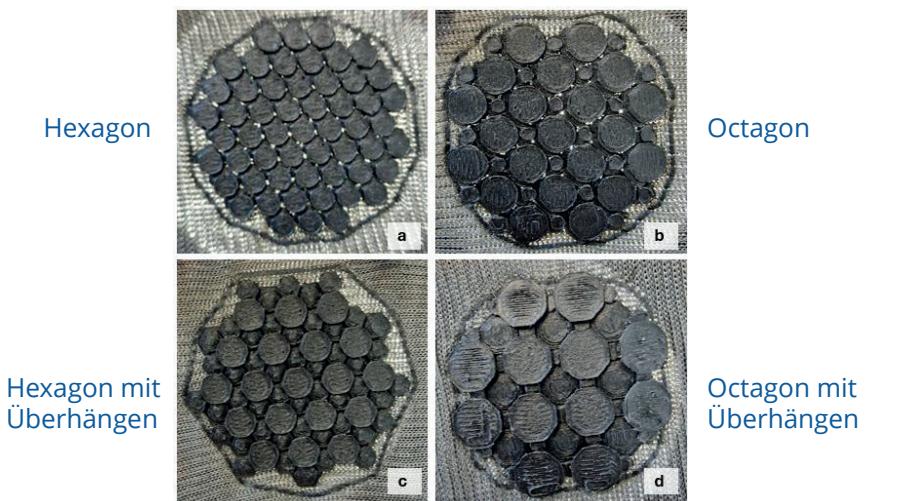


23 Forum 3D-Druck 2025 | Fabian Jonas Müller, M. Eng.  
13.11.2025 Hochschule Mittweida

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

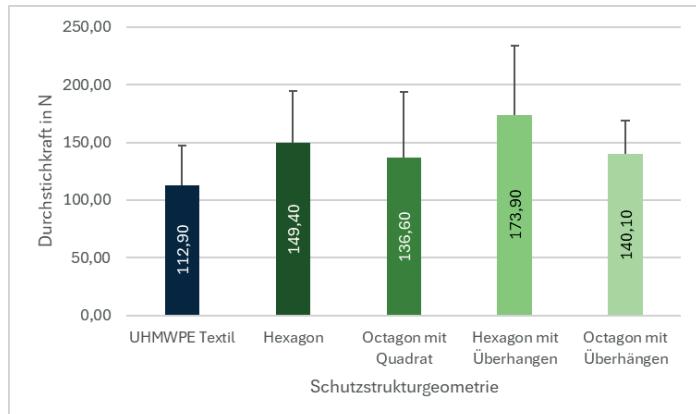
Mindestdicken für bspw. PC-CF von 0,91 mm und für PP-GF 1,10 mm

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  $7,84 \text{ mm}^2$ , TPS  $9,38 \text{ mm}^2$ )

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

minimale Durchstichfestigkeiten der einzelnen Geometrien ermittelt



# 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

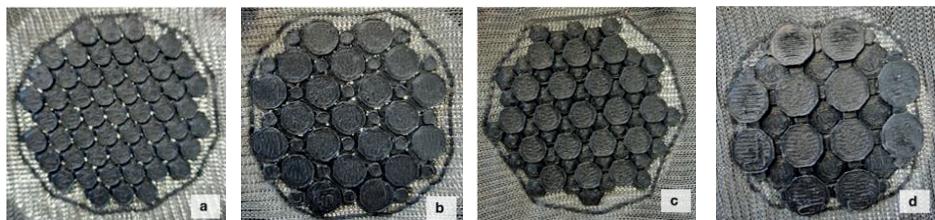
signifikant reduzierte Reißfestigkeit des Textils

Herstellbarkeit ohne Qualitätsverlust nicht gegeben

PP-GF als Haft- und Schutzmaterial

# 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 <sub>i</sub>			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

[hs-mittweida.de](http://hs-mittweida.de)



**HOCHSCHULE  
MITTWEIDA**  
University of Applied Sciences

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

## Quellen

- [1] Bundeskriminalamt, „bka.de,“ [Online].  
[https://www.bka.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/JahresberichteUndLagebilder/GewaltGegenPVB/GewaltGegenPVB/Bundeslagebild2023.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bka.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/JahresberichteUndLagebilder/GewaltGegenPVB/GewaltGegenPVB/Bundeslagebild2023.pdf?__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)

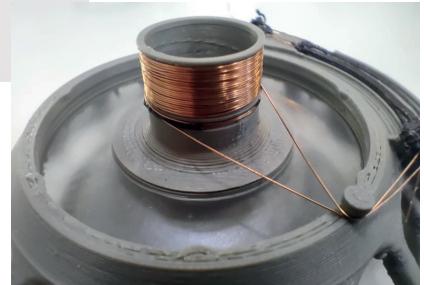


[www.konstruktionspraxis.vogel.de/geeignete-bauteile-fuer-die-additive-fertigung-identifizieren-a-761607/](http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/geeignete-bauteile-fuer-die-additive-fertigung-identifizieren-a-761607/)

# 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

 **Fraunhofer**  
IWU

## Additive Verfahren zur elektrischen Funktionsintegration

### Filamente mit leitenden Additiven

- Niedrige Material- und Analgenkosten
- geringe Leitfähigkeit



[doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.002)

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

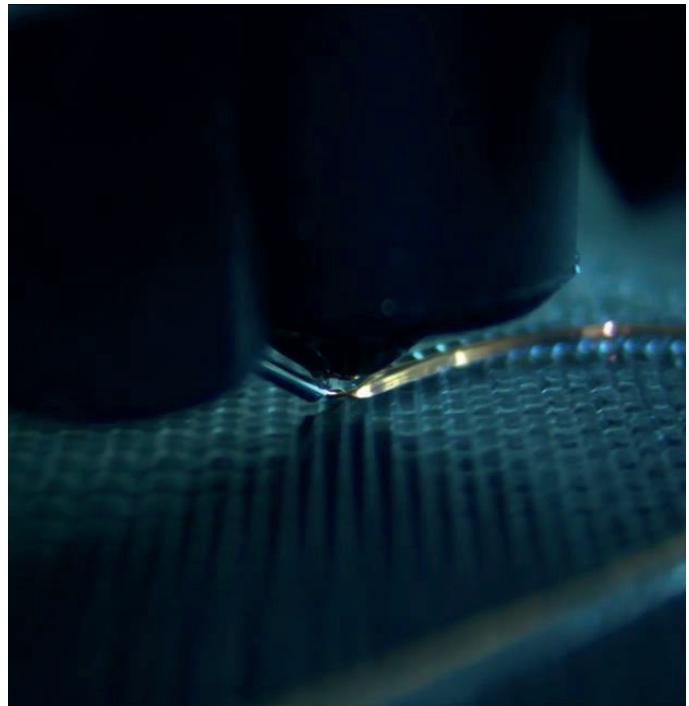
- Minimale Featuregrößen von 10 µm
- Aufhärten/Sintern nötig
- hohe Materialkosten



### 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

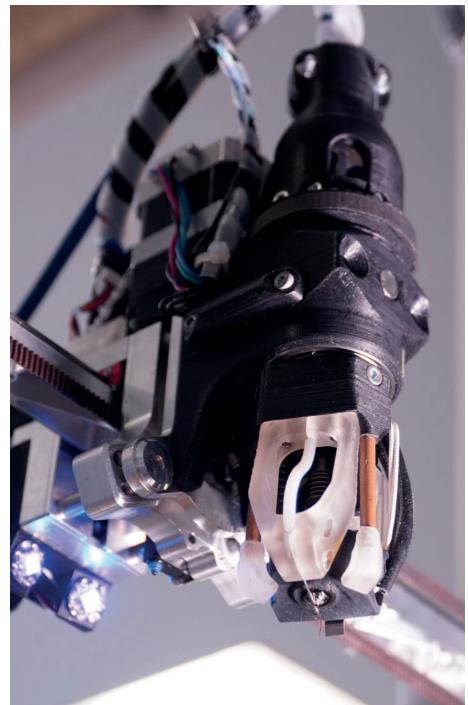
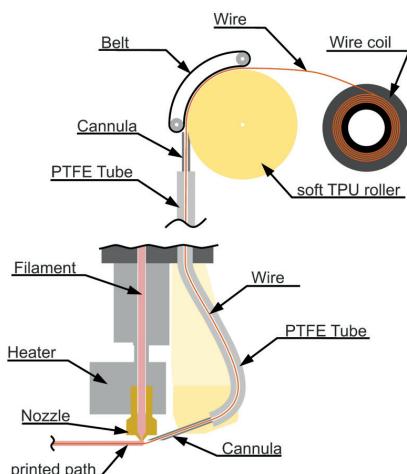
Fraunhofer  
IWU

## 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.

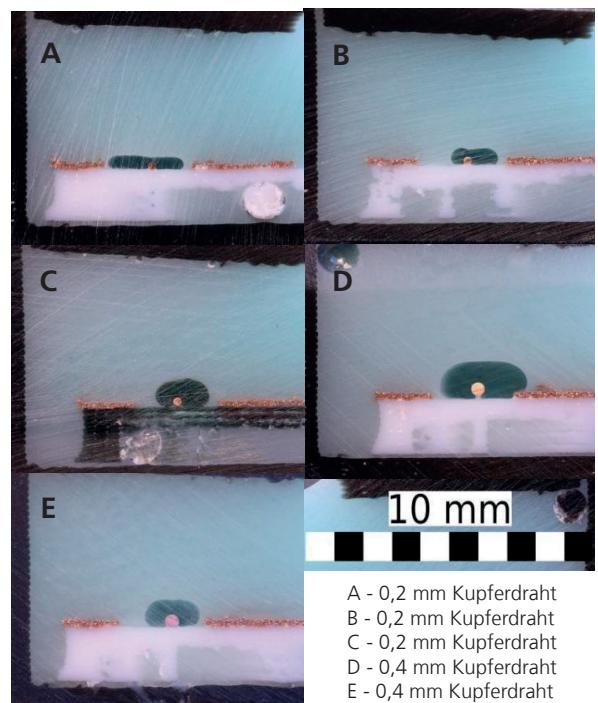


## WEAM

### 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

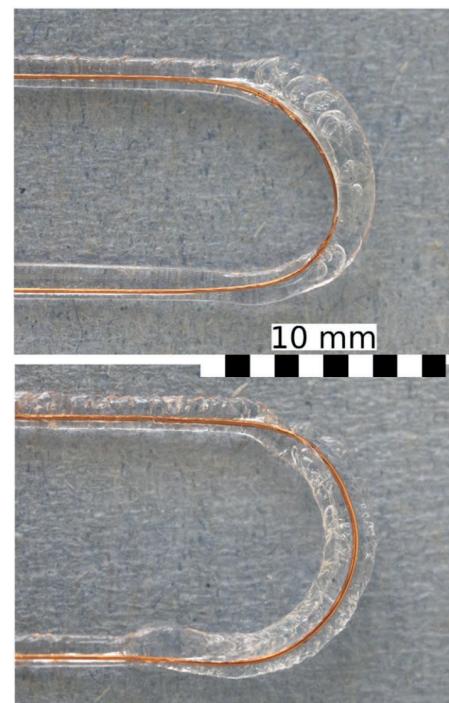


## WEAM

### 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**

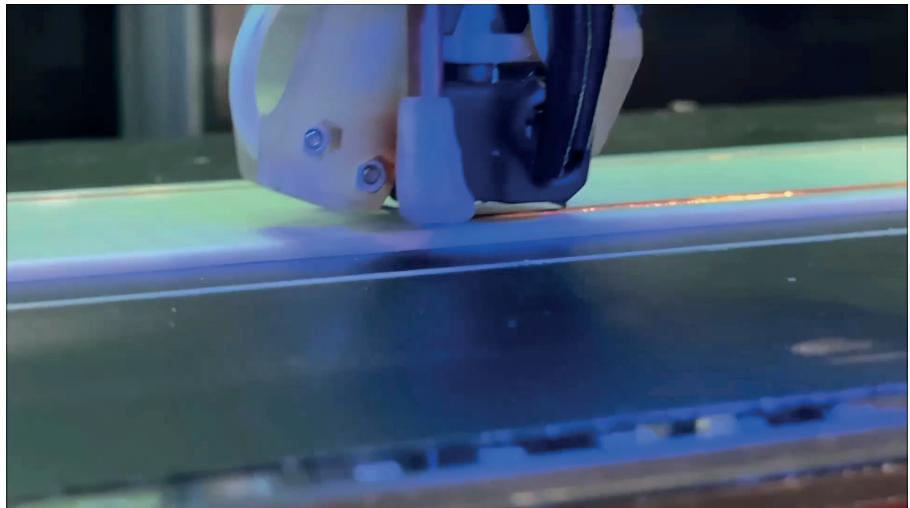


## WEAM

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**

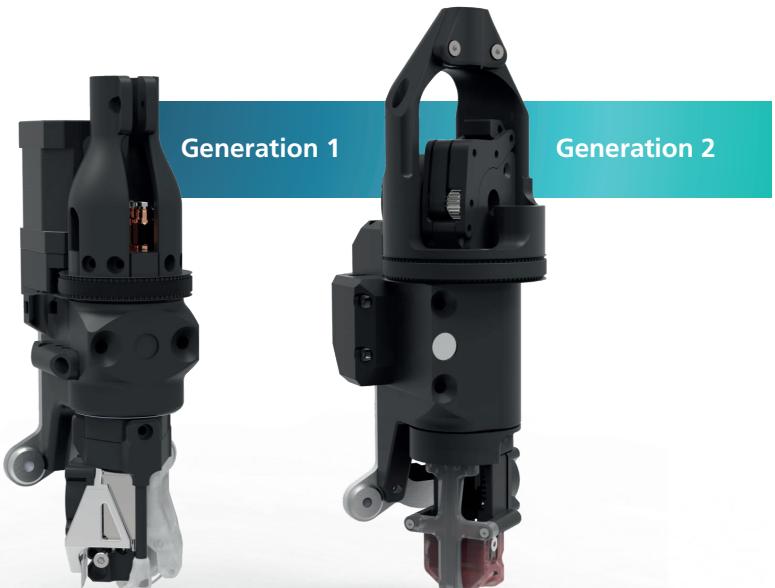


## WEAM

Anlagentechnik

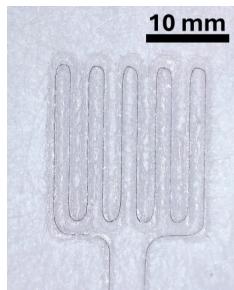
### Werkzeugkopf im Toolchanger-System

- 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 mm<sup>2</sup> FLRY-Kabeln durch spottweises umspritzen am Bauteil sowie anschließender Kontakierung

## WEAM

### Technologieausblick

**WEAM ist im Labormaßstab validiert,**

**ABER wo liegen die Grenzen der Übertragbarkeit?**

#### Aktuelle Entwicklungsfelder

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



## 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



Seite 18

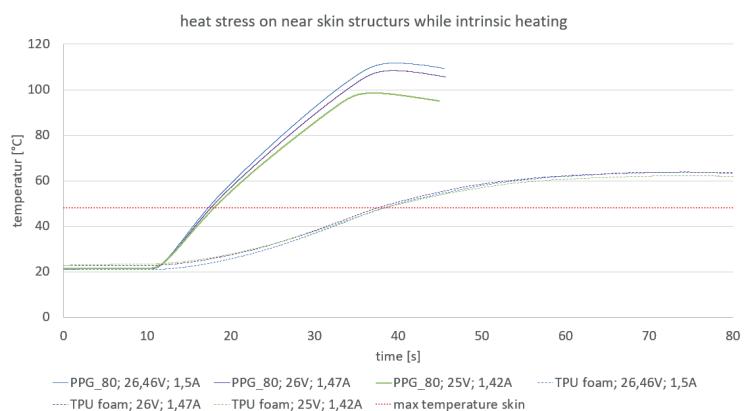
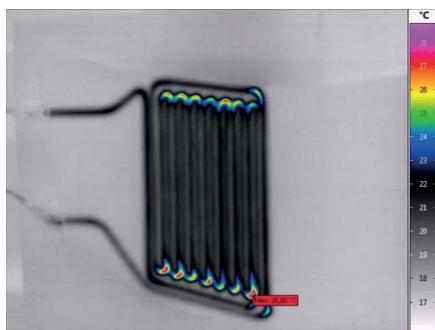
29.09.2025

© Fraunhofer IWU

 **Fraunhofer**  
IWU

## 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

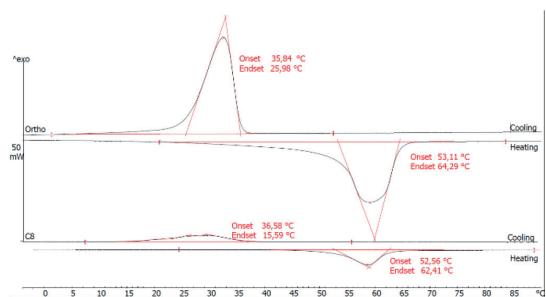
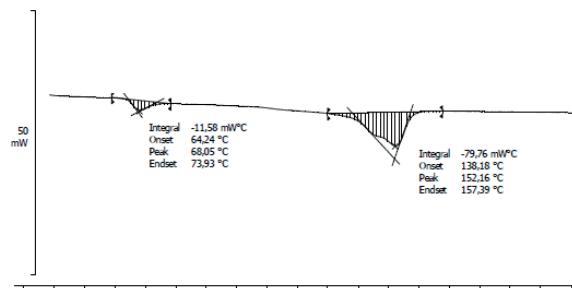
- Colorfabb Varioshore TPU (aufschäumendes Thermoplastisches Polyurethan)
  - Shore Hardness 92A – 55A
  - Gedruckt mit Gyroid Infill

## 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

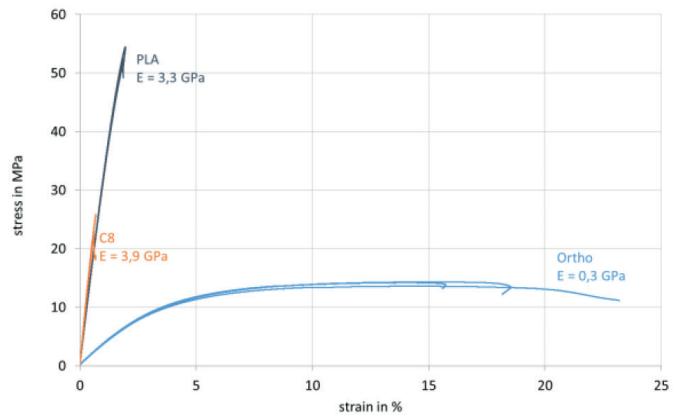


## AdaptBrace

### 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

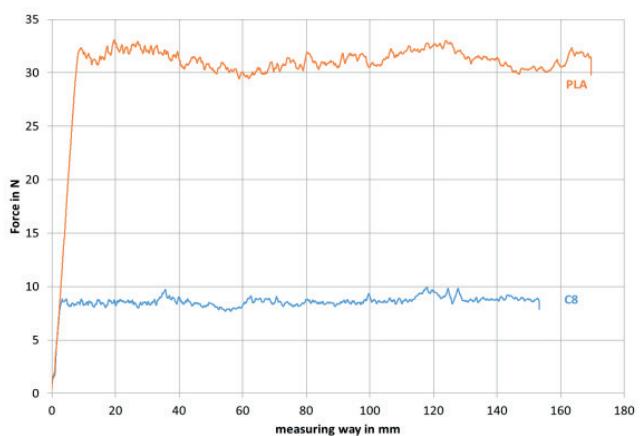
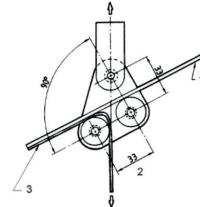


## AdaptBrace

### 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

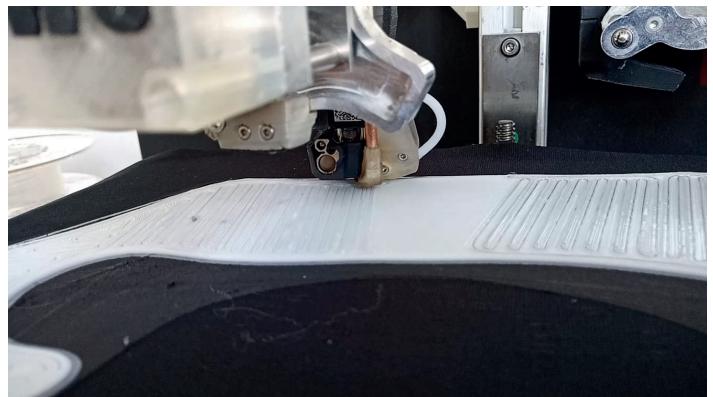


## AdaptBrace

### 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



## 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

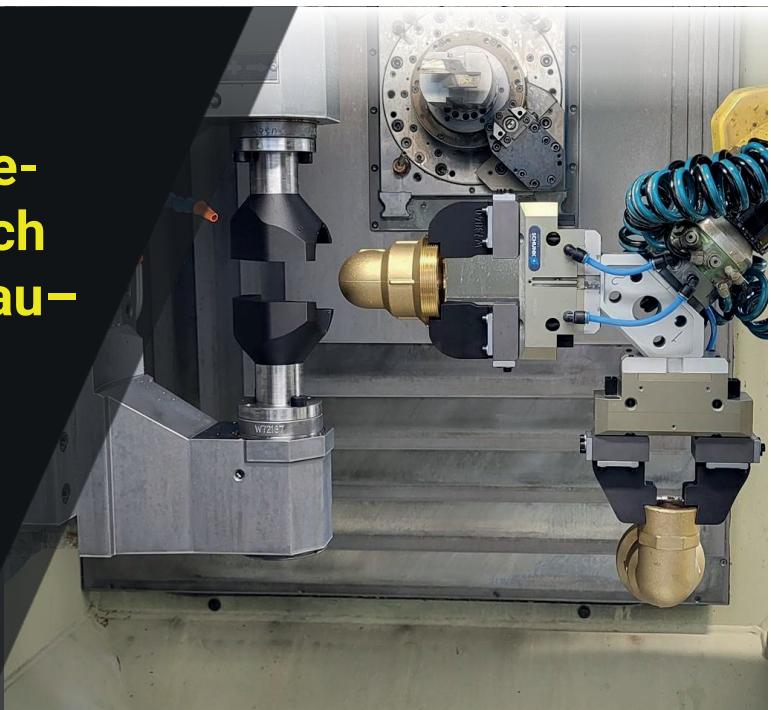
Telefon +49 351 4772-2230

[Valentin.Wilhelm.Mauersberger@iwu.fraunhofer.de](mailto:Valentin.Wilhelm.Mauersberger@iwu.fraunhofer.de)

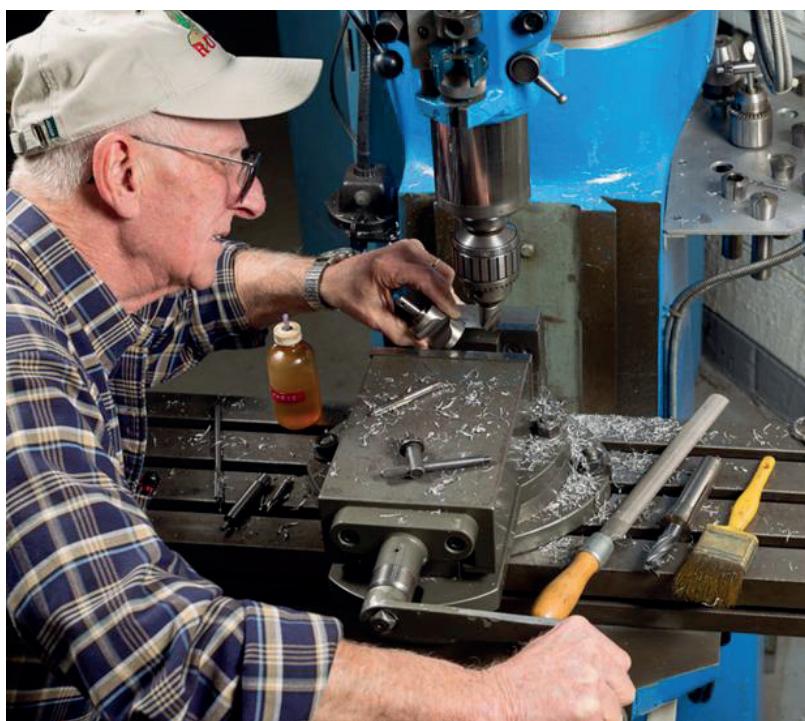


**Können mechanisch ge-fertigte Bauteile wirklich durch 3D-gedruckte Bau-teile ersetzt werden?"**

Joachim Kasemann  
Mark3D GmbH



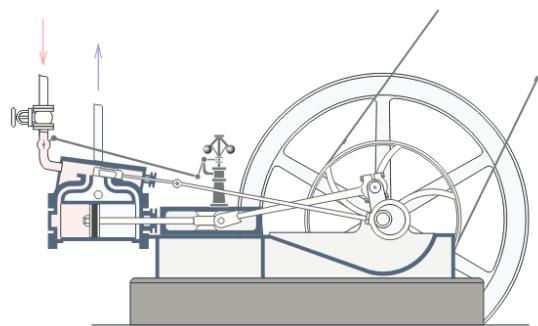
 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts



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

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

## umdenken!



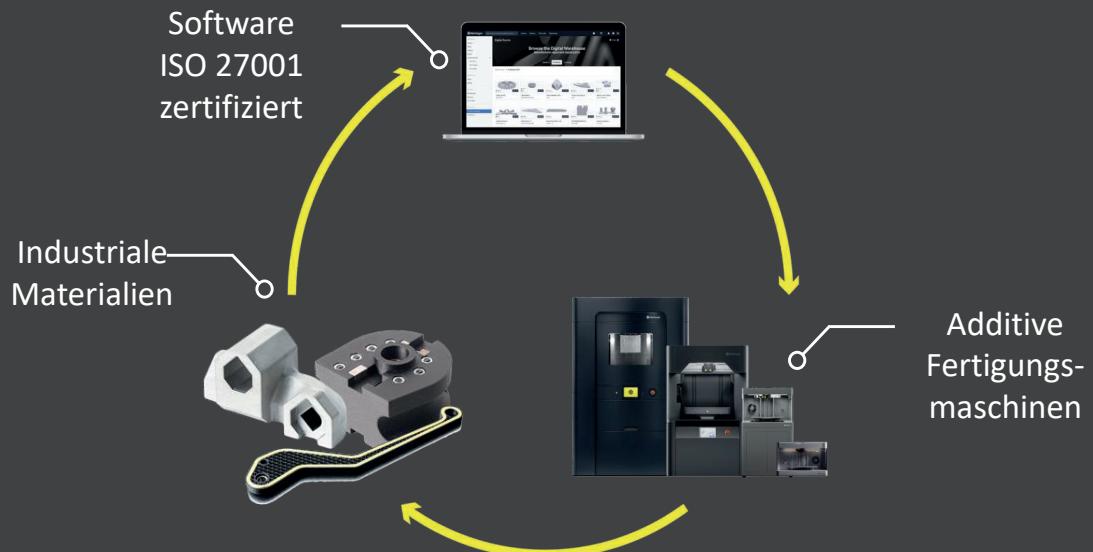
 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

**Easy to go ...**

- Fachkräftemangel
- Plug-&-Play auf industriellem Niveau



## Die digitale Bäckerei



5 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

**Verfügbarkeit**



**Unabhängigkeit**



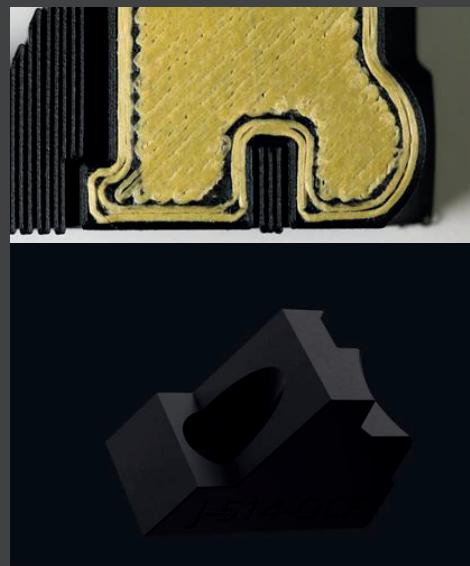
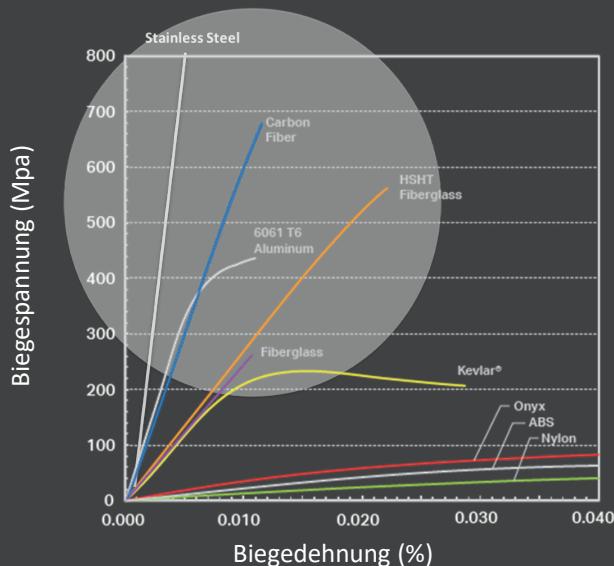
**Innovation**



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

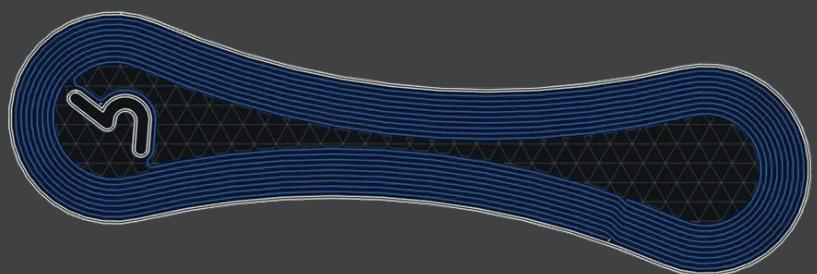


9 13.08.2025

 **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.

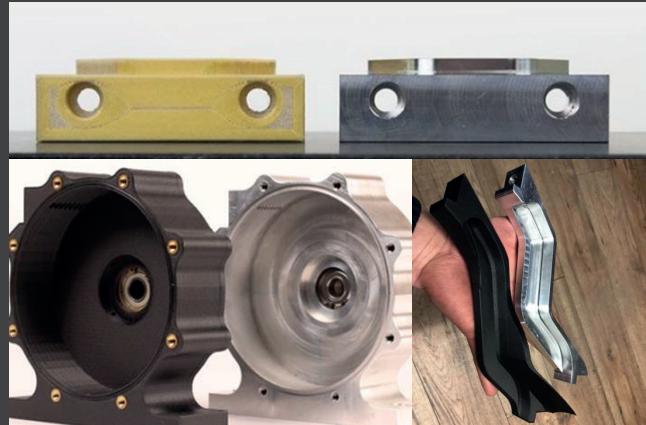


10 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

## Umdenken beginnt im Kopf!

Mit Endlosfasern verstärkte,  
3D gedruckte Bauteile  
können viele **Aluminium-**  
**bauteile** direkt **ersetzen**.



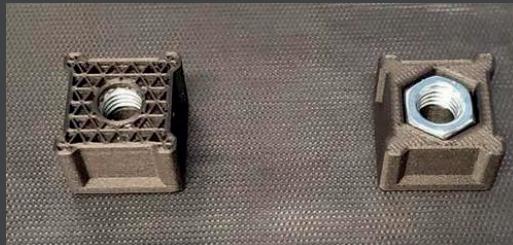
11 13.08.2025

 **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



13 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

**Bauteil:** Sauggreifer

**3D gedruckt**

Druckkosten: € 100,00

Druckzeit: 24 Stunden

Material: Onyx und Carbon

Gewicht: 189 g

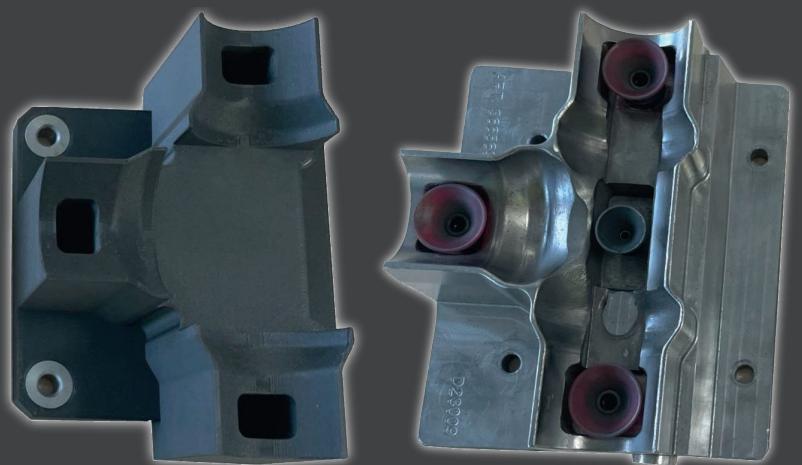
**Mechanisch gefertigt**

Kosten: € 1.145,00

Lieferzeit: 4-6 Wochen

Material: Stahl

Gewicht: 3,2 kg



14 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

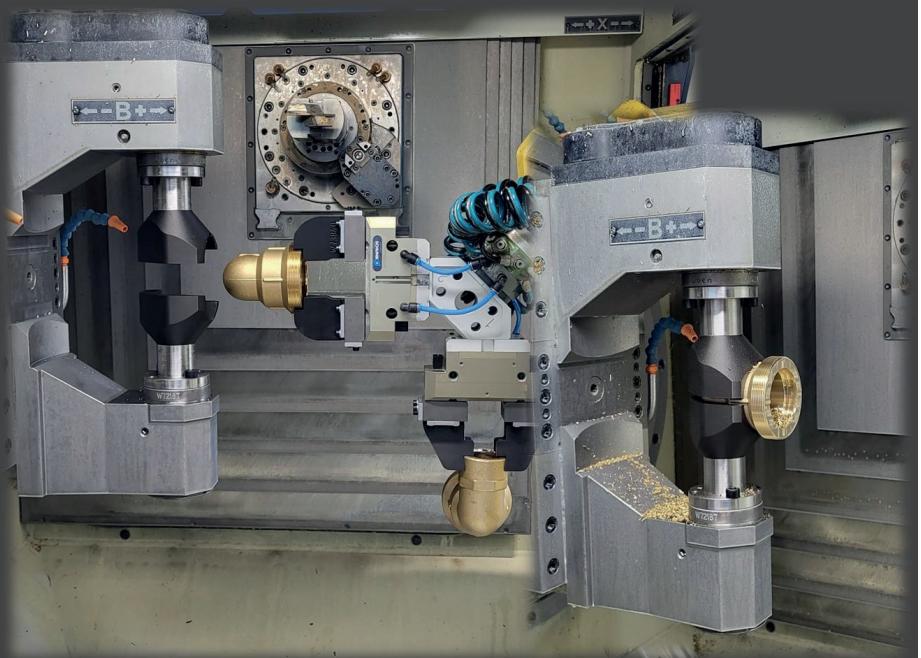
**Bauteil:** Spannbacken

**3D gedruckt**

Druckkosten: € 350  
Druckzeit: 48 Stunden  
Material: Onyx, Carbon

**Mechanisch gefertigt**

Kosten: € 723  
Lieferzeit: 4 Wochen  
Material: Stahl



15 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
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

 **Markforged**  **Mark3D**  
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

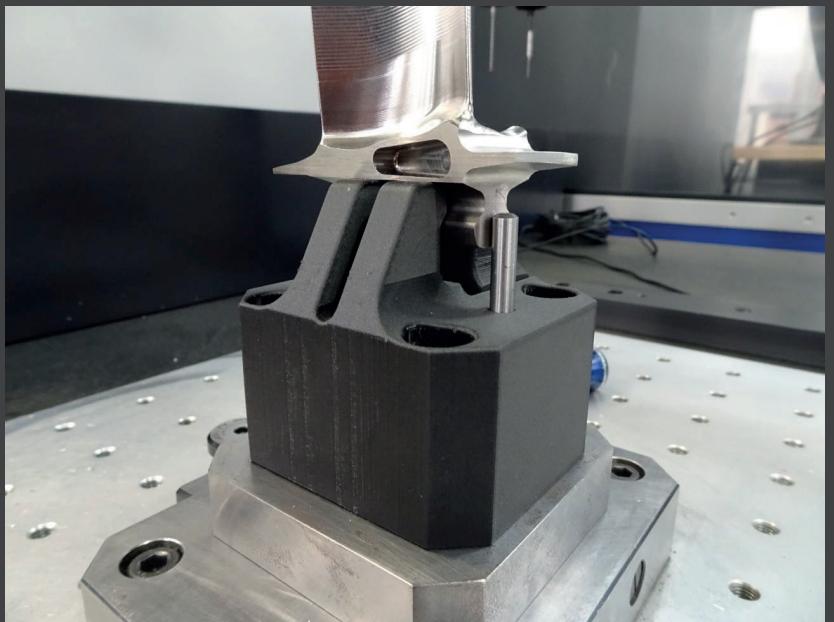
**Bauteil:** Messvorrichtung

**3D gedruckt**

Druckkosten: € 330,00  
Druckzeit: 3 Tage  
Material: Onyx und Carbon

**Mechanisch gefertigt**

Kosten: € 1.590,00  
Lieferzeit: 10 Tage  
Material: Stahl



19 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

**Bauteil:** Reibschweißbacke

**3D gedruckt**

Druckkosten: € 48,00  
Druckzeit: 11 Stunden  
Material: Onyx

**Mechanisch gefertigt**

Kosten: € 1.200,00  
Lieferzeit: 21 Stunden  
Material: Stahl



20 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

**Bauteil:** Magnetgreifer für Montageanlage

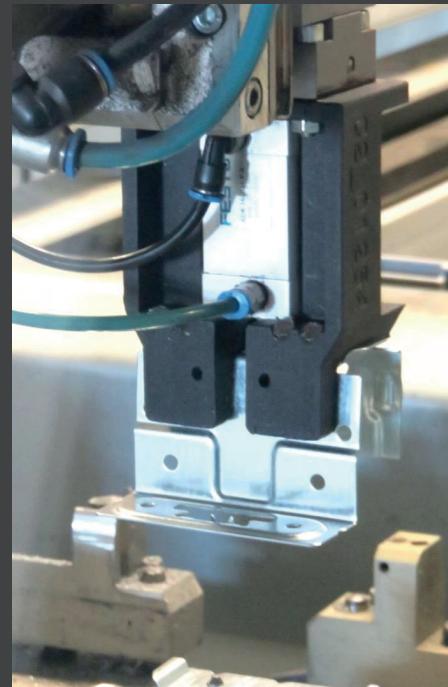
**3D gedruckt**

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

**Mechanisch gefertigt**

Fertigungskosten: € 217,00  
Material: Aluminium

Deutlich weniger Störungen und Stillstandszeiten



21 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

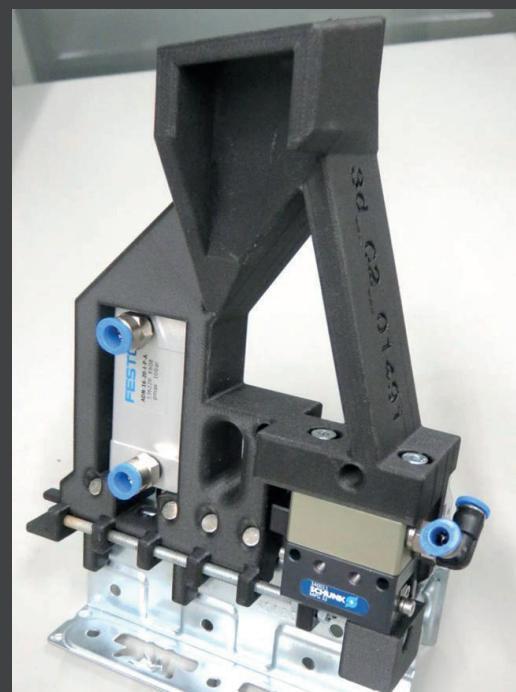
**Bauteil:** Magnetgreifer

**3D gedruckt**

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

**Mechanisch gefertigt**

Fertigungskosten: Bauteil ist nicht herstellbar



22 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

**Bauteil:** Vorrichtung

**3D gedruckt**

Druckkosten: € 95,50  
 Druckzeit: 2 Tage, 21 Stunden  
 Material: Onyx

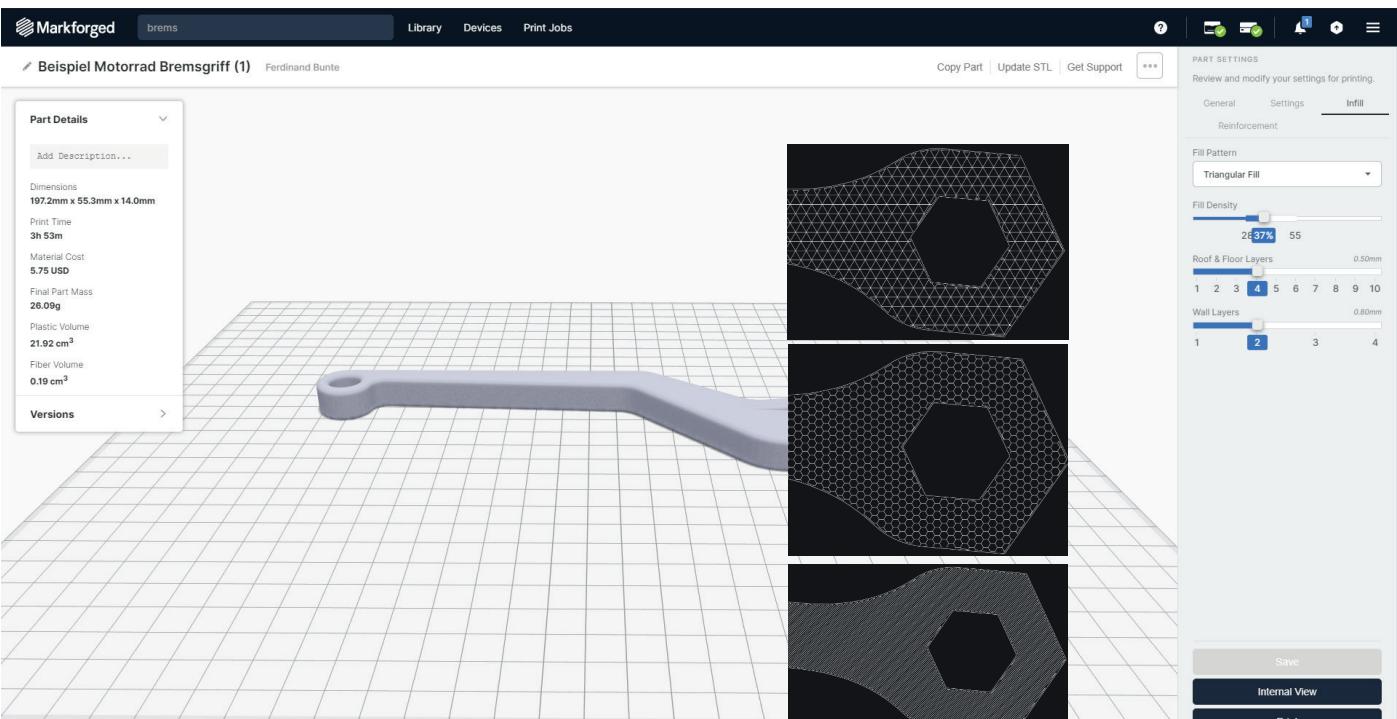
**Mechanisch gefertigt**

Fertigungskosten: € 1.329,00  
 Lieferzeit: 2 Wochen  
 Material: Stahl



23 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts



**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: 26.09g  
 Plastic Volume: 21.92 cm<sup>3</sup>  
 Fiber Volume: 0.19 cm<sup>3</sup>

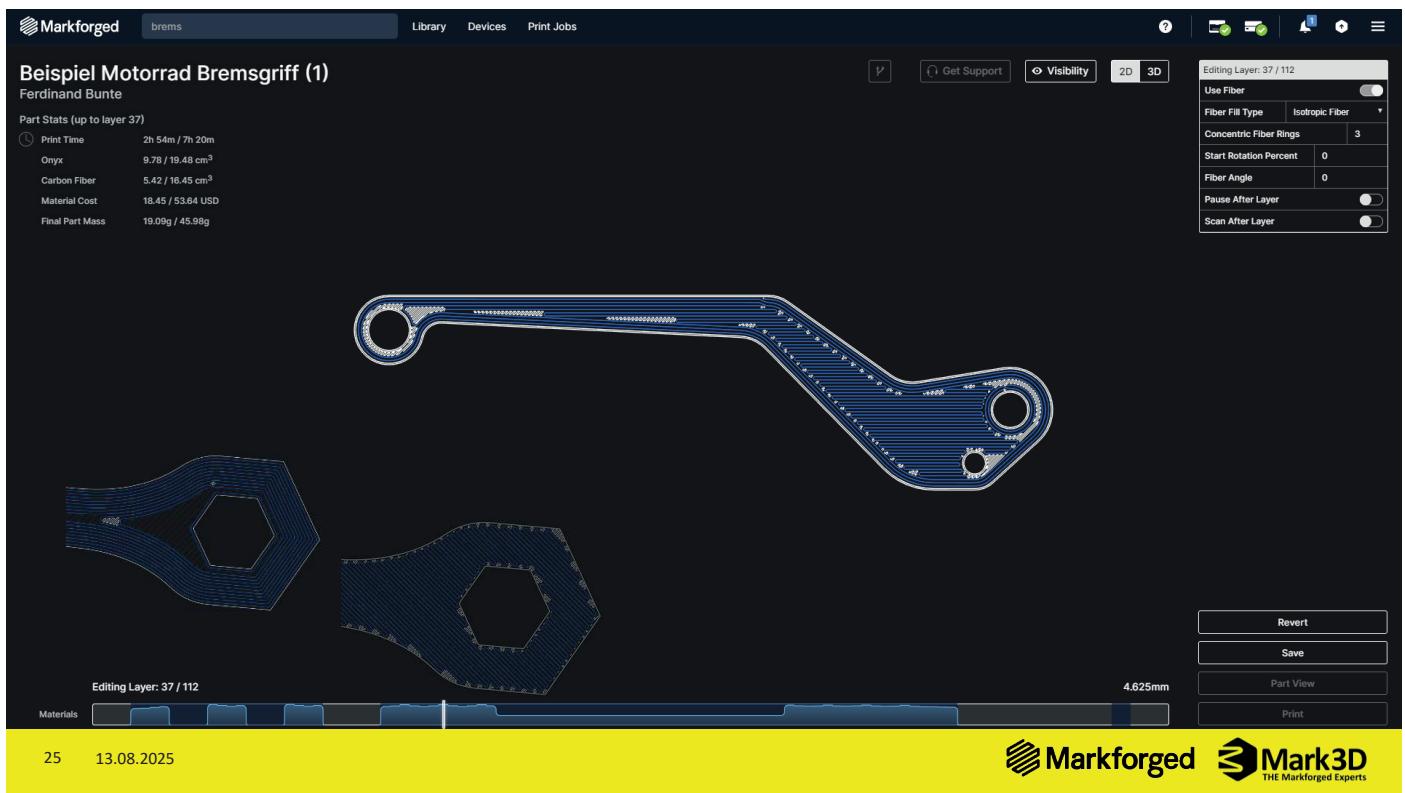
Versions: >

**PART SETTINGS**  
 Review and modify your settings for printing.  
 General Settings Infill  
 Reinforcement  
 Fill Pattern: Triangular Fill  
 Fill Density: 57% 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



## 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

26 13.08.2025

Markforged Mark3D THE Markforged Experts

# Serienfertigung?

Markforged Printfarm

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



27 13.08.2025

 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

## Herzlichen Dank



Joachim Kasemann  
CEO  
[jk@mark3d.de](mailto:jk@mark3d.de)  
+49 170 6987722



 **Markforged**  **Mark3D**  
THE Markforged Experts

# **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 Mehrachsensystem 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 Wärmebeanspruchstahl 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 rückstandslos 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 Temperaturlösung 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 durchwärmten werden.

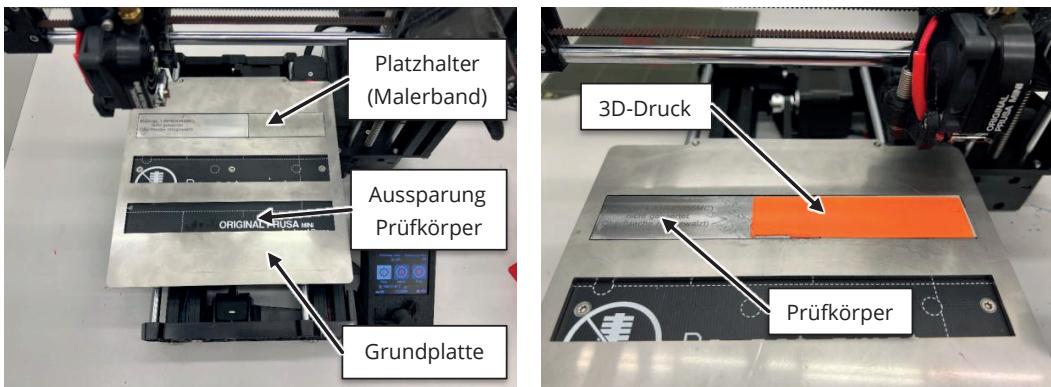


Abbildung 1: Versuchsaufbau für den Überlappungsdruck – eingesetzter Prüfkörper aus Stahl 1.2343 und Platzhalter (überklebt mit Malerband) in der Grundplatte

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.

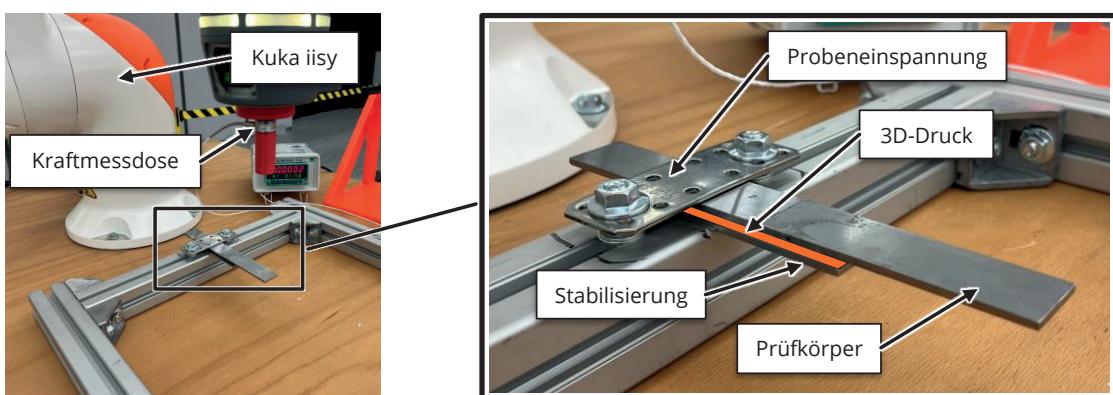


Abbildung 2: Roboterbasierter Prüfaufbau zur Bestimmung der Haftkräfte mit KUKA iisy, Kraftmessdose und Probenhalterung (Detailansicht mit Stabilisierung und Prüfkörper)

## 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, Zugegriffen: 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. Zugegriffen: 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“. Zugegriffen: 7. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2022/12/FIBERLOGY\\_NYLON\\_PA12CF15\\_TDS.pdf](https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2022/12/FIBERLOGY_NYLON_PA12CF15_TDS.pdf)

## Next Level Additive Manufacturing:

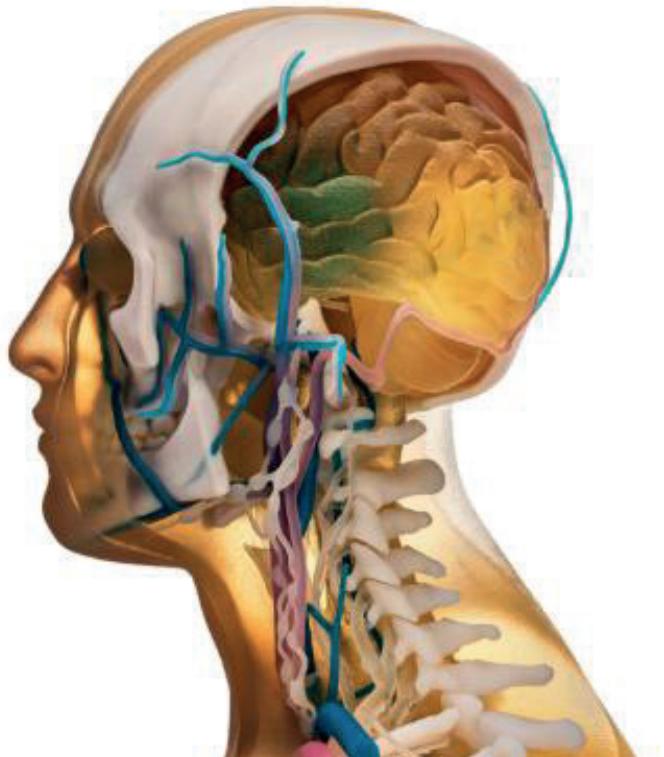
### Stratasys News - neue Materialien und Technologien

Mittweida, 15. Oktober 2025

Michael Anton

Material Business Manager EMEA

Make additive work for you™



## AGENDA



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



## Michael Anton

Berufsausbildung mit Abitur



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



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



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



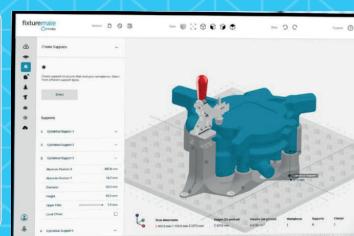
Make additive work for you™

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



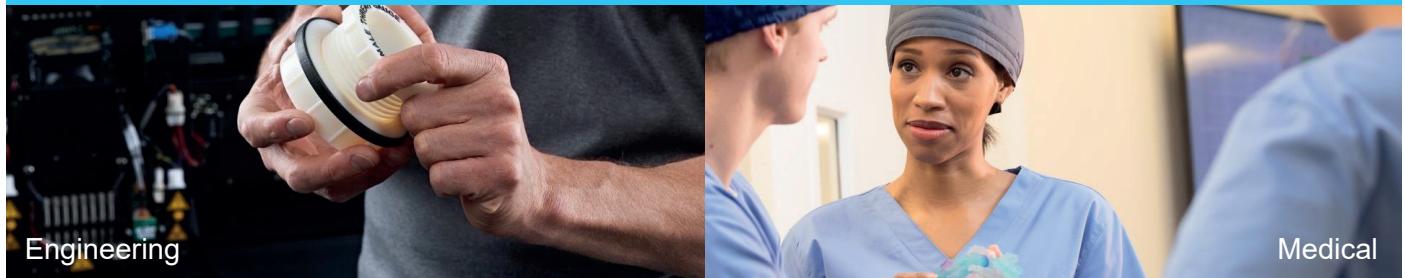
## Stratasys

**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.**





## **Stratasys = Systems + Materials + Software + Service**



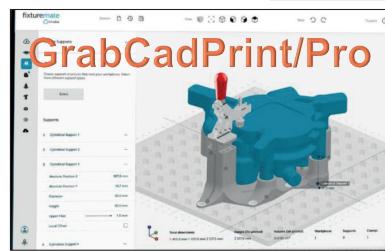


**stratasys**

Make additive work for you™

5

## Stratasys Überblick - Technologien



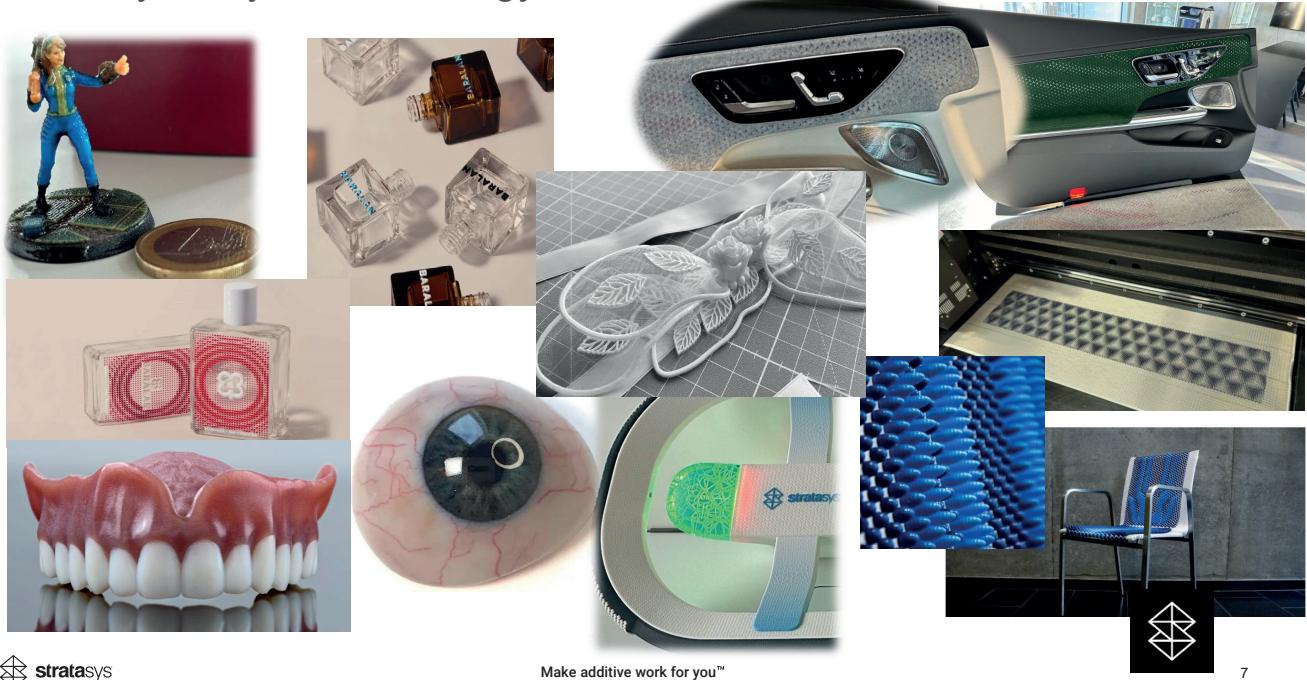
 stratasys

Make additive work for you™

A small, white, geometric logo is centered at the bottom of the page. It consists of a hexagon divided into six triangles by lines connecting the center to each vertex. The logo is enclosed in a thin black border.

6

## Stratasys PolyJet Technology

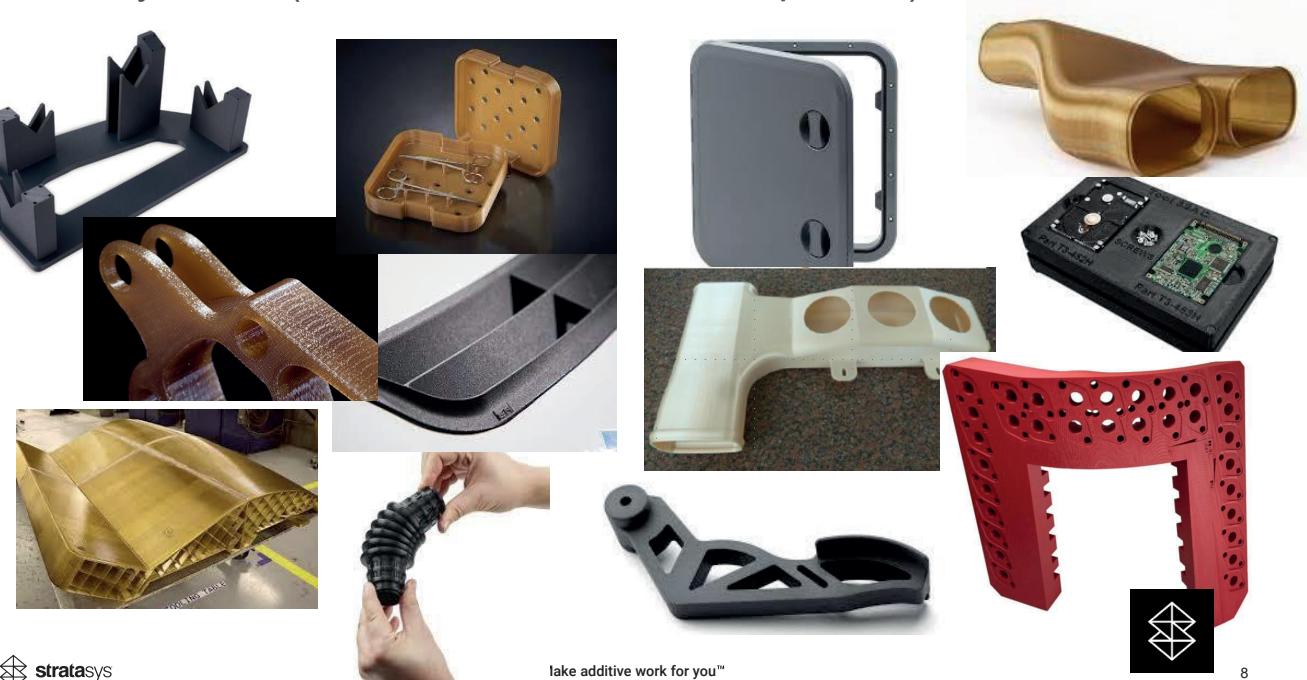


 stratasys

Make additive work for you™

7

## Stratasys FDM (incl. validated Materials, OpenAM)



 stratasys

lake additive work for you™

8

## Stratasys SLA (NEO und NEO+)



9

## Stratasys OriginOne and Two – P3 DLP



10

## Stratasys SAF - Powder



## 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



Make additive work for you™



## AGENDA



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



Make additive work for you™

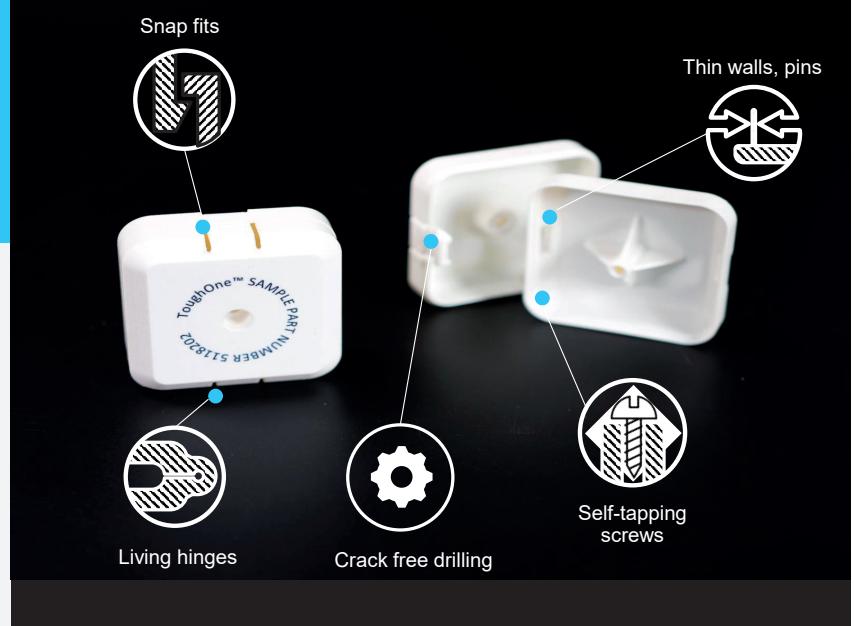
13



## PolyJet ToughONE™

Launched:  
June 10<sup>th</sup>, 2025

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



Make additive work for you™

14



## FDM TPU 92A Red

Launched:  
July 7<sup>th</sup>, 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™

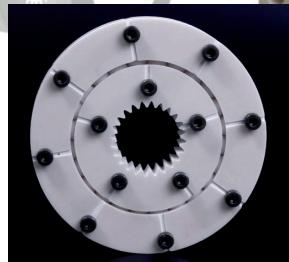
16

## 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)

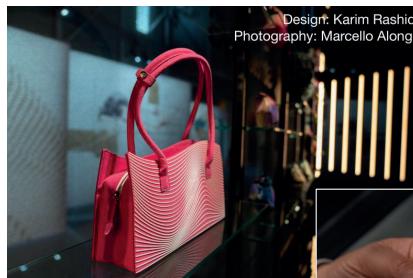


Make additive work for you™

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, ..... .



Make additive work for you™

19

## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

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



Make additive work for you™

20



**THANK  
YOU**



**stratasys**

Make additive work for you™

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

Laura Römer, M.Sc.

-Additive Fertigung-



Laserinstitut  
Hochschule Mittweida

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

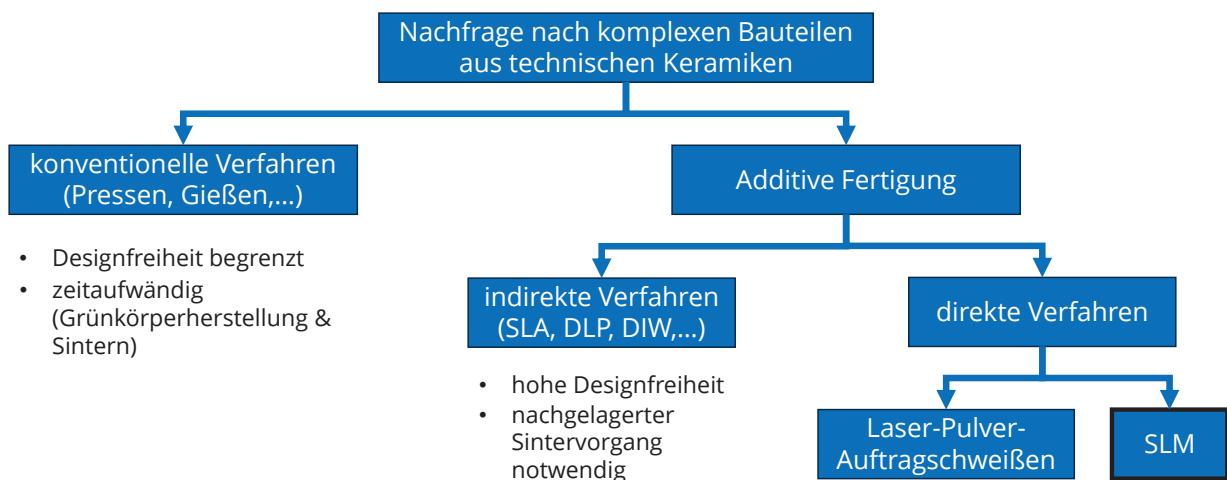


Kofinanziert von der  
Europäischen Union



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

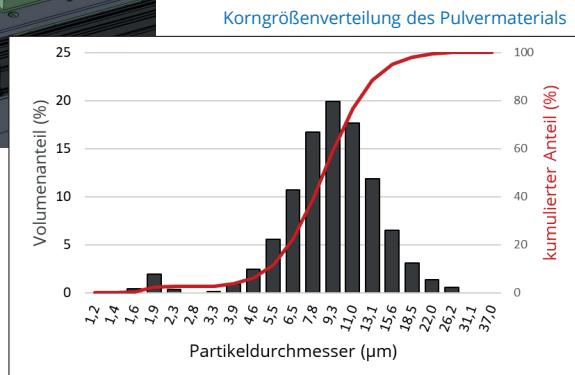
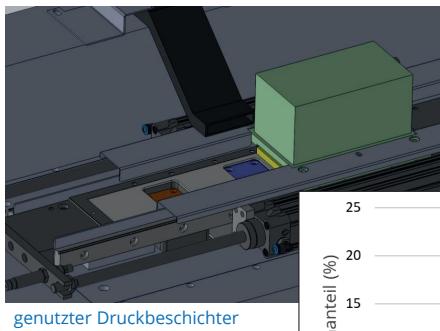
## Motivation – warum Keramik-SLM?



**Problematiken Keramik-SLM:** hohe Schmelztemperaturen, geringe Thermoschockbeständigkeit, Rissbildung  
→ Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mittels CO<sub>2</sub>-Laser

## Anlagentechnik und Pulvermaterial

CO <sub>2</sub> - Laser	
P <sub>max</sub> = 300 W	
λ = 10,6 μm	
f = 300 mm	
Fokus = 520 μm	
Druckbeschichter	
Bauraum: 40x40 mm	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Pulver	
d90 < 14 μm	
99,7 % Reinheit	
unregelmäßige Partikelform	



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

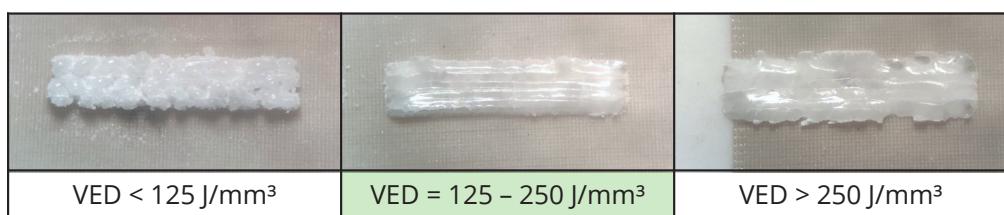
## Prozessentwicklung mit CO<sub>2</sub> - Laser

Vorgehen:

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

Ergebnisse:

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



→ Ausgangspunkt für Aufbau von Volumenkörpern

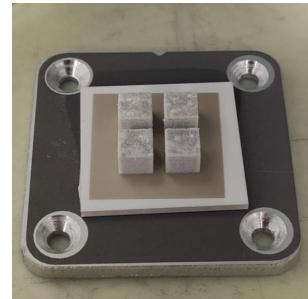
4 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxiderkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.  
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

## Einfluss der Prozessparameter auf Bauteildichte und Rissbildung

Vorgehen:

- Aufbau von Volumenkörpern (Würfel 5x5 mm)
- Substrat:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (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 $\mu\text{m}$
Schichtdicke $l_z$	10 – 40 $\mu\text{m}$
Scanstrategie	bidirekt. Linienbestrahlung
Drehung pro Schicht	139°



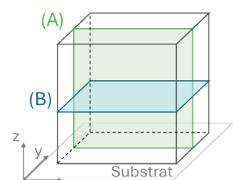
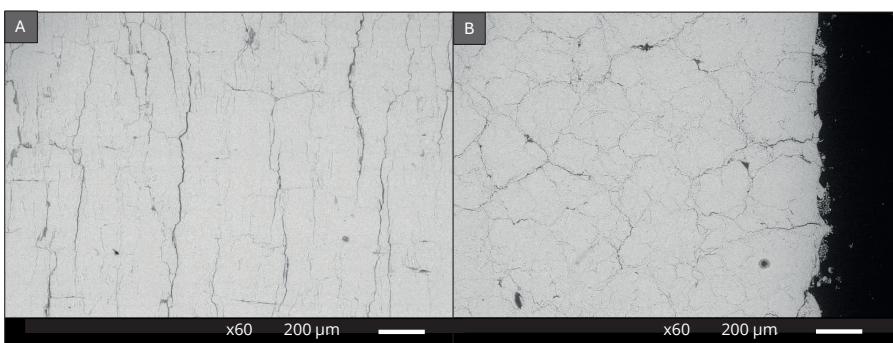
- Querschliffherstellung für die bildanalytische Dichtemessung und Rissanalyse

5 **Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxiderkeramischer 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

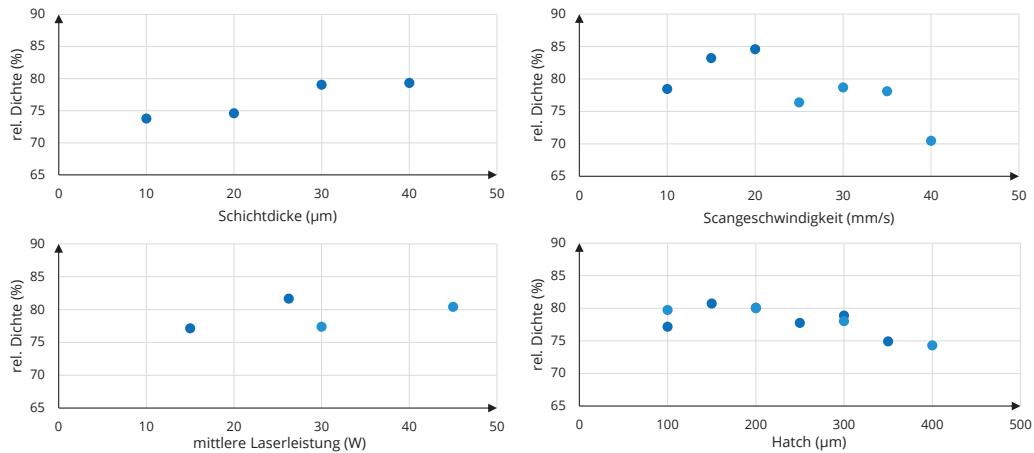


→ Bauteildichte hauptsächlich durch Rissanzahl und -größe bestimmt

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

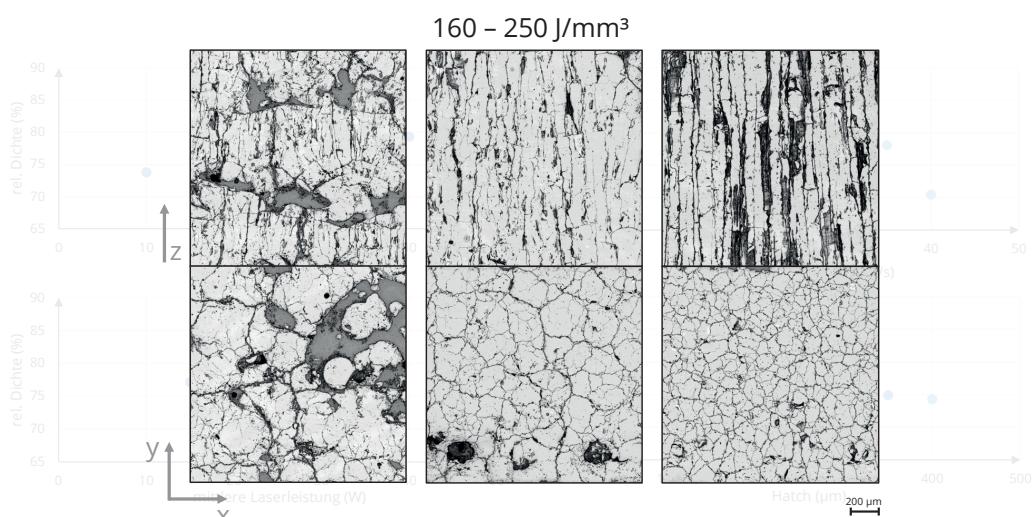
## Einfluss der Prozessparameter auf Bauteildichte und Rissbildung

- rel. Bauteildichten im Bereich 70 – 85 %



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

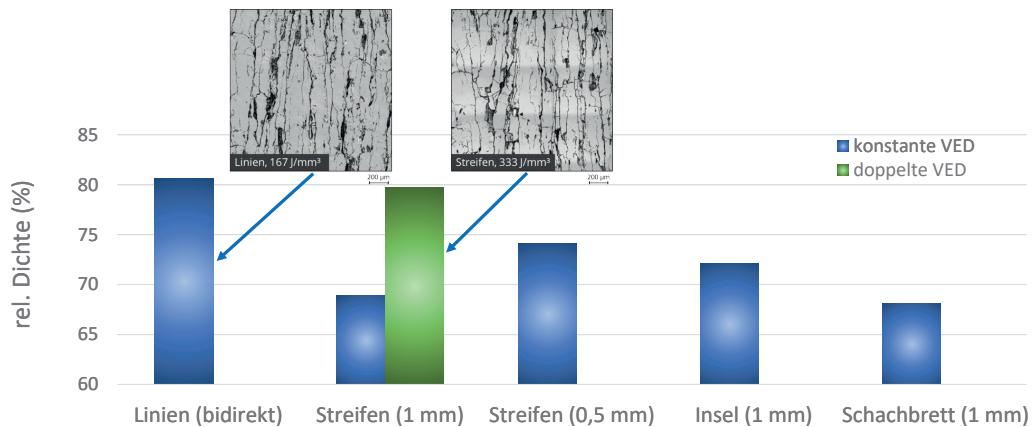
## Einfluss der Prozessparameter auf Bauteildichte und Rissbildung



8 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxiderkeramischer 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

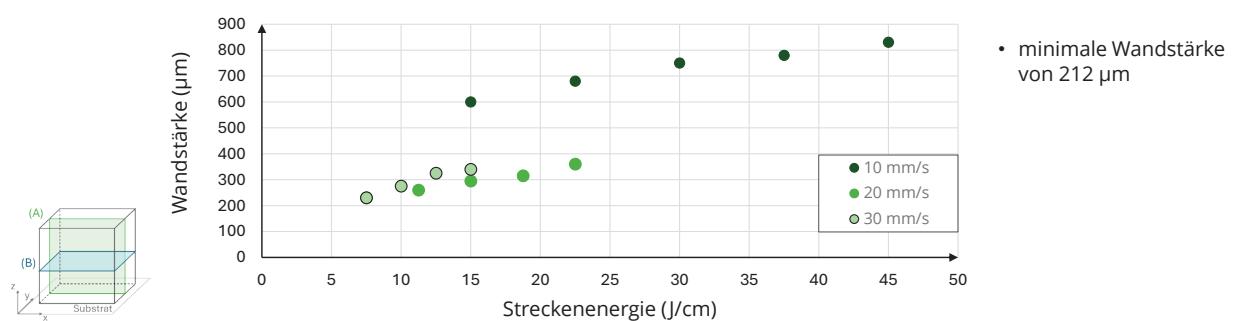
9 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxiderkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.  
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

## 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:



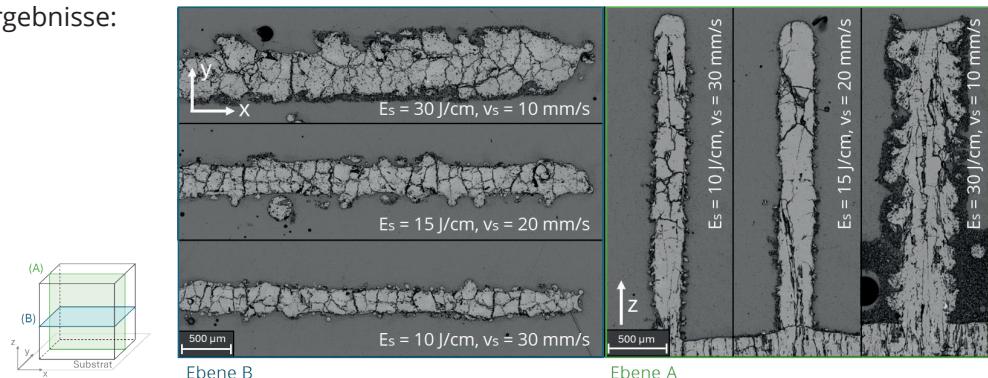
10 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxiderkeramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.  
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

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

11 Untersuchungen zum SLM von Aluminiumoxid zur direkten Herstellung oxideramischer Bauteile | Laura Römer, M.Sc.  
(C) 30.09.2025 Laserinstitut 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 ( $45^\circ$ -Überhänge)



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

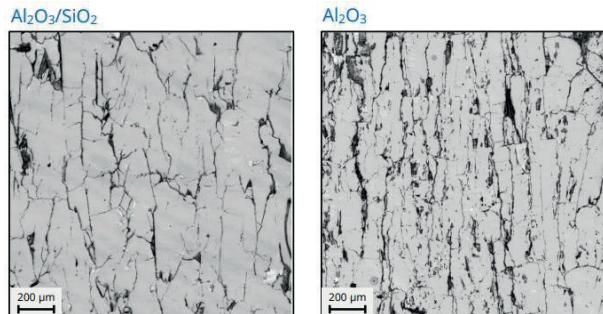
## Stoffsystem $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$

Vorgehen:

- erhöhter Glasphasenanteil in Bauteilen soll zur Rissminderung beitragen
- Aufbereiten eines Pulvermaterials aus 80 gew.-%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und 20 gew.-%  $\text{SiO}_2$
- Herstellung von Volumenkörpern unter Variation von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatch

Erste Ergebnisse:

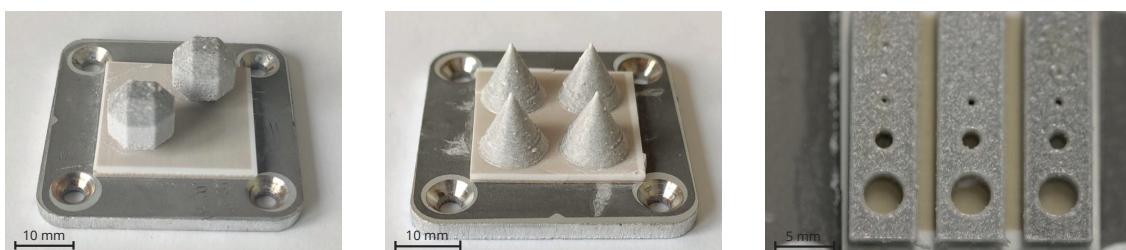
- max. relative Dichte von 91,6 %
- geringere Laserleistungen notwendig
- ähnliche Spannungsrisse in Randbereichen der Proben bei hohen VED



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

## Zusammenfassung

- prinzipiell ist die direkte Herstellung von Bauteilen aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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 oxiderkeramischer 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](http://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](http://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.<sup>1,2</sup>, Barz, A.<sup>1</sup>; Bliedtner, J.<sup>1</sup>; Rädlein, E.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

<sup>2</sup> 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



# Gliederung

## 1. Einführung

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

### 2.2 Problemstellungen und Lösungsansätze

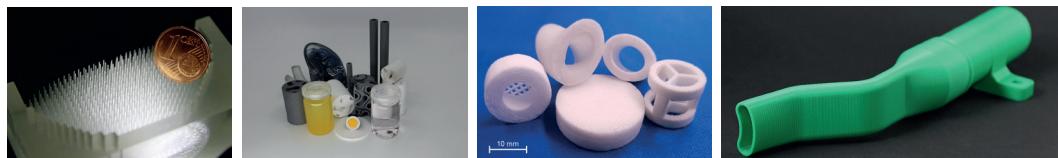
## 3. Fazit und Ausblick

# 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 Bliedtner an der EAH Jena)

### Nachteile

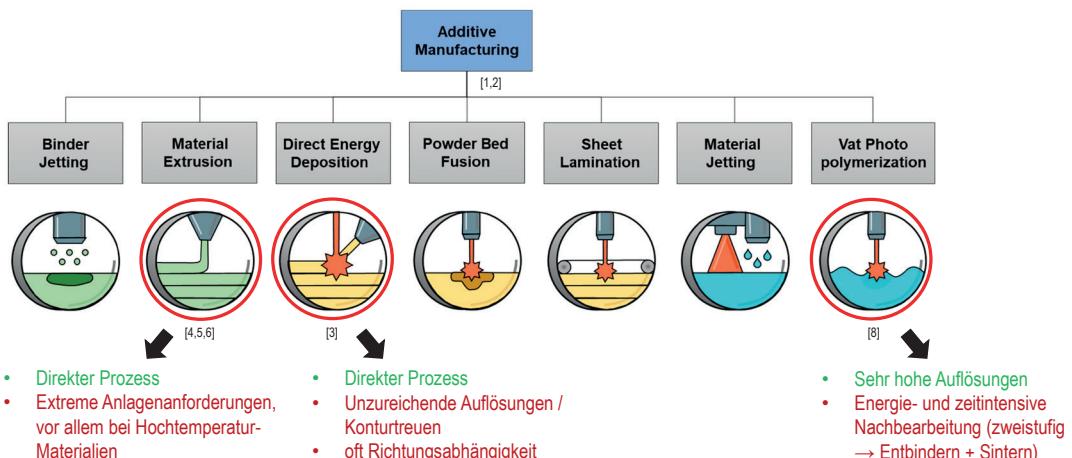
- verfügbare Ausgangsmaterialien ...
  - (1) sind oft sehr teuer (z. B. SLA-Polymer > 150 €/kg)
  - (2) sind oft nicht nachhaltig bzw. wiederverwertbar
  - (3) weisen Defizite bzgl. der Beständigkeit (thermisch/chemisch/UV) auf

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

# 1. Einführung

## Additive Fertigung

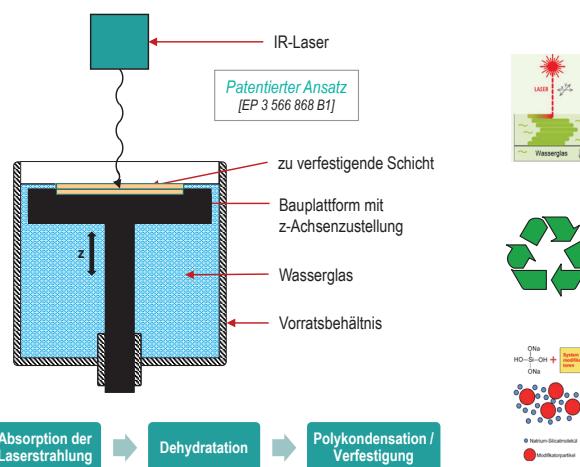
- für jede Verfahrensgruppe existieren Ansätze auf Basis von Glaswerkstoffen
- oft mit erheblichen Nachteilen verbunden (Auflösung, Nachbearbeitung, etc.)



# Lösungsansatz

## Additive Fertigung auf Basis von Wasserglas:

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



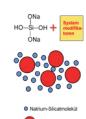
### direkter badbasierter 3D-Druck + Werkstoff Wasserglas

- 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.)

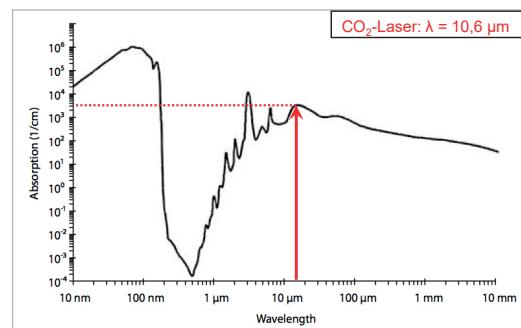
## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

#### Materialien

- zwei Natrium-Wassergläser unter Verwendung von CO<sub>2</sub>-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 <sup>3</sup>	1,44 g/cm <sup>3</sup>
pH-Wert	11 - 12	11 - 12



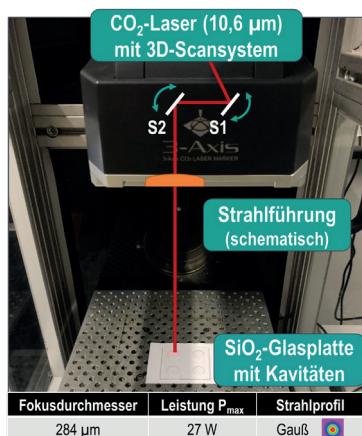
#### Ansatz „Dehydrierung“

- 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
Fokusdurchmesser	300 µm (280 µm)
Einfache Rayleighthänge	5,452 mm
Scangeschwindigkeit	$v_{max} = 6 \text{ m/s}$

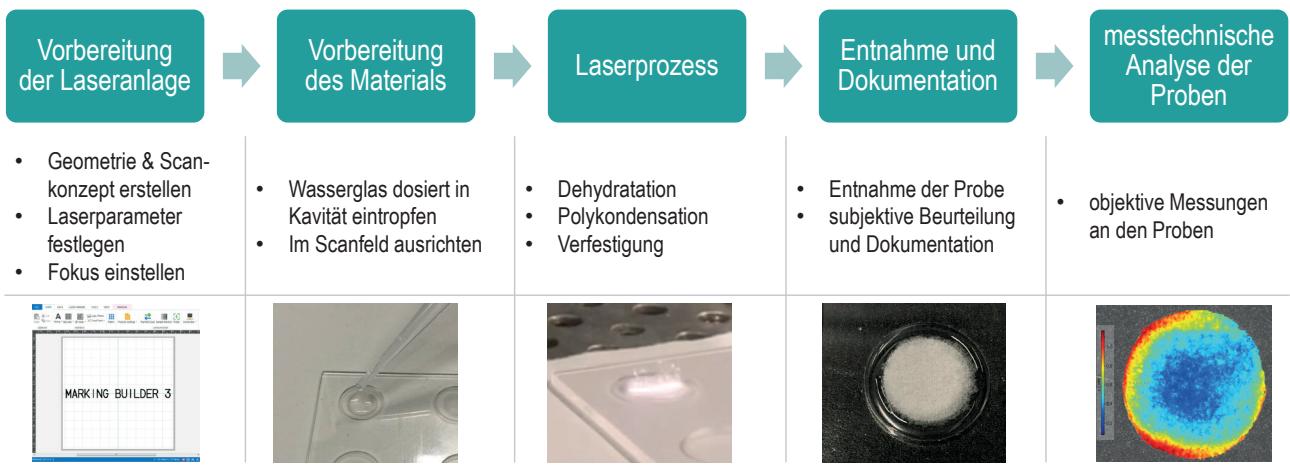


SiO<sub>2</sub>-Grundplatte mit Kavitäten

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

#### Verfahrensprinzip - Einzelschichten



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

Below the table are three corresponding images of printed samples: a meander pattern, a cross pattern, and a spiral pattern.

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

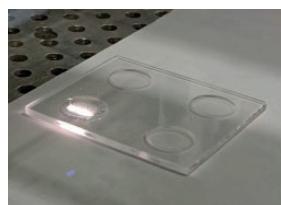
#### Prozessgrenzen - Einzelschichten

- Einfache Kreiskontur ( $d = 10 \text{ mm}$ )



$P = 27 \text{ W} (100\%)$   
 $LA = 100 \mu\text{m}$   
 $n = 6$  (3 scans per direction)

$v_s$  variabel  
(1700 - 4100 mm/s)



(1) Entnahme verfestigte Schicht

(2) Messung Schichtdicke

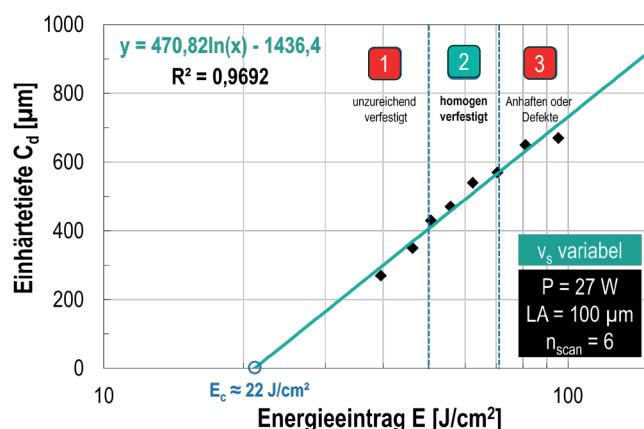
→ Aushärtetiefe in Abhängigkeit der eingestrahlten Flächenenergie  
("Arbeitskurve") zur Ableitung möglicher Auflösungen (Schichtdicken)

## 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 eingestrahlten Flächenenergie für Natronwasserglas 40/42

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

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

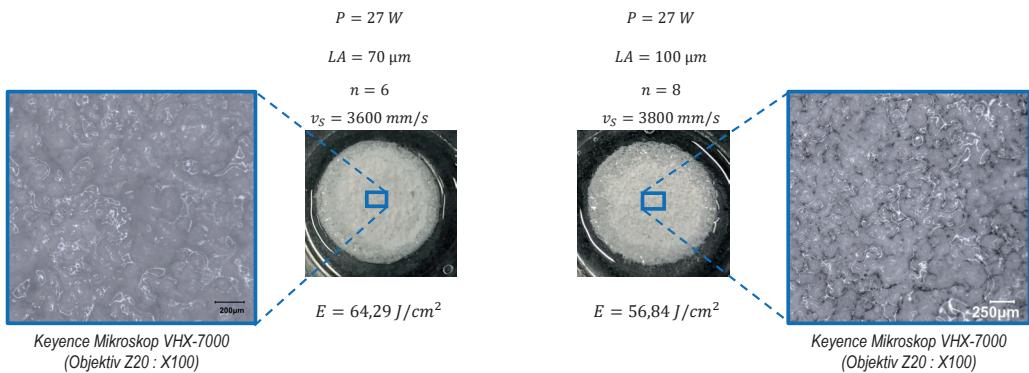
Berechnung von Flächenenergie (1) und Einhärtetiefe (2) nach [Geb16]



## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

#### Analyse des Linienabstands

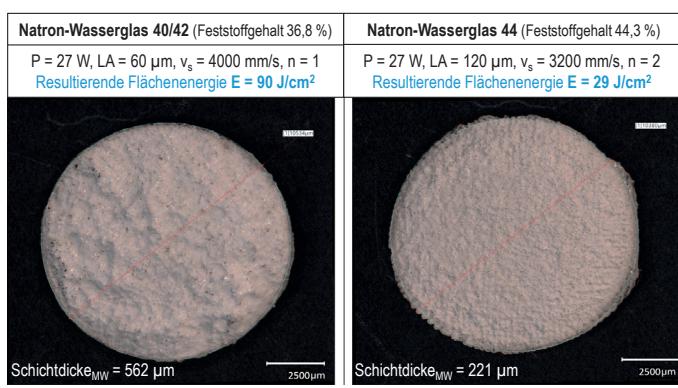


→ Einfluss des Linienabstandes auf den Grad der Verfestigung

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.1 Auszug bisheriger Untersuchungen

#### Einfluss des Feststoffgehalts auf die erforderliche Flächenenergie



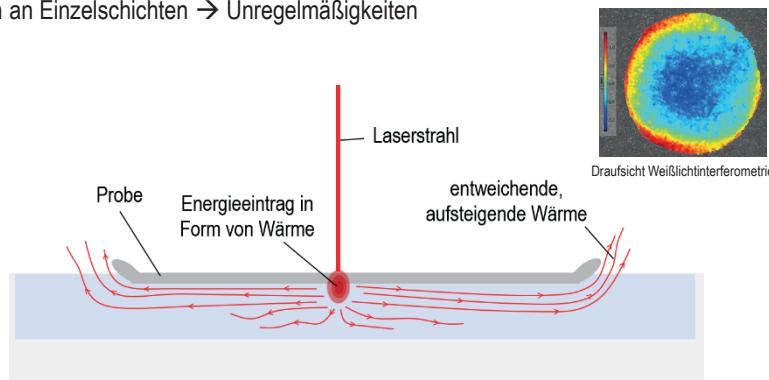
- höherer Feststoffgehalt → weniger Energie erforderlich
- geringerer Energieeintrag → Bessere Ebenheit und geringere Schichtdicken

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.2 Derzeitige Problemstellungen

➤ resultierend aus dem derzeitigen Versuchsaufbau

- Randerhöhungen an Einzelschichten → Unregelmäßigkeiten



Randerhöhungen an laserbasiert verfestigten Schichten infolge des akkumulierten Energieeintrags in der verhältnismäßig kleinen Kavität, der seitlichen Wärmeableitung und des sich ausbildenden Flüssigkeitsmeriskus

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.2 Derzeitige Problemstellungen

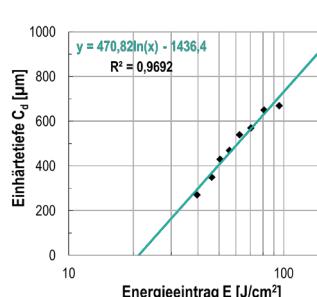
➤ resultierend aus dem derzeitigen Versuchsaufbau

- 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 eingestrahlten Flächenenergie für NaWg 40/42

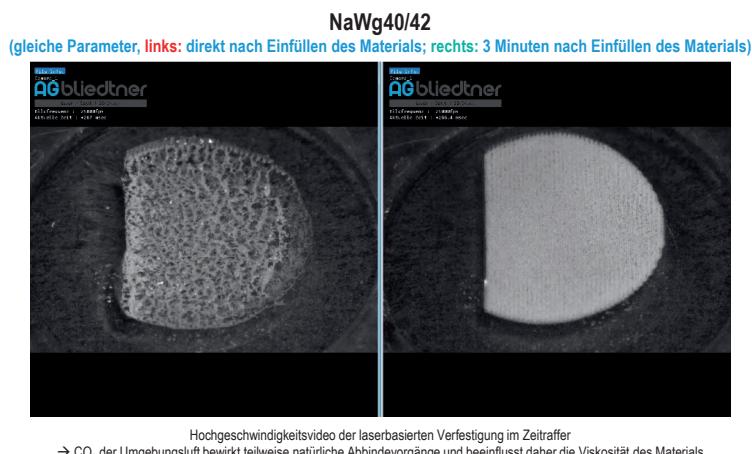
- Langwellige Strahlung  
→ Fokusdurchmesser ↑
- Händisches Vorgehen  
(≠ Achssystem in z-Richtung)
- Materialapplikation nicht ausreichend reproduzierbar

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.2 Derzeitige Problemstellungen

➤ resultierend aus dem derzeitigen Versuchsaufbau

- Einfluss des CO<sub>2</sub> der Umgebungsluft auf das Material

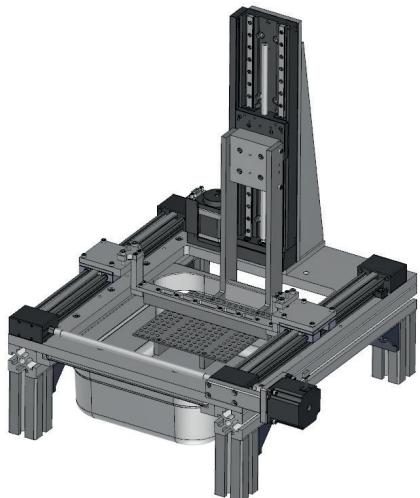


Hochgeschwindigkeitsvideo der laserbasierten Verfestigung im Zeitraffer  
→ CO<sub>2</sub> der Umgebungsluft bewirkt teilweise natürliche Abbindevorgänge und beeinflusst daher die Viskosität des Materials

## 2. Additive Fertigung - Wasserglas

### 2.2 Lösungsansätze

#### ① Teilautomatisierte Anlagentechnik



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

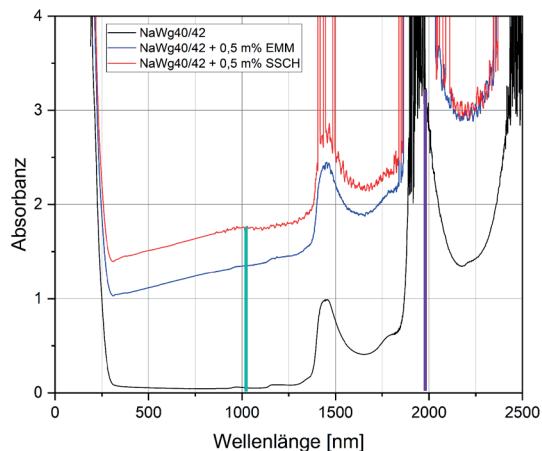
- großes, alkalisch beständiges Materialbehältnis  
→ bessere Wärmeableitung & Schichtebeheit
- hochgenaue automatisierte z-Achse mit Bauplattform  
→ reproduzierbare und hochaufgelöste Schichten
- mittels Zahnrämenantrieb verfahrbarer Recoater  
→ Homogenisierung der Bodenoberfläche / Schichten
- Integration von Sensorik (Luftfeuchtigkeit, Temperatur, CO<sub>2</sub>)
- Optikdesign (dynamische Fokus-Anpassung; Strahlprofile)
- ggf. 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 \(Fe,Mn\)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>](#)

## 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 (SiO<sub>2</sub>, 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 Behältnis 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 ( $\text{CO}_2$ , 10,6  $\mu\text{m}$ ) → Optikdesign (Fokusanzapfung, 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 Anwendungsbereiche

- 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 Fertigungsprozesse 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](http://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] Pavlovsky, 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 Härtungsprozesses*. 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](http://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](mailto:robin.hassel-schmidt@eah-jena.de)

**Forschungsgruppe „AddGlas“**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU



Ministerium  
für Bildung,  
Wissenschaft und Kultur



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](http://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].

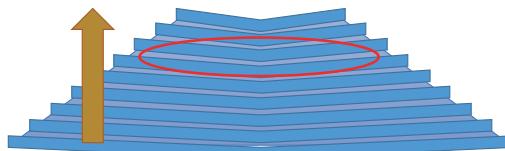


Abb. 1: Abfallhierarchie nach Art. 4 RL 2008/98/EG [EUR08].

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.

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

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-Feinblech 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.

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

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 - Materialextrusion
- 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, Aufbaurate und Schweißeignung 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 - I1
- Schutzgasmenge  $\dot{V} = 18 \text{ L/min}$
- Formiergas DIN EN ISO 14175 – N1
- Impulsschweißen
- Schweißstrom I1 = 200 A; I2 = 150 A
- Puls-Frequenz f = 10 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 ausprägt. Hybride Schweißverbindungen mit DED-LB(p), d.h., mit pulverböigem 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 Wärmeeinflusszone sichtbar. Auf der additiven Seite ist die Wärmeeinflusszone 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.

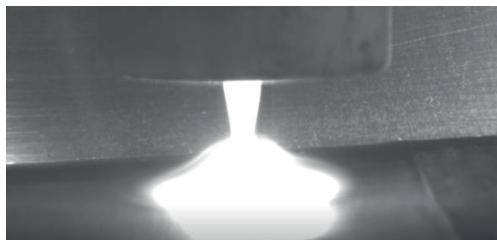


Abb. 5: Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim WIG-Schweißen von hybrid hergestelltem Grundwerkstoff aus AISI 316L.

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 hybriderem AISI 316L.

## Metallografische Analyse

Eine Analyse der DED-LB(p)-Proben hat ergeben, dass ein deutlich höherer  $\delta$ -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.

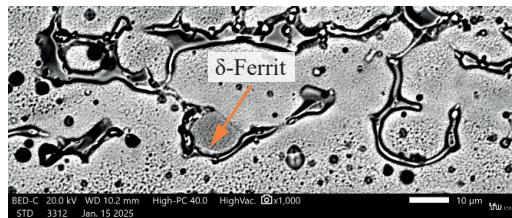


Abb. 7:  $\delta$ -Ferrit im additiv gefertigten Grundwerkstoff, AISI 316L.

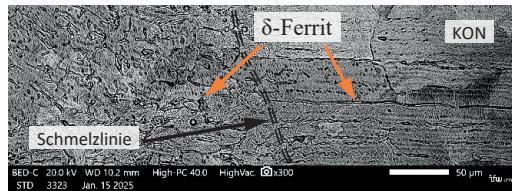


Abb. 8:  $\delta$ -Ferrit-Ausprägung und Schmelzlinienverlauf, AISI 316L.

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. Gaultsch [GAU57] leitete aus diesen Erkenntnissen ab, dass oberflächenspannungsreduzierende Stoffe (aktiv) 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 Spurelementen 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 Schweißeindringtiefe. Bestätigt wird dies durch Untersuchungen von Wei et al. [WPM15]. Ein höherer Schwefelgehalt im ppm-Bereich zeigt hier eine positive Wirkung. Eine niedrigere Schweißeindringtiefe 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)
<b>max</b>	<b>2.00</b>	<b>1.00</b>	<b>0</b>	<b>k. A.</b>	<b>k.A.</b>	<b>300</b>
<b>min</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>2000</b>	<b>k. A.</b>	<b>k.A.</b>	<b>0</b>
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 Schweißeindringtiefe 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 Lichtbogenableitung

Durch den Einsatz eines Dauermagneten (30 kg Haftkraft, bei einer wirksamen Kontaktfläche von 1000 mm<sup>2</sup>) 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.

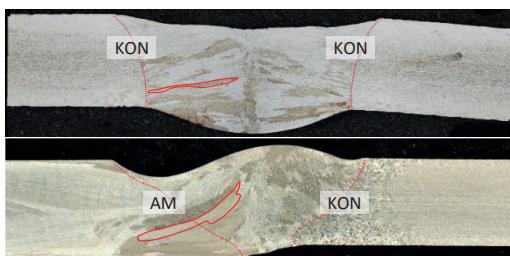


Abb. 10: Kornwachstumsverhalten beim WIG-Schweißen konventioneller (KON/KON, siehe Abb. 10 oben) und hybrider Grundwerkstoffe (DED-LB(p)/KON, siehe Abb. 10 unten) aus AISI 316L.

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 ausfindig 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).

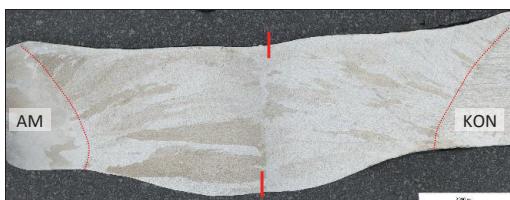


Abb. 11: Symmetrische Fügezone beim durch Dauermagnete beeinflussten WIG-Schweißen eines hybriden Grundwerkstoffes (DED-LB(p) / KON), AISI 316L.

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).

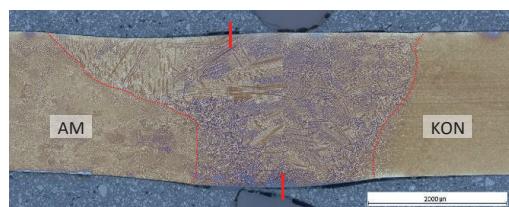


Abb. 12: Wurzelversatz beim WIG-Schweißen einer hybriden Nickelbasislegierung: links DED-LB(w),  
rechts konventioneller Grundwerkstoff, Inconel 718.

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, MK98], 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 marktentablierten 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 Lichtbogenableitung 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.:**

Maragoni 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] – SCHLEMME, 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 bulle-  
tin, 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 Maragoni 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.

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

Florian Heinrich, M.Sc.



**Laserinstitut**  
Hochschule Mittweida

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



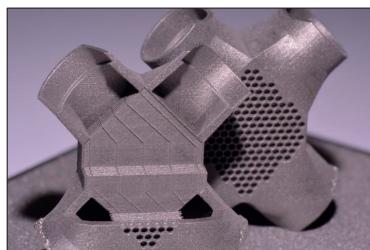
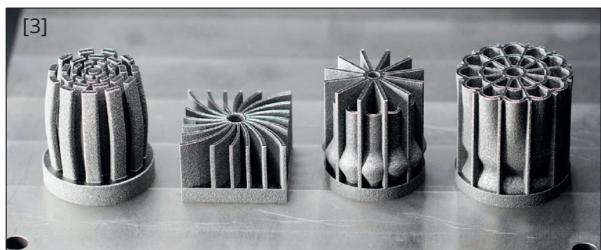
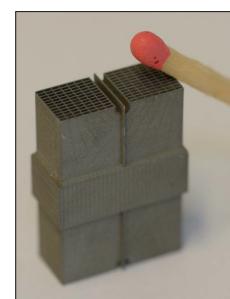
Kofinanziert von der  
Europäischen Union



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

# Motivation und Zielsetzung

## Motivation und Zielsetzung

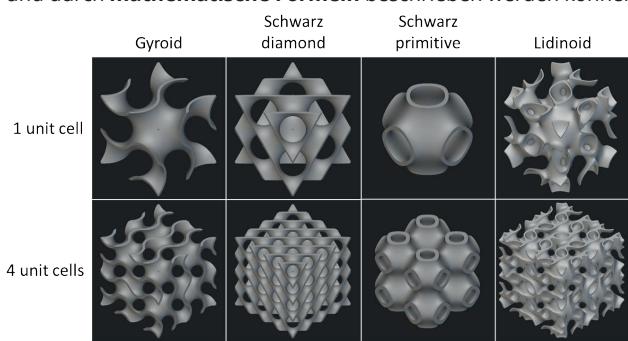


4 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718  
Florian Heinrich, M.Sc.  
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

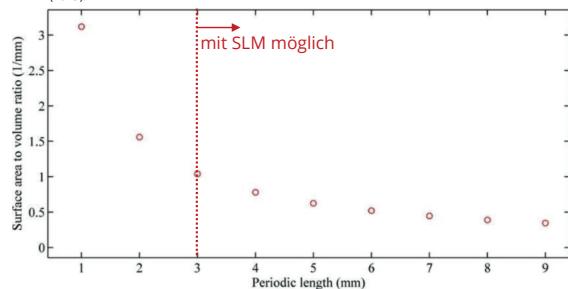
# Überblick zu TPMS-Strukturen

## 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).



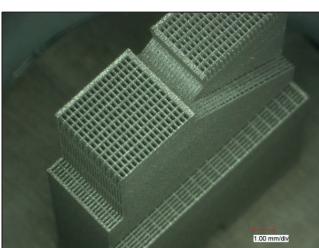
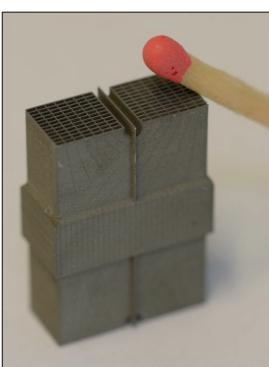
### Vorteile:

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

- A/V-Verhältnis maßgeblich von Zellengr e  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

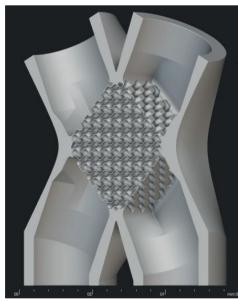
### Stand 2023:

- 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

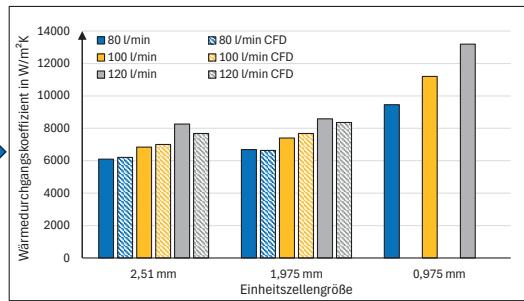
# Stand der Forschung



Design / Konstruktion



Fertigung



Ergebnisse:

- sehr hohe Wärmedurchgangskoeffizienten von über 12 kW/m<sup>2</sup>K im Vergleich zu konventionellen Wärmeübertragern
- kleinere Einheitszellen ermöglichen deutliche Steigerung des Wärmedurchgangskoeffizientens
- CFD-Simulationen stützen die Messergebnisse

! bisher kein ausreichend dichter Prototyp !

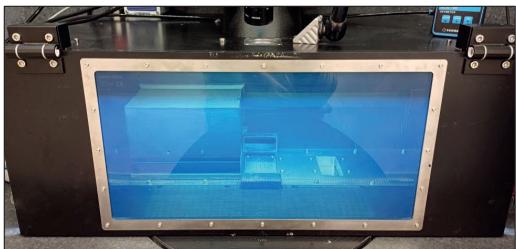
9

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

(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

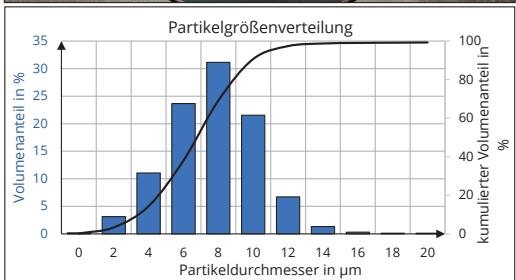
## Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen

# Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen



## Anlagenspezifikationen:

- 400 W IPG Photonics Faserlaser mit einem Fokusdurchmesser von 23 µm
- abgeschlossene Baukammer für SLM-Prozess unter Inertgasatmosphäre (Argon, Sauerstoffgehalt < 1000 ppm)
- selbst entwickelter Beschichter zur Erzeugung dünner Pulverschichten (Schichtdicke ≤ 10 µm)



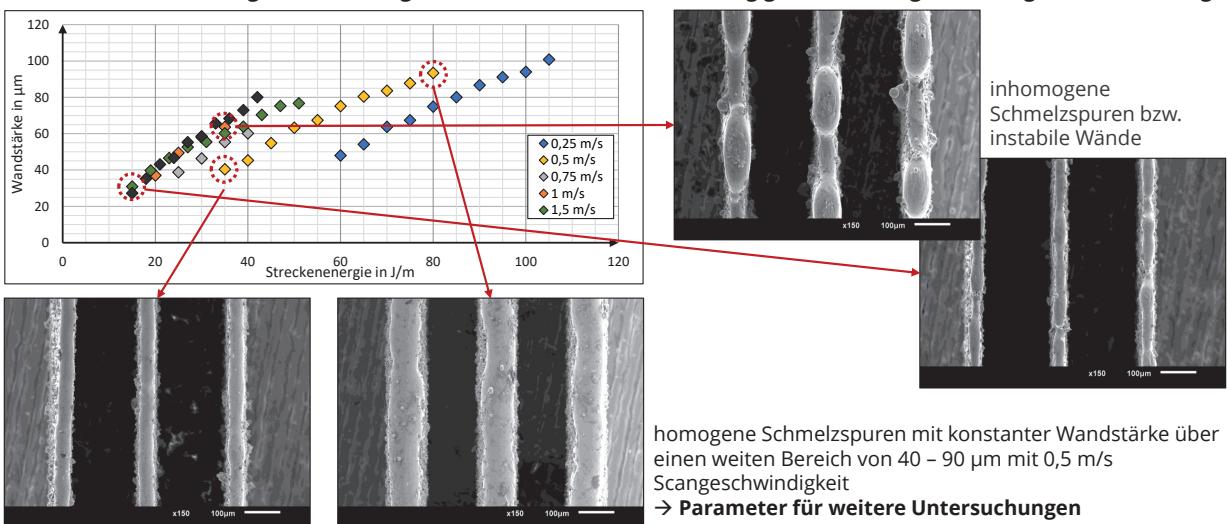
## Material:

- 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

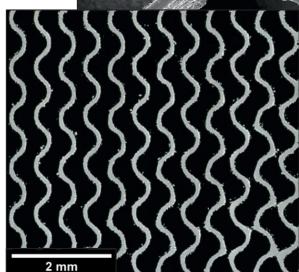
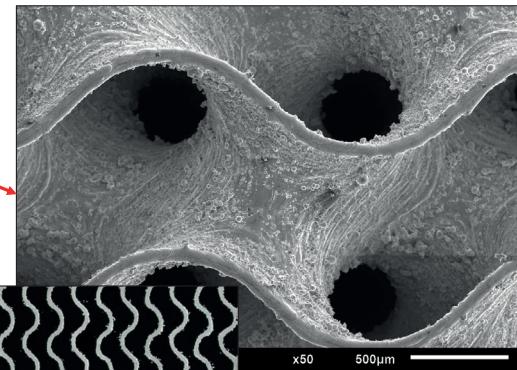
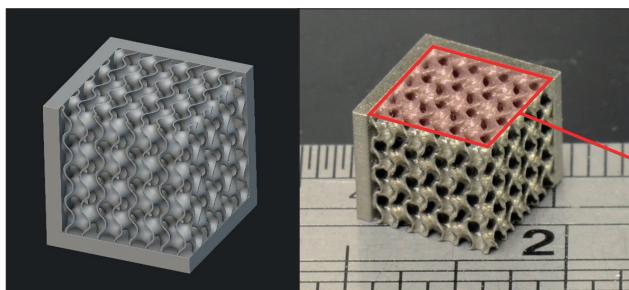
# Fertigung dünnwandiger TPMS-Strukturen

Parameteruntersuchung zur Ermittlung der Einzelwandstärken in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit und Leistung



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:

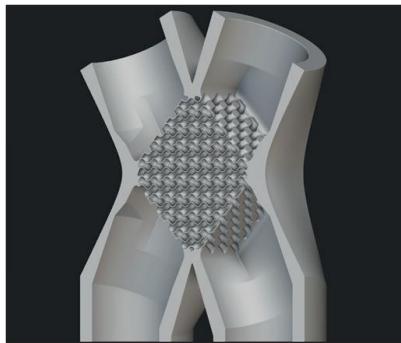
- Gyroid- und Schwarz-Diamant-Strukturen können problemlos mit Wandstärken von 100 µm und Einheitszellengrößen von 1 – 3 mm gefertigt werden
- REM-Aufnahmen und Querschliffe zeigen geschlossene und porenfreie Wände

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

# Wärmetauscher- Design und Tests

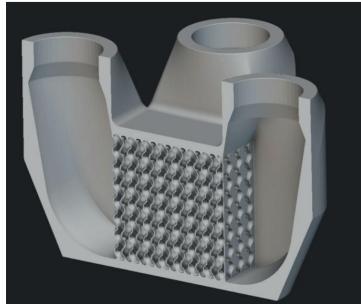
# Wärmetauscher-Design und Tests

## Anpassung des Designs



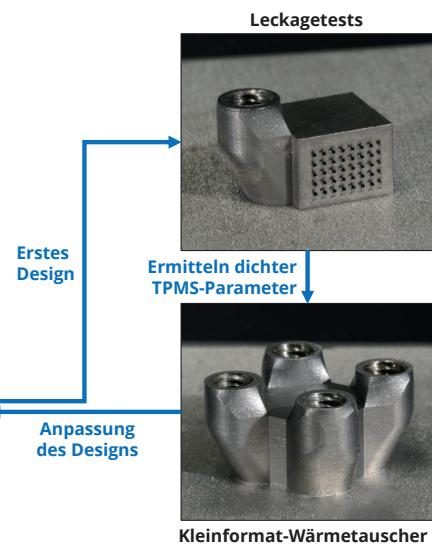
### Bisheriges Design:

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



### Neues Design:

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



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

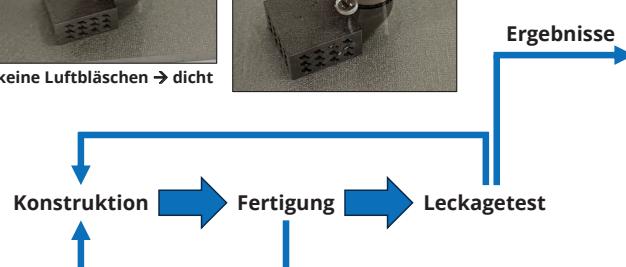
## Fertigung leckagefreier TPMS-Strukturen

### Vorgehensweise:

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



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



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

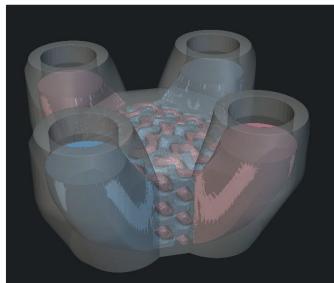
16 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718  
Florian Heinrich, M.Sc.  
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

# 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

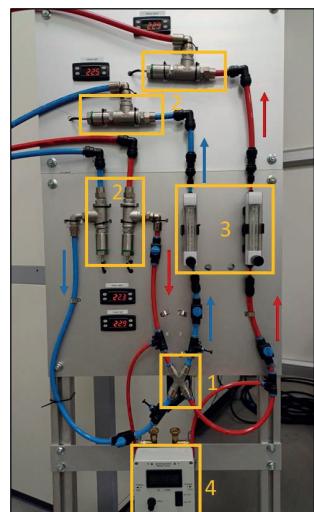
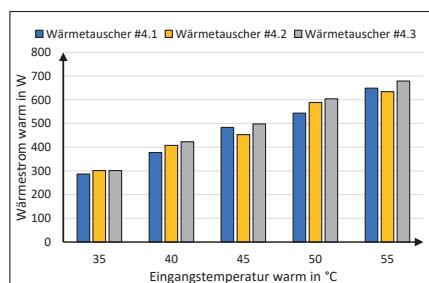
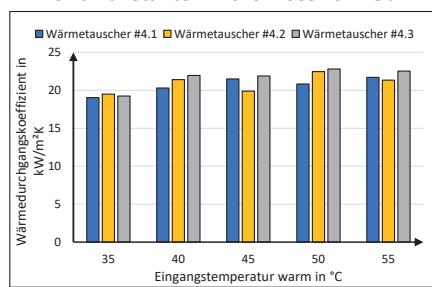
17 Entwicklung additiv gefertigter Mikro-Wärmetauscher mit TPMS-Geometrien aus Inconel 718  
Florian Heinrich, M.Sc.  
(C) 30.09.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida

# 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/m<sup>2</sup>K 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

# 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 mm<sup>3</sup> 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

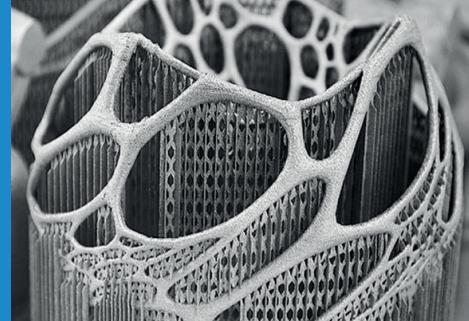


Kofinanziert von der  
Europäischen Union



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

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



## Forschungsprojekt AmorFeTa

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

Maximilian Streinz M.Sc.

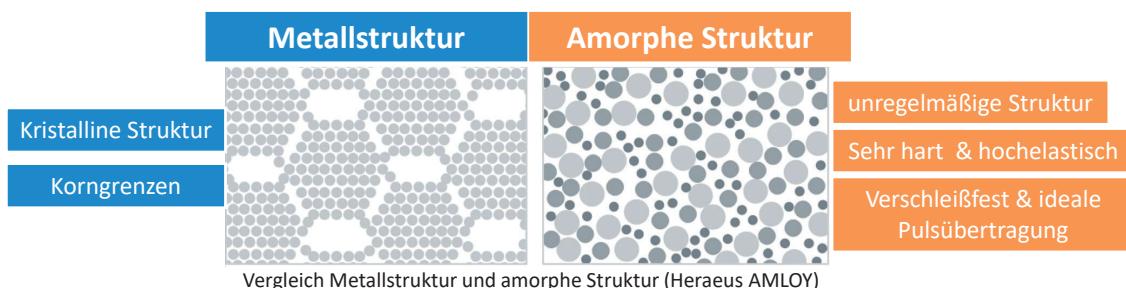
15.10.2025

## 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:

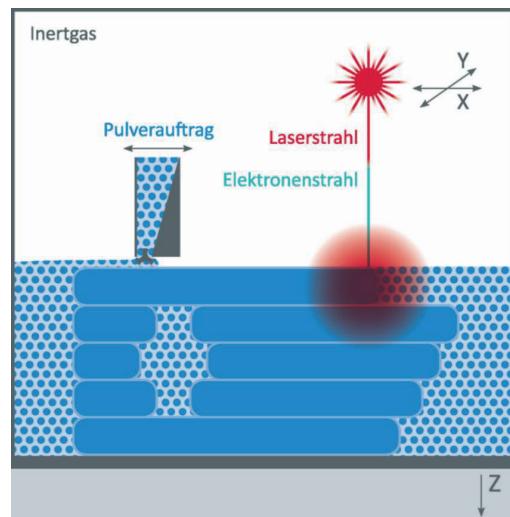
- Sehr hohe erreichbare mechanische Festigkeiten
- Ungewöhnliche Kombination aus hoher mechanischer Festigkeit und niedrigem E-Modul erreichbar
- Hohe Härte und geringer Abrieb
- Hohe erreichbare Oberflächenqualitäten
- Gute Biokompatibilität
- Hohe magnetische Permeabilität



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)

ifw Jena

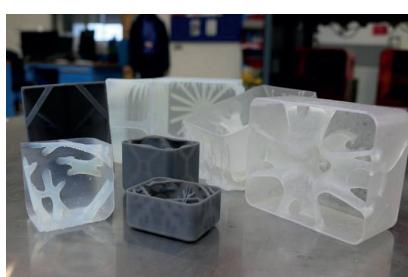
5

## Motivation: Anwendungen Raumfahrt

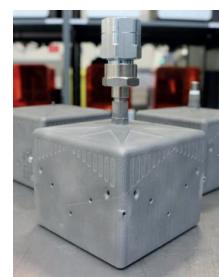
### Stand der Technik:

- 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)



Prototyp Tank aus Ti64 (AMRC Sheffield)

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

ifw Jena

6

# Motivation: Anwendungen Luftfahrt

**Wasserstoffbrennstoffzellen betriebene Drohnen weisen verschiedene Vorteile gegenüber konventionellen Drohnen auf:**

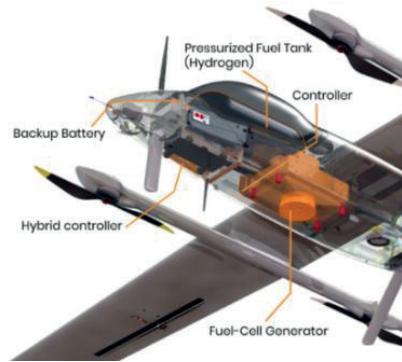
- Höhere Reichweiten im Vergleich zu akkubetriebenen Drohnen, Luftbetankung in Entwicklung [1]
- Leiser, kein CO<sub>2</sub>-Ausstoss im Betrieb und reduzierte Wartungsintervalle im Vergleich zu mit konventionellem Motor betriebenen Drohnen

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)



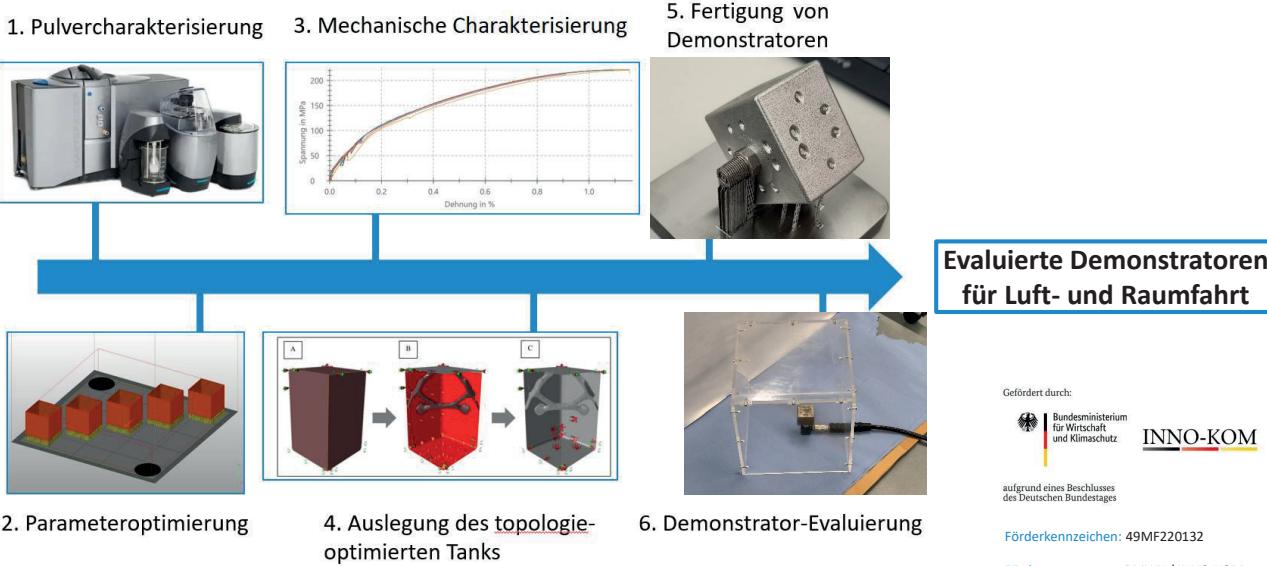
CubeSat-Tanks aus Ti64 (AMRC Sheffield)



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 gesteigerten Funktionalität mit sich bringen.“



ifw Jena

9

## Vorgehen

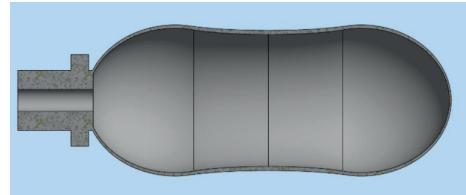
- Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Prozesskette vom Zustand des Ausgangspulvers bis hin zu den Endeigenschaften verarbeiteter/nachbearbeiteter Proben bzw. Demonstratoren betrachtet
- Sowohl für massive Strukturen, als auch für dünnwandige Strukturen erfolgten Parameterstudien um jeweils optimale 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

ifw Jena

10

# Ergebnisse: Zylindrische Drucktanks

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



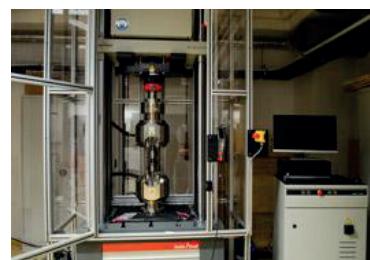
Schnittansicht eines ersten Entwurfs mit variabler Wandstärke



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 Zugprüfmaschine

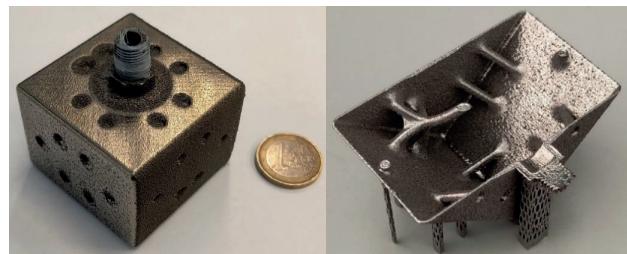
**Es waren weder der Einsatz von Neupulver, noch mechanische Nachbearbeitung zur Erreichung hoher Festigkeiten erforderlich**

## 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 dünneren 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 µm)
- 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 Druhnentank-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:**

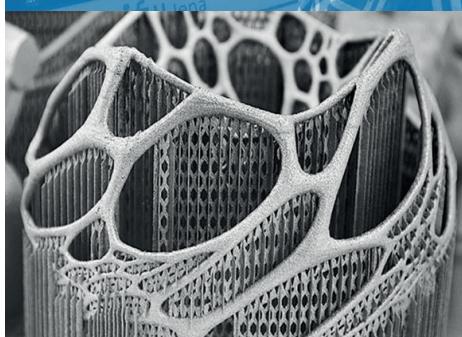
[https://www.linkedin.com/posts/ifw-jena\\_additivemanufacturing-bmg-leichtbau-activity-7322569166333374464-nPsE?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop&rcm=ACoAACd0ULsBro-ON8Bfv4RUHgw0ffkYLOzyBbE](https://www.linkedin.com/posts/ifw-jena_additivemanufacturing-bmg-leichtbau-activity-7322569166333374464-nPsE?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAACd0ULsBro-ON8Bfv4RUHgw0ffkYLOzyBbE)



19



Günter-Köhler-Institut  
für Fügetechnik und  
Werkstoffprüfung



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

## 3D-Laserdruckverfahren zur Herstellung von porösen wasserabführenden Verlaufsstrukturen

Matthias Horn  
Jörg Schille  
Lucas Naumann  
Udo Löschner



[www.laser.hs-mittweida.de](http://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

### Ökologische Auswirkungen

- begrenzte Ressourcen
- aufwendige Entsorgung

### Technische Nachteile

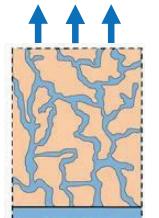
- Stark abrasiv
- Kurze Standzeiten
- Saisonabhängig
- Sättigung nach → Qualitätsschwankungen

# Projektziel

- Imitieren des Gipeses 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

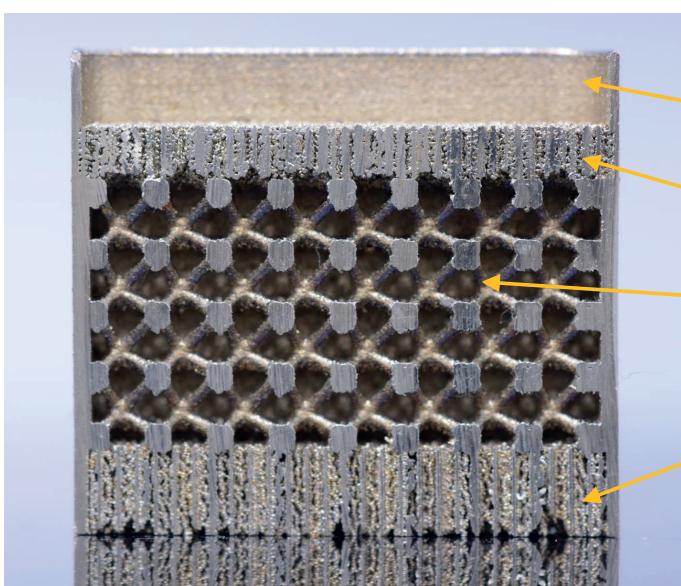


Laserinstitut  
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE  
MITTWEIDA

## Querschliff poröser Aufbau 3D-Druck



4

Matthias Horn, Lucas Naumann  
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



Europa fördert Sachsen,  
EFRE  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



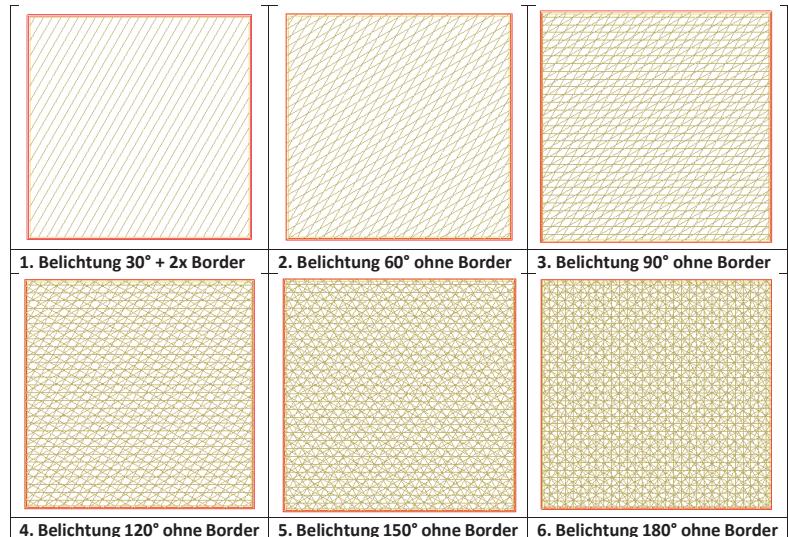
Laserinstitut  
Hochschule Mittweida



HOCHSCHULE  
MITTWEIDA

# Angepasste Prozessparameter:

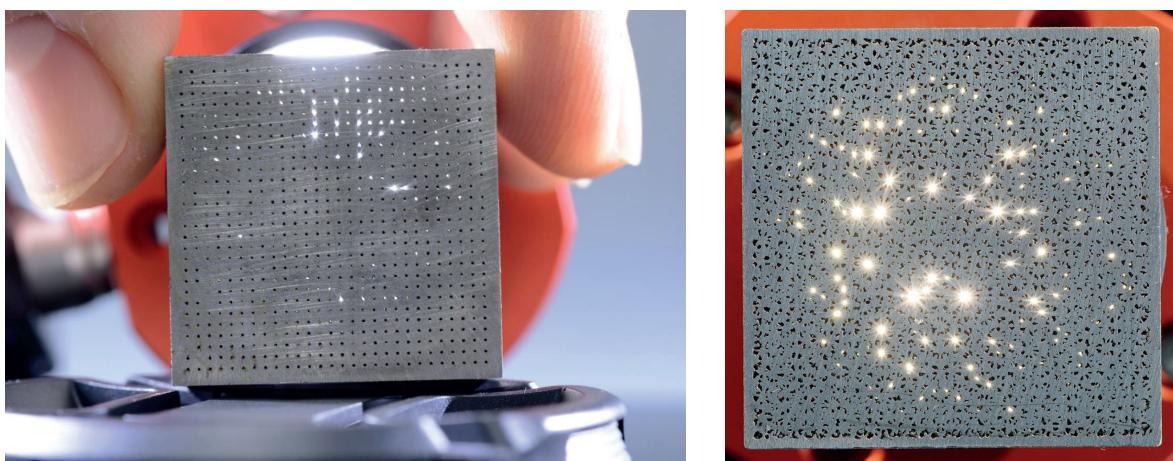
- Mehrfach Bestrahlung mittels Laser pro Schicht
- Variation des Fülllinienabstandes
- Drehung der Füllgeometrie
  - 30° - Drehung
  - 90° - Gitter
- Kreuzungspunkte überhöhen sich durch mehrfache Bestrahlung
- Negativer Einfluss auf Pulverauftrag



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



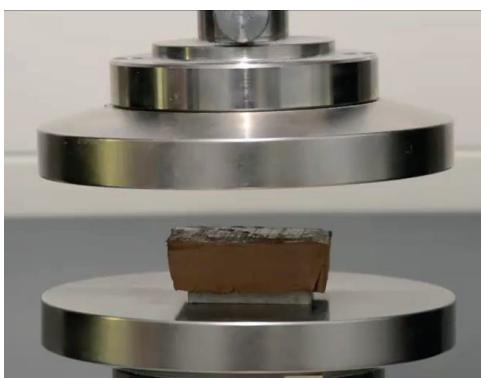
Europa fördert Sachsen,  
EFRE  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



Laserinstitut  
Hochschule Mittweida



## Druckverfahren



8

Matthias Horn, Lucas Naumann  
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



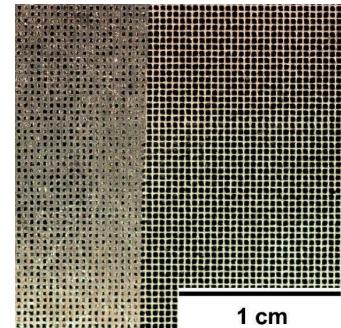
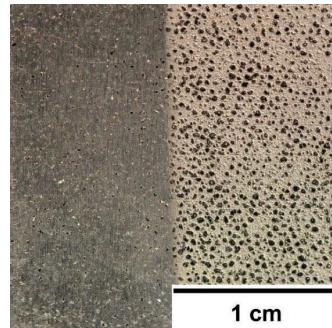
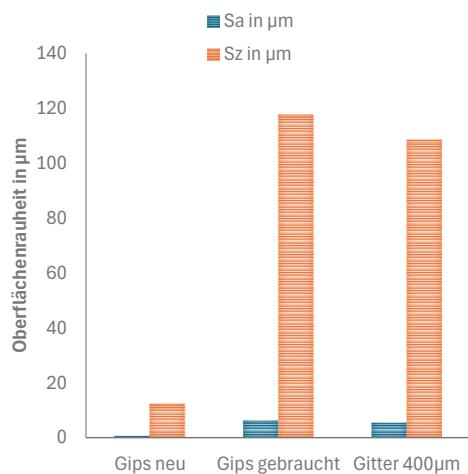
Europa fördert Sachsen,  
EFRE  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



Laserinstitut  
Hochschule Mittweida



# Oberflächengüte



- Geschliffene (links) und Sandgestrahlte Oberfläche (rechts)

9

Matthias Horn, Lucas Naumann  
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



# Gussverfahren

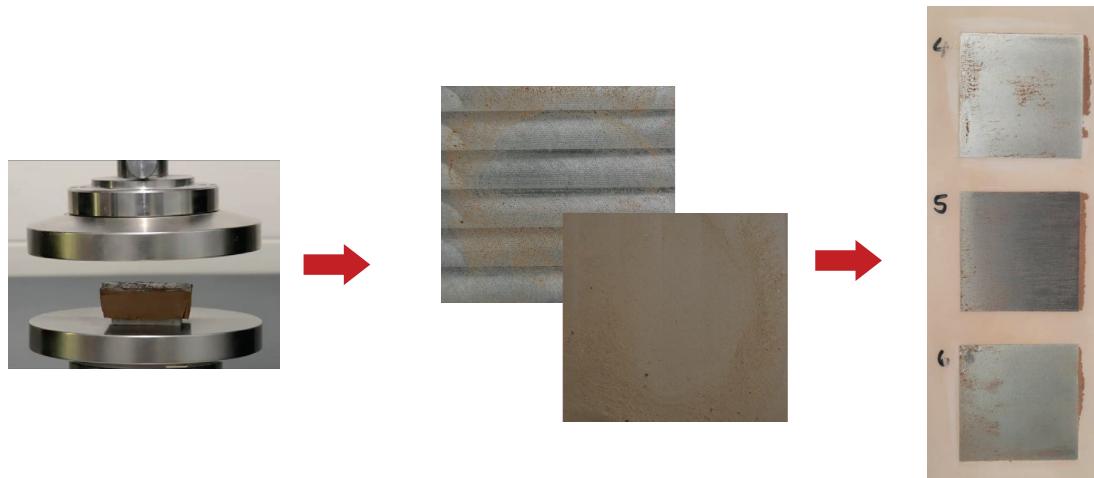


10

Matthias Horn, Lucas Naumann  
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



# Druckverfahren



11 Matthias Horn, Lucas Naumann  
20.10.2025 Laserinstitut Hochschule Mittweida



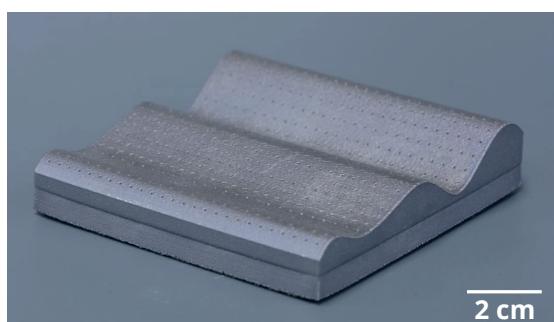
## 3D-Druck als Formgebungswerkzeug:

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



**HOCHSCHULE  
MITTWEIDA**  
University of Applied Sciences

**Matthias Horn**

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

**Lucas Naumann**

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

**Laserinstitut Hochschule Mittweida**

Technikumplatz 17 | 09648 Mittweida  
[www.laser.hs-mittweida.de](http://www.laser.hs-mittweida.de)

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

# **Prozessüberwachung und Qualitätssicherung**

# Überwachung des 3D-Druckprozesses (FFF) mittels Ultraschall

Zawatzki, Johannes

15.10.2025

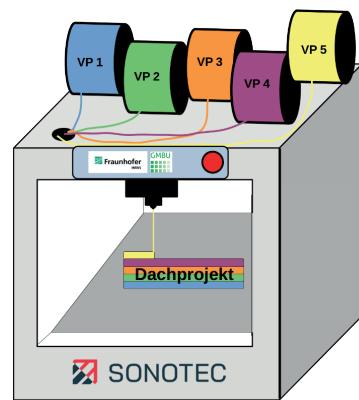
## Bündnispartner – Partner im AddiQ-Konsortium

- 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)

<https://www.prusa3d.com/content/images/product/original/86e363eb-5877-4a28-b15b-ed1fb280bfae.jpg>

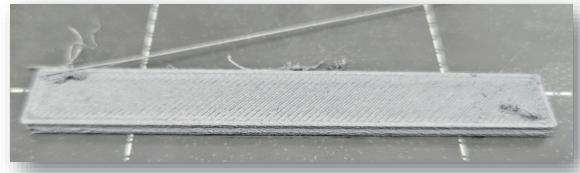
15.10.2025

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



15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

7

**Fehlerbild: Verstopfte Düse**

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



15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

8

### Fehlerbild: Layercracking

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



15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

9

### Fehlerbild: Warping

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



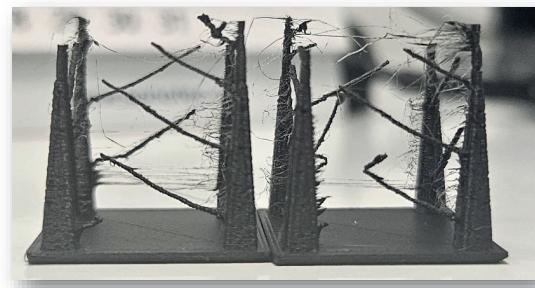
15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

10

### Fehlerbild: Stringing

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



15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

11

### 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

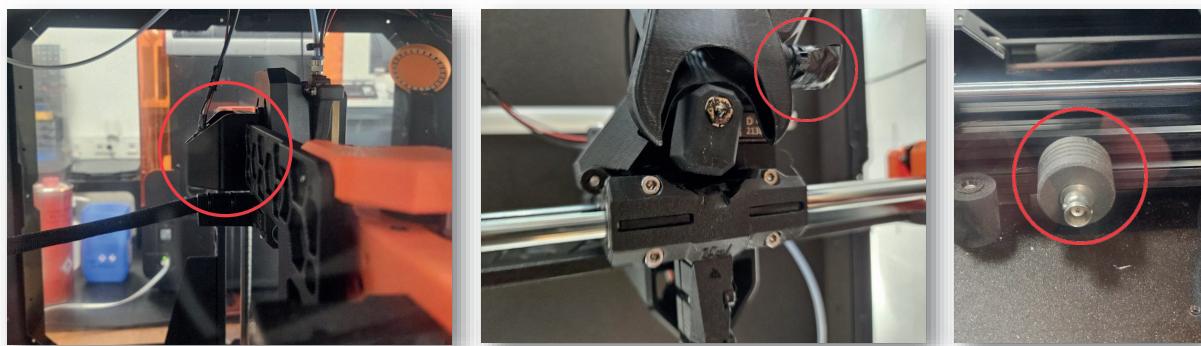


15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

12

## Ultraschallsensorik: Integration



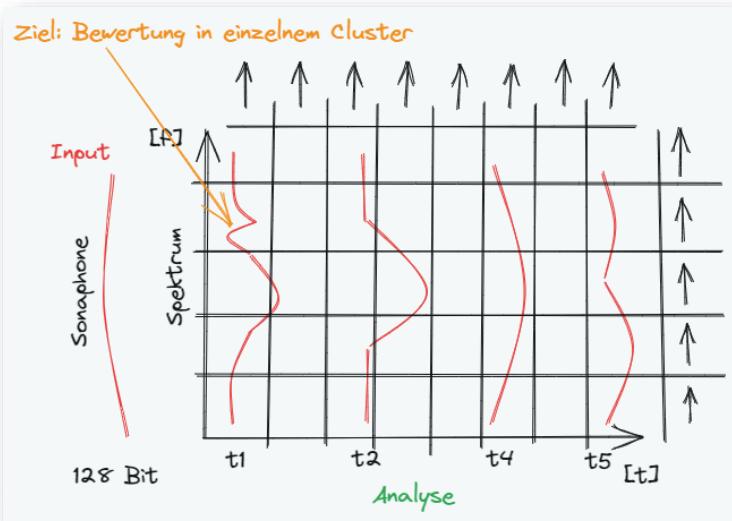
15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

13

## Datenauswertung

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



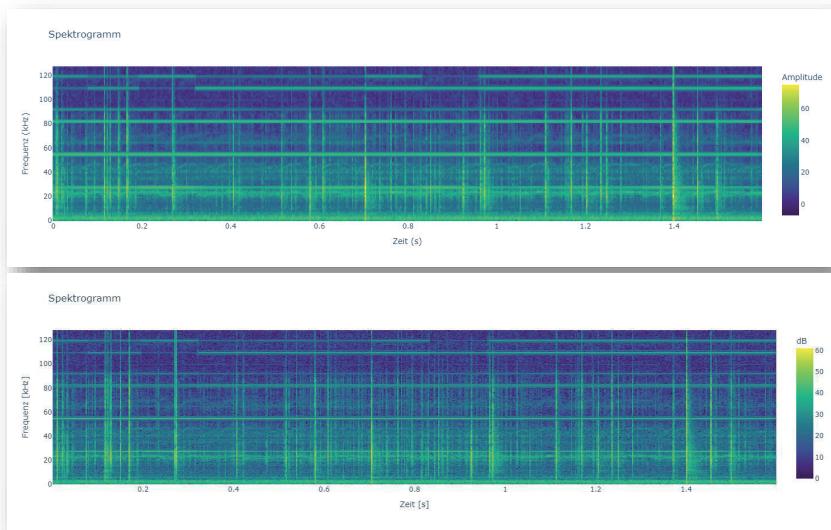
15.10.2025

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



15.10.2025

12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck - Mittweida

15

## Vergleich Luftultraschall

- Messung:
- Feuchtes Filament
- ASA



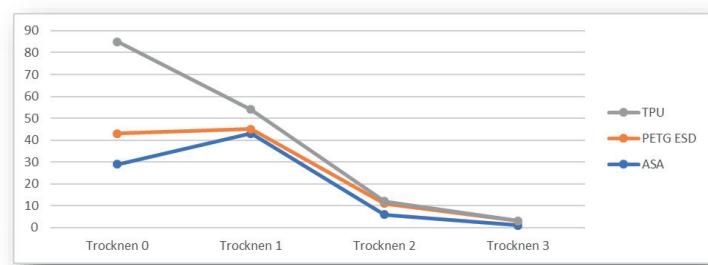
15.10.2025

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

				Biochemie
			additive Fertigung	
	<b>Intrinsische Markierung additiv gefertigter Bauteile zur Verifizierung und Identifizierung von Originalbauteilen</b>			
	<b>Stephan Eckstein<sup>1</sup>, Andreas Krombholz<sup>1</sup>, Oliver Neudert<sup>1</sup>, Johannes Zawatzki<sup>2</sup></b>			
	<sup>1</sup> GMBU e.V. <sup>2</sup> SONOTEC GmbH			
	<b>15.10.2025</b>			
	<b>12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung</b>			
			Physik	
			Molekularbiologie	



ZUSE-GEMEINSCHAFT  
FORSCHUNG, DIE ANKOMMT.



WEINBERG CAMPUS  
TECHNOLOGIEPARK



VIU  
Verband Innovativer  
Unternehmen e.V.



DEHEMA  
Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.



30 JAHRE  
Fachverband  
BIOGAS

## Förderhinweis

# Projekttitel 3DMarker für die Markierung von Kunststoffbauteilen

Förderkennzeichen  
**49MF210207**

Laufzeit

**1. Mai 2022 bis 31. Dezember 2024**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

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

## Problemstellung

### 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

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15.10.2025

Oliver Neudert

3

## Projektansatz

nicht sichtbare  
**Codierung**  
**zusätzlicher**  
**Informationen** im  
3D-gedruckten  
Bauteil

Informationen zum  
Herstellungsprozess  
Absicherung gegen Fälschungen  
bauteilindividuelle Markierung  
Rückschlüsse auf Fertigungskette

Auslesen der  
Information  
mittels  
**CT-Scan**  
**Ultraschall**

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15.10.2025

Oliver Neudert

4

## Übersicht

### Fertigungsstrategien

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

### Ausleseverfahren

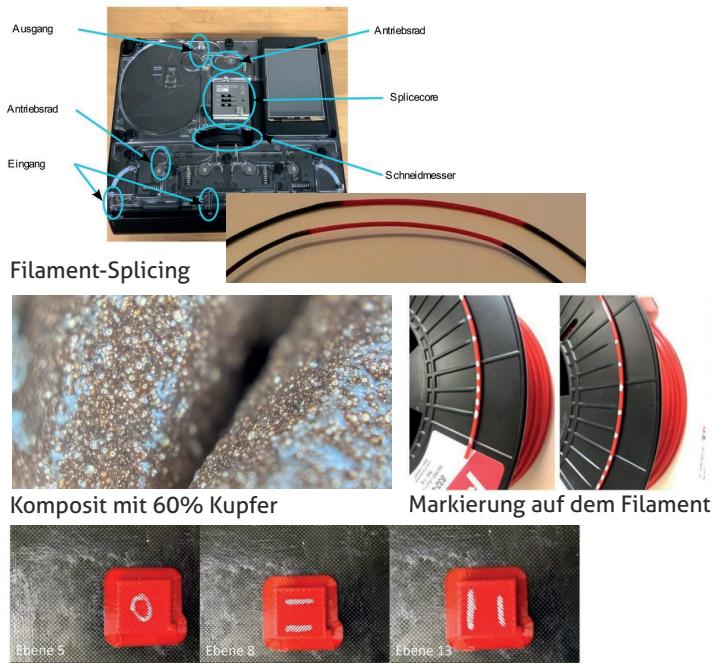
- Röntgen-CT
- Ultraschall (Puls/Echo)



Röntgen-CT<sup>(1)</sup>



Puls-Echo-Verfahren



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

Oliver Neudert

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

5

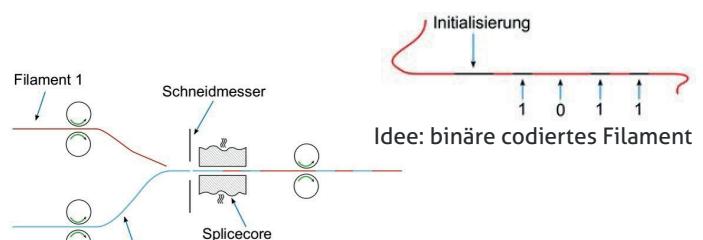
## Markierung mit Filament-Splicing

### Prinzip:

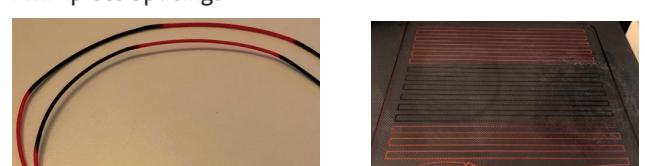
- Marker im Material (Komposit)  
z.B. Cu oder TiO<sub>2</sub>
- Codierung des Filaments (Splicing)

### Limitationen:

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



### Prinzip des Splicings



gesplichtetes Filament (Marker: 80mm)

Druckspur



gesplichtetes Filament (Marker: ~2mm)

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

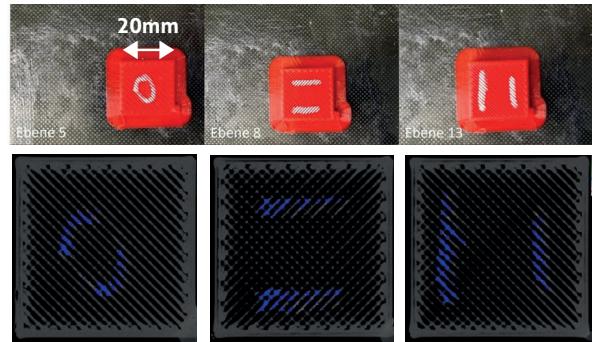
15.10.2025

Oliver Neudert

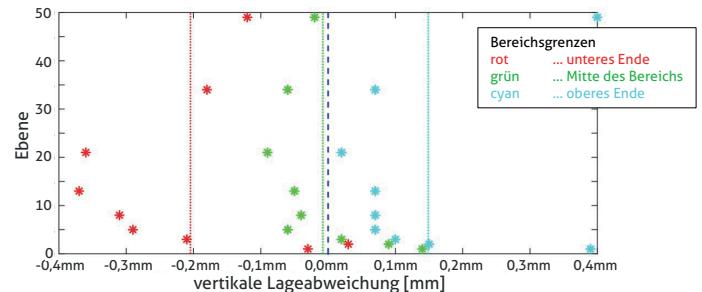
6

## Direkt markierte Bauteile

- Prinzip:**
  - Markierung im Druckprozess mit  $\text{TiO}_2$ -Suspension auf PLA
- Limitationen:**
  - Kapillarkräfte
  - Überdosierung
  - Ungenauigkeiten im Druck
  - vertikale Lageabweichung < 0,4mm
- max. Datendichte**  $\approx 25 \text{ bit/cm}$   
(senkrecht zur Druckschicht)



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



GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

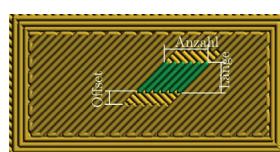
15.10.2025

Oliver Neudert

7

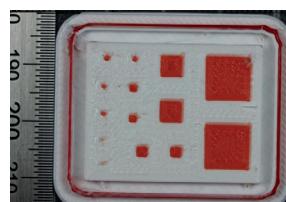
## Markierung mit Materialwechsel

- Prinzip:**
  - Druck der Bauteilschicht mit Lücken für Markermaterial
  - Einbringen des Markermaterials mit zweitem Druckkopf
- Limitationen:**
  - Düsengröße, 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 0,2mm)



optimierte Parameter:  
Offset\_Start = 1mm  
Offset\_Ende = 0,2mm  
min. Länge = 1mm

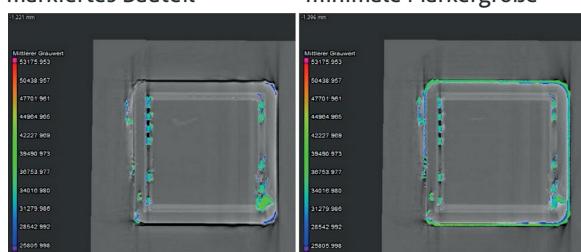
Optimierung des Druckverfahrens



markiertes Bauteil



minimale Markergröße



CT-Schnittbilder eines markierten Bauteils

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15.10.2025

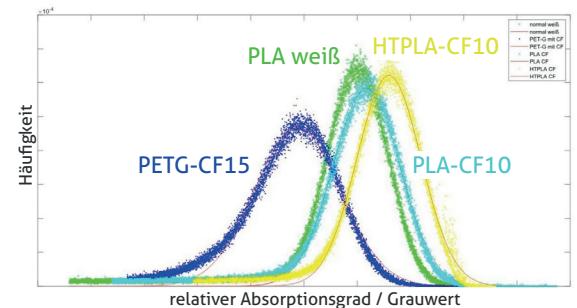
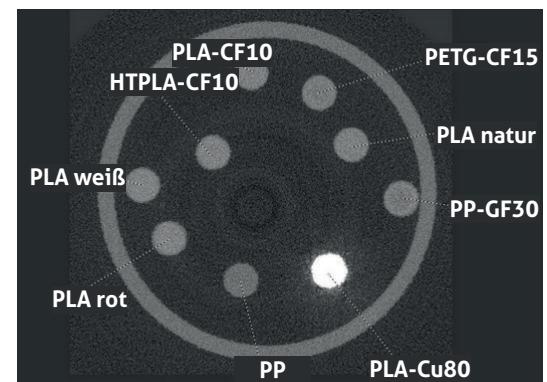
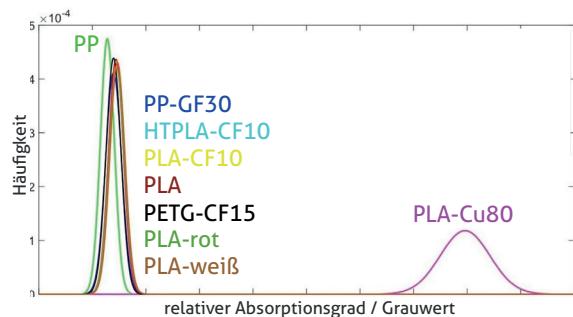
Oliver Neudert

8

# Bauteil-Markierung für Röntgen-CT

## Detektion von CT-Markern

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

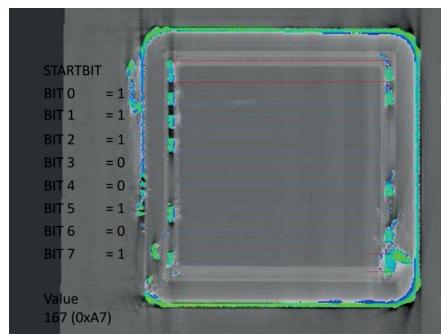


## Testkörper mit CT-Markern

- 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



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)

Detektion der Markierung und Interpretation als Bitmuster

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15.10.2025

Oliver Neudert

11

# Bauteil-Markierung für Ultraschall-Verfahren

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

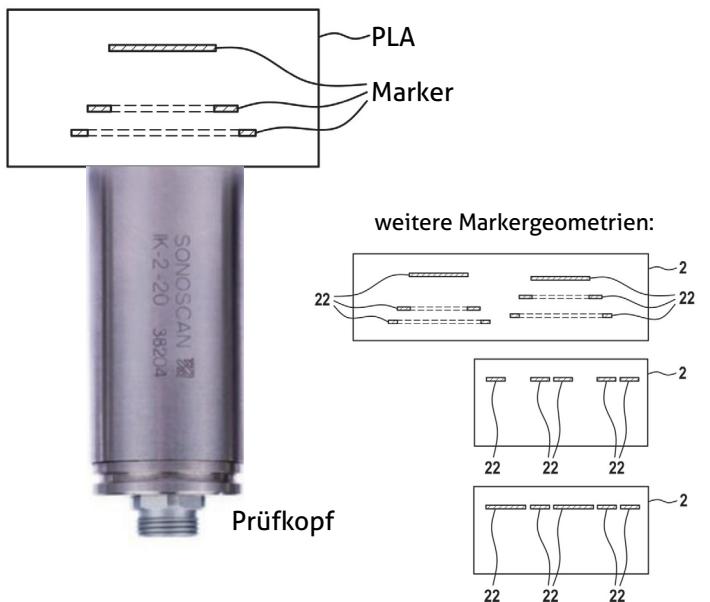
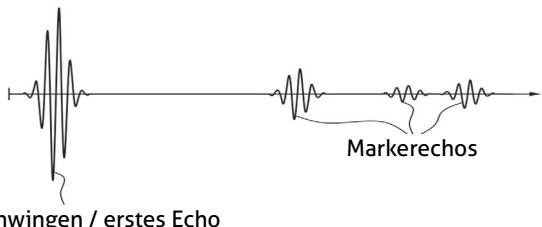
– Patent angemeldet –

Oliver Neudert

12

## 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)



GMBU

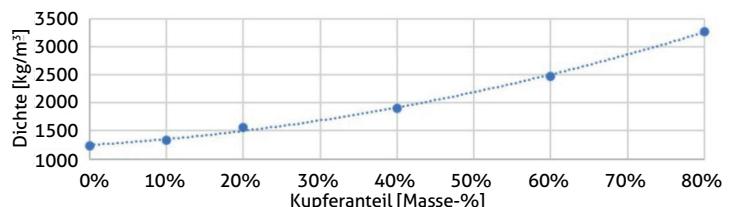
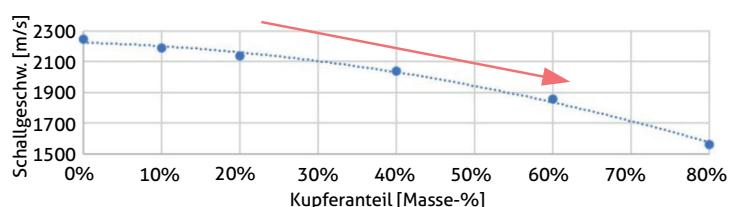
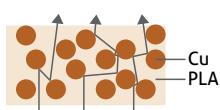
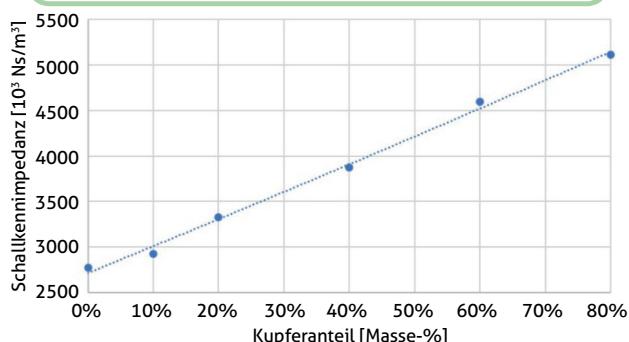
Gesellschaft zur Förderung  
von Medizin-, Bio- und  
Umwelttechnologien e.V.

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung  
– Patent angemeldet –

Oliver Neudert  
13

## Markermaterial für Ultraschall

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



GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung  
– Patent angemeldet –

Oliver Neudert  
14

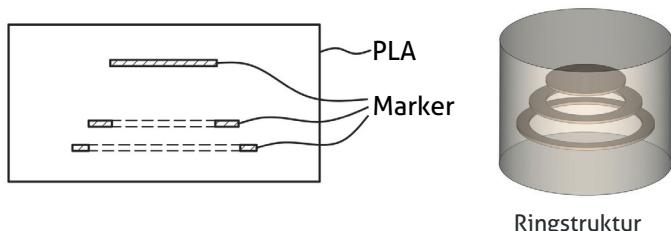
## Testkörper mit Ultraschallmarkern

### • 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 einfacherem Testkörper

GMBU

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

12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

– Patent angemeldet –

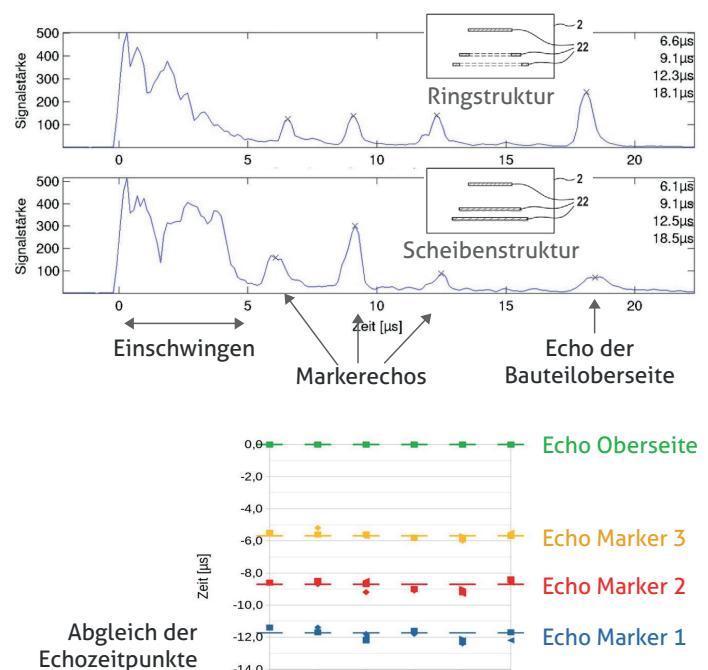
Oliver Neudert

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 –

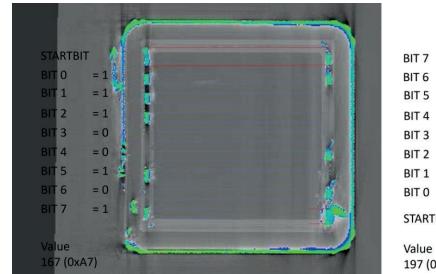
Oliver Neudert

16

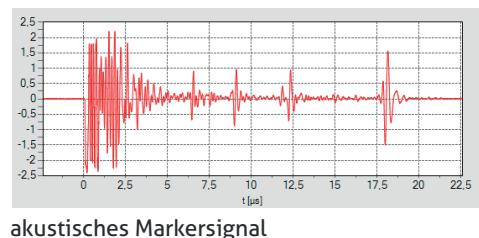
# Zusammenfassung

- 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)

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



## CT-Bild eines markierten Bauteils



GMBU

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

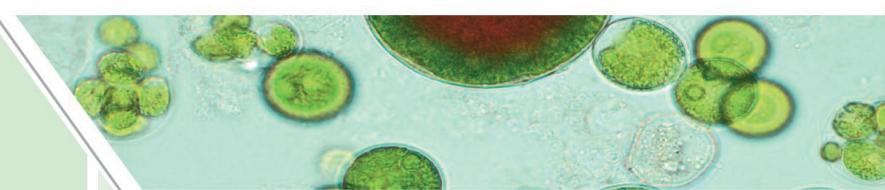
12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung

15.10.2025

Oliver Neudert

17

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Biotechnologie

additive Fertigung

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



ZUSE-GEMEINSCHAFT  
FORSCHUNG, DIE ANKOMMT



 WEINBERG CAMPUS  
TECHNOLOGIEPARK



 VIU  
Verband Innovativer



DECHEMA



Fachverband  
**BIOGAS**

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

Ralf Lach, Wolfgang Grellmann, Katrin Reincke

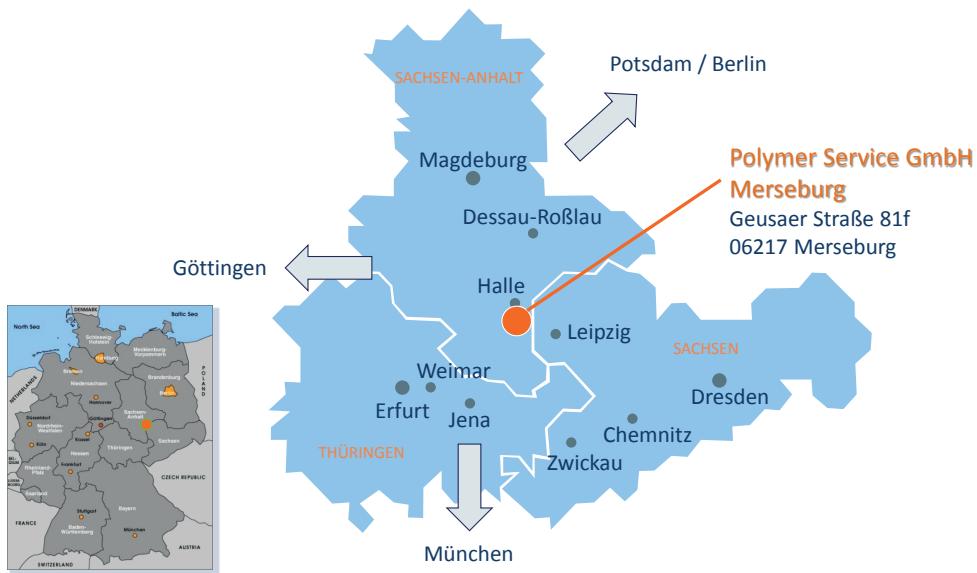
Polymer Service GmbH Merseburg, Geusaer Straße 81f, 06217 Merseburg

29.09.2025

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

1

## Standort

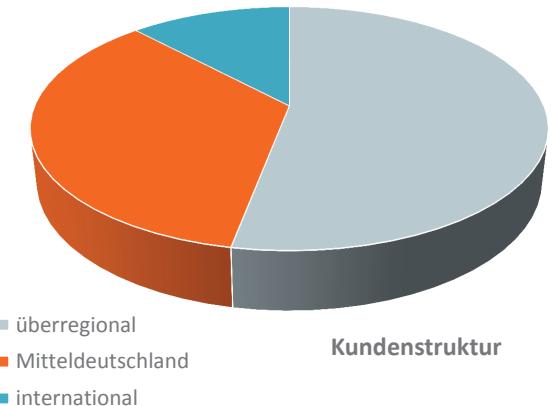


29.09.2025

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



## 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

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

- (Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen

- Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroindringversuch
- 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 Mikroindringversuch
- Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test

- Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens

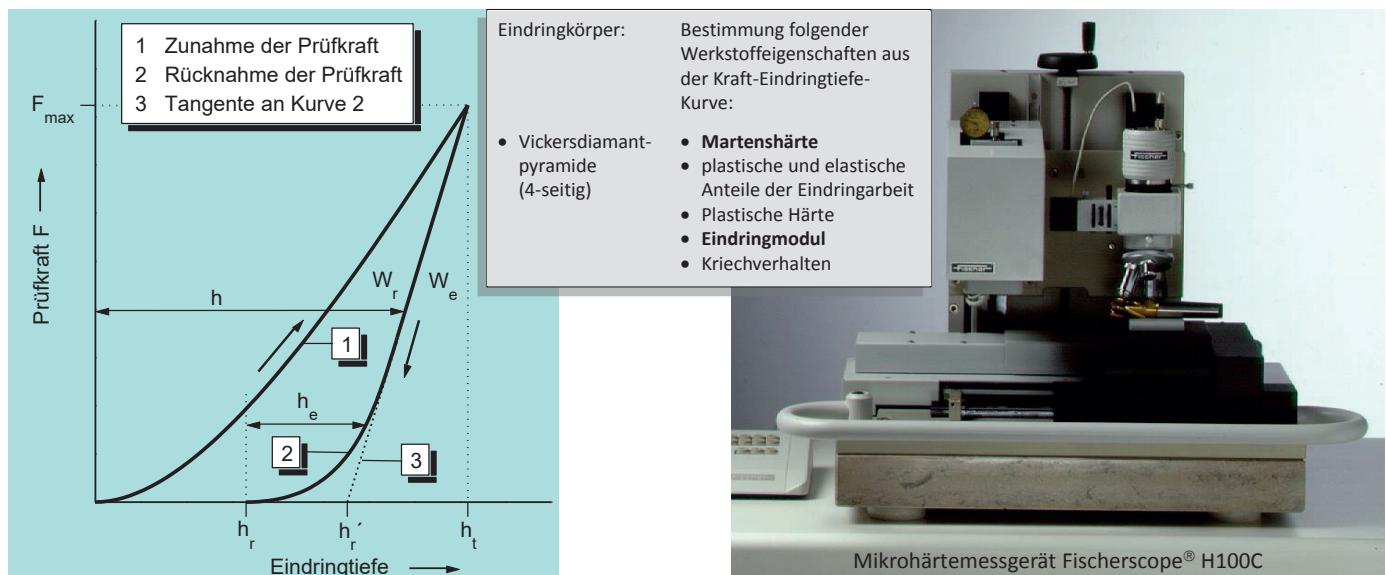
- Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
- Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest

- Zusammenfassung

## Registrierender Mikroeindringversuch



### Registrierender Mikroeindringversuch an 3D-gedrucktem PLA



29.09.2025

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

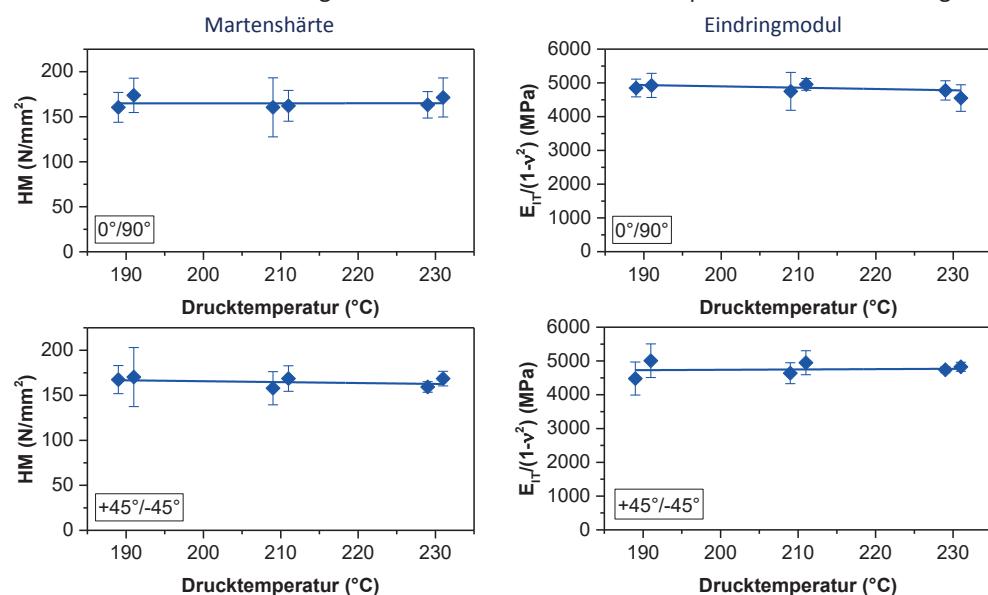
7

## Registrierender Mikroeindringversuch



### 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 Mikroindringversuch
- Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test

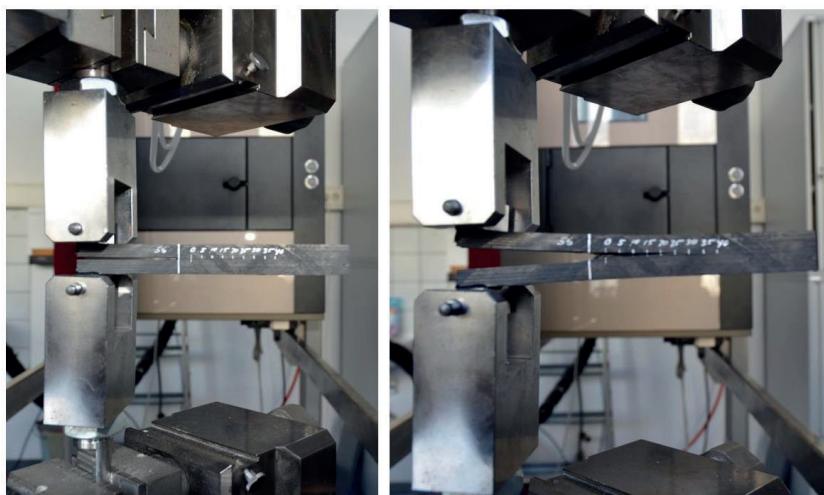
- Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens

- Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
- Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest

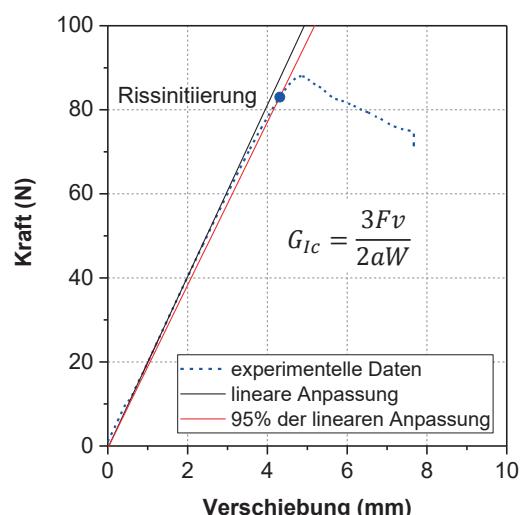
- Zusammenfassung

## Double-Cantilever-Beam-Test

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



Versuchseinrichtung für bruchmechanische Untersuchungen  
bei Mode I-Belastung



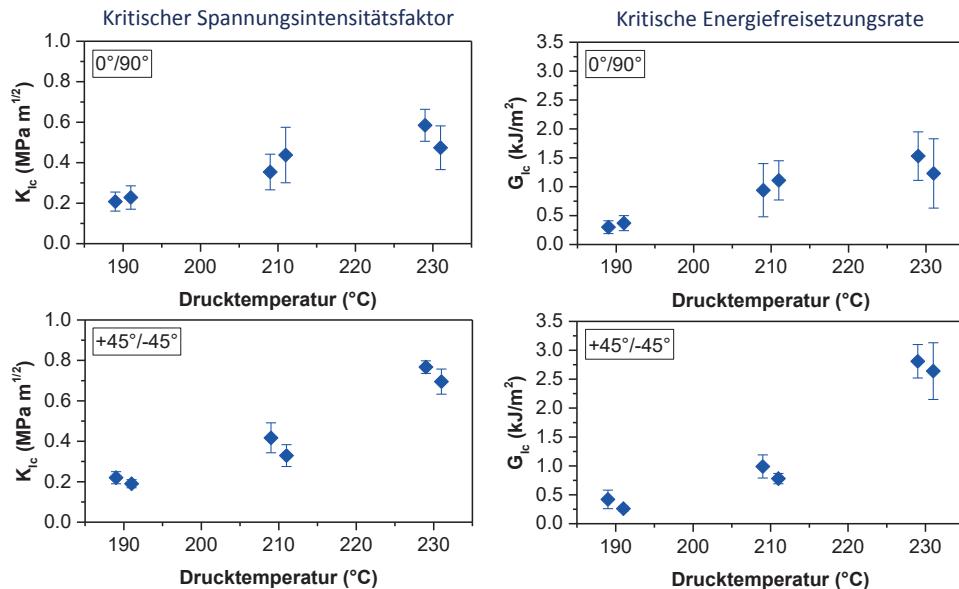
Analyse der Kraft-Verlängerungs-Diagramme  
unter Mode I-Belastung

## Double-Cantilever-Beam-Test



### 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

## Gliederung



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

- (Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen
  - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroindringversuch
  - 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

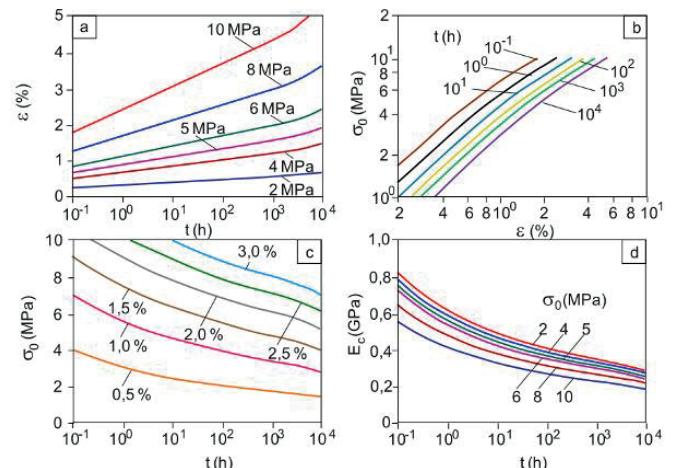
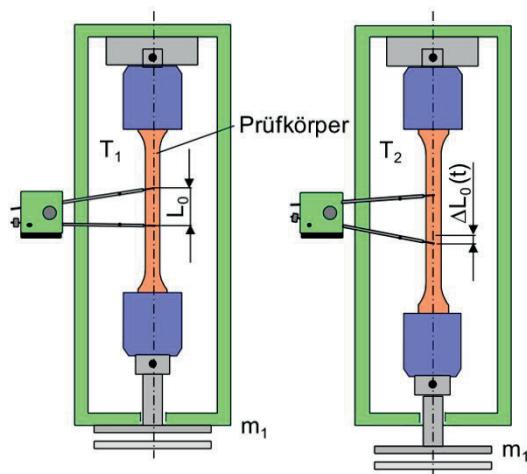
PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

12

## Stepped Isothermal Methode (SIM)



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](https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Kriechverhalten_Zeitstandzugversuch)

29.09.2025

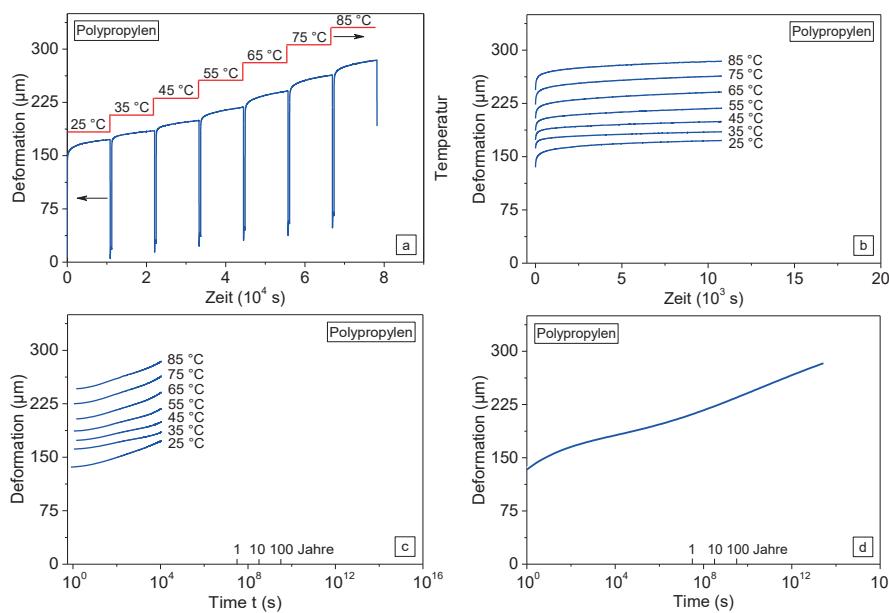
PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

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](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

## Stepped Isothermal Methode (SIM)



### 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"> <li>ISO 899-1: Plastics – Determination of creep behaviour – Part 1: Tensile creep</li> <li>ASTM D 2990: Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics</li> <li>ASTM D 638: Standard test method for tensile properties of plastics</li> </ul>

29.09.2025

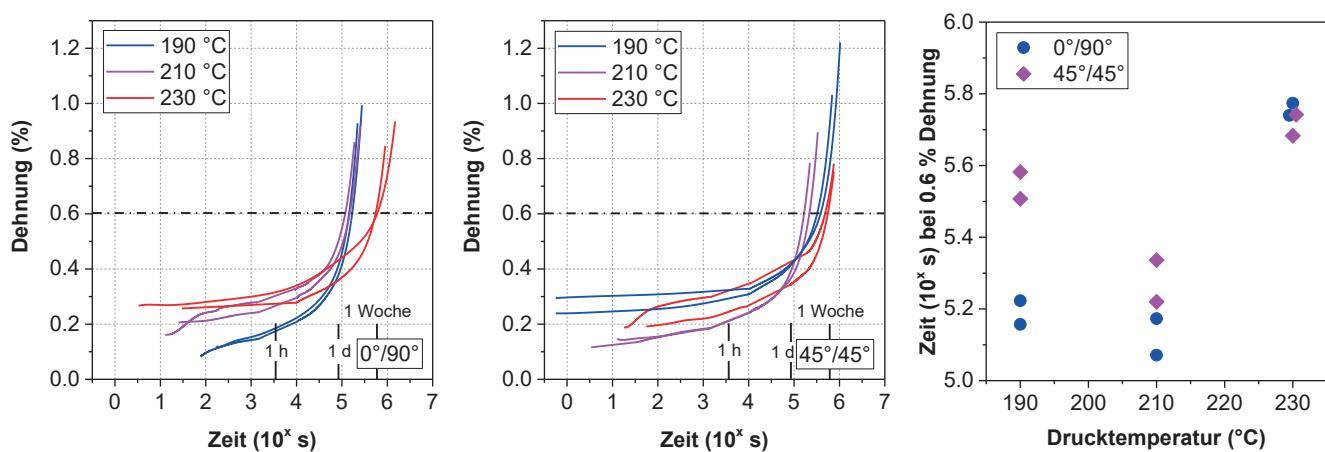
PSM – Ihr Dienstleister auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Kunststoff-Forschung und -Entwicklung

15

## Stepped Isothermal Methode (SIM)



**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

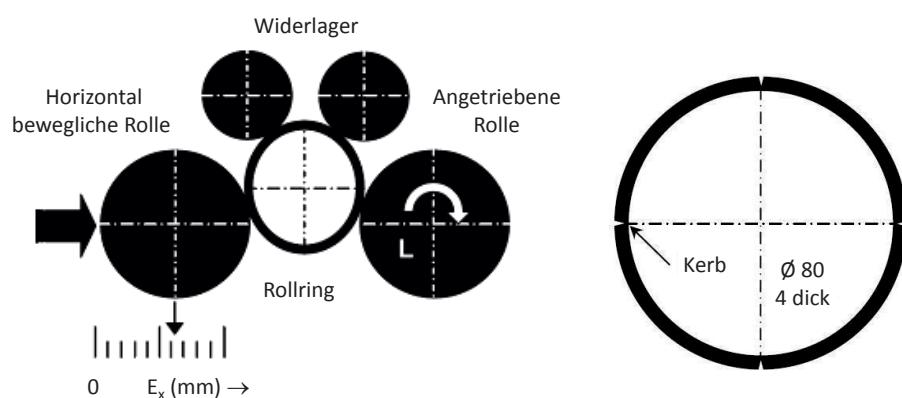
- Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroindringversuch
- Bruchmechanische Untersuchungen – Double-Cantilever-Beam (DCB)-Test

- Verfahren zur beschleunigten Bewertung des mechanischen Langzeitverhaltens

- Verhalten unter statischer Beanspruchung (Kriechverhalten) – Stepped Isothermal Methode (SIM)
- Verhalten unter zyklischer Beanspruchung – Rollringtest

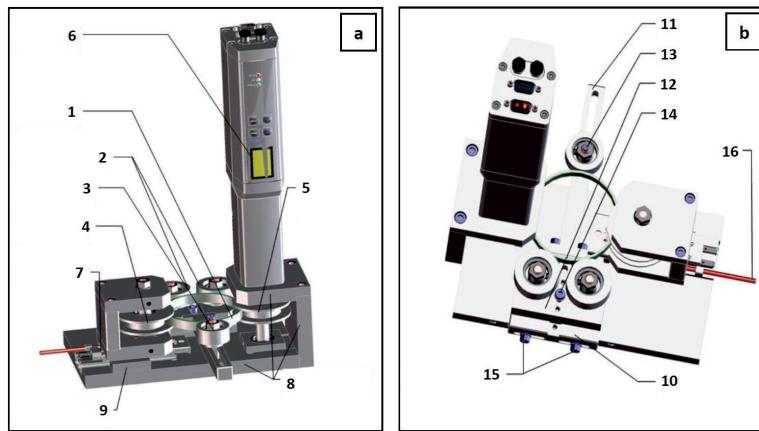
- Zusammenfassung

### Rollringversuch an 3D-gedrucktem PA12



Schema des Rollringversuchs (links) und Rollringprüfkörper (rechts)

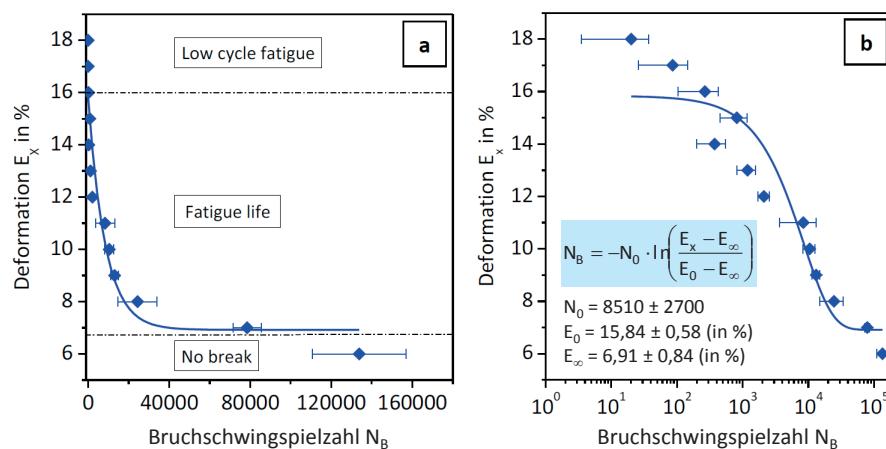
## Rollringversuch an 3D-gedrucktem PA12



**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

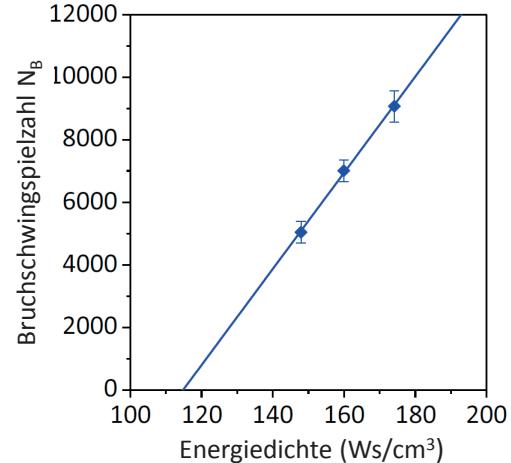
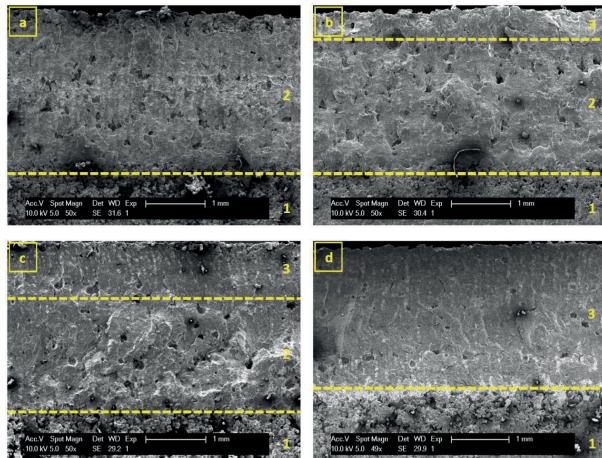
## Rollringversuch an 3D-gedrucktem PA12



**Bruchschwingspielzahl ( $N_B$ ) als Funktion der Deformation  $E_x$  von lasergesinterten Rollringen aus PA12:**  
 (a) lineare Auftragung und (b) logarithmische Auftragung

Energiedichte: 160 Ws/cm<sup>3</sup>; Umlaufbiegung: 250 min<sup>-1</sup>; durchgezogene Linien: beste Anpassung an die Daten

### 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/Sprödbruch

#### Bruchschwingzielzahl ( $N_B$ ) als Funktion der Energiedichte

Umlaufbiegung:  $250 \text{ min}^{-1}$ ; Deformation  $E_x = 10 \%$ ;  
durchgezogene Linie: beste lineare Anpassung an die Daten

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

- (Bruch)mechanisches Verhalten unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen
  - Mechanische Untersuchungen – Registrierender Mikroindringversuch
  - 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

- Kennwerte (Martenshärte, Eindringmodul) aus dem registrierenden Mikroehindringversuch aufgrund der im Wesentlichen amorphen Struktur von PLA nicht sensitiv auf unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen
- Bruchmechanische Kennwerte (kritischer Spannungsintensitätsfaktor, kritische Energiefreisetzungsraten) 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

## AddiQ-Anwenderforum





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



### Geschäftsleitung:

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.

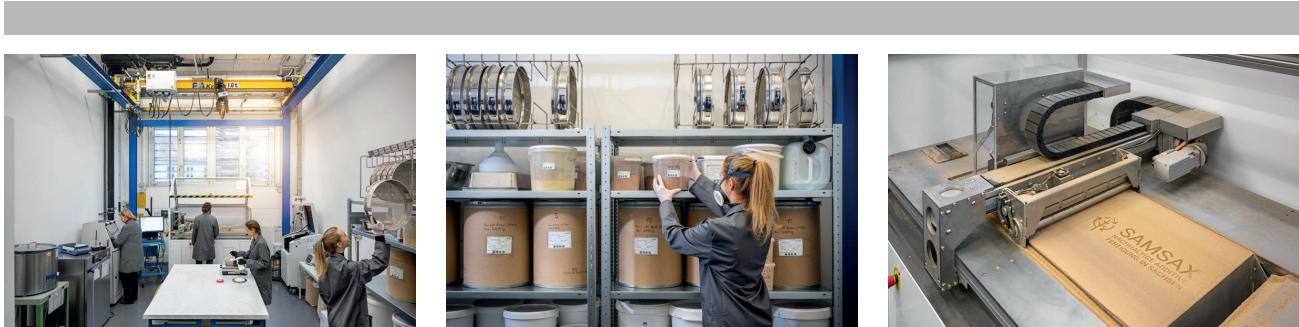
Der zweite Abschnitt widmet sich dem Spannungsfeld der **Metallpulverqualität versus Einsatzgrenzen laserbasierter Pulverbettverfahren** und betrachtet die metallurgischen Randbedingungen auf die Bauteilqualität. Abschließend werden **besondere Kriterien in der Qualitätsprüfung von Metallpulvern betrachtet, 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 SAMSSax

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

Leif Bretschneider - TU Bergakademie Freiberg



### Gliederung

1. Hintergrund
2. Methoden – Reallabor SAMSSax
3. Binder Jetting bei SAMSSax
4. Materialextrusion bei SAMSSax
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<sup>+</sup> Reallabor SAMSax (Sustainable Additive Manufacturing in Saxony)*

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

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



© Crispin Mokry

**simul<sup>+</sup> 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

15.10.2025

samsax.de

4

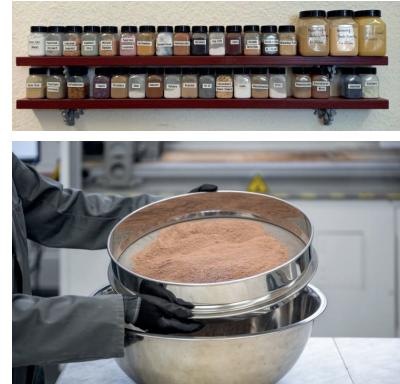
## Methoden

### 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

## Methoden

### Bio-basierte Binder & Prozessanpassung

#### Vorteile bio-basierter Bindemittel

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

#### Bindemittel in Gebrauch und Entwicklung

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


© Crispin Mokry

#### 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

## 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

## Binder Jetting

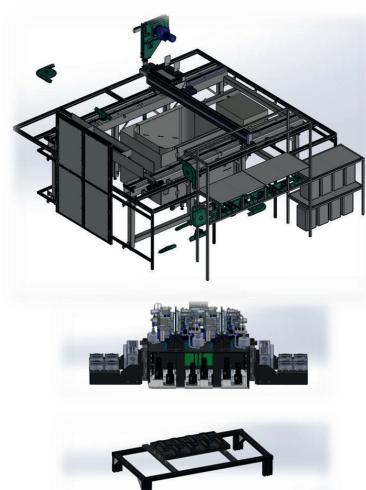
### *Binder Jetting Technologie bei SAMsax*

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

## Binder Jetting

### *Binder Jetting Technologie bei SAMSSax*

#### Produktionssystem:

- Bauvolumen: 1 m<sup>3</sup>
- Unterstützt wasser- und lösungsmittelbasierte Tinten
- Kompatibel mit Pulverpartikelgrößen von 5–1000 µm
- Verarbeitet Schüttdichten von 0,1–4,5 g/cm<sup>3</sup>



#### 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

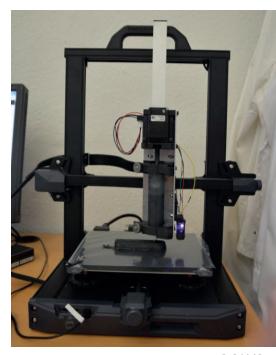
## Material Extrusion

### *Materialextrusion bei SAMSSax*

- SAMSSax 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


© SAMSSax
© WASP

## 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



**TUBAF**  
TUM Institut für  
Baugenieure und  
Bautechnik



**IMK** INSTITUT FÜR  
MASCHINENLEISTUNGEN  
UND  
PROZESS-  
OPTIMIERUNG  
PROFESSUR ADDITIVE  
FERTIGUNG

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

Leif Breitschneider, Henning Zedler

Potentiale	Prozesskette
• Erweiterung des Einsatzbereiches von Additiver Fertigung • Reduzierung von Materialabfall und Kosten • Erhöhung der Wiederverwertung von Holzreststoffen • Erhaltung der Holzqualität • Erhöhung der Produktivität • Erhöhung der Qualität • Erhöhung der Flexibilität	• Planung • Herstellung • Montage • Wartung • Recycling
• Erweiterung des Einsatzbereiches von Additiver Fertigung • Reduzierung von Materialabfall und Kosten • Erhöhung der Wiederverwertung von Holzreststoffen • Erhaltung der Holzqualität • Erhöhung der Produktivität • Erhöhung der Qualität • Erhöhung der Flexibilität	• Planung • Herstellung • Montage • Wartung • Recycling
• Erweiterung des Einsatzbereiches von Additiver Fertigung • Reduzierung von Materialabfall und Kosten • Erhöhung der Wiederverwertung von Holzreststoffen • Erhaltung der Holzqualität • Erhöhung der Produktivität • Erhöhung der Qualität • Erhöhung der Flexibilität	• Planung • Herstellung • Montage • Wartung • Recycling

Herausforderungen

- Anpassung der Prozesse an Holzreststoffe
- Entwicklung von speziellen Bindemitteln
- Optimalisierung der Druckparameter
- Herstellung von komplexen Strukturen
- Wiederverwertung von Abfällen
- Erhaltung der Holzqualität
- Erhöhung der Produktivität
- Erhöhung der Qualität
- Erhöhung der Flexibilität

Lösungsansätze

- Anpassung der Prozesse an Holzreststoffe
- Entwicklung von speziellen Bindemitteln
- Optimalisierung der Druckparameter
- Herstellung von komplexen Strukturen
- Wiederverwertung von Abfällen
- Erhaltung der Holzqualität
- Erhöhung der Produktivität
- Erhöhung der Qualität
- Erhöhung der Flexibilität

Binderwahl

Binder	Bindemittel	Werkstoff	Verarbeitung
PVA	Polyvinylalcohol	Cellulose	Wasserbasiert
Alginat	Alginat	Alginat	Wasserbasiert
Culminal	Culminal	Cellulose	Wasserbasiert
Tylose	Tylose	Cellulose	Wasserbasiert
Xanthan Gum	Xanthan Gum	Cellulose	Wasserbasiert
Bindemittelkombination	Bindemittelkombination	Bindemittelkombination	Bindemittelkombination

Recyclingfähigkeit

- Wiederverwertung von Abfällen
- Erhaltung der Holzqualität
- Erhöhung der Produktivität
- Erhöhung der Qualität
- Erhöhung der Flexibilität

Ausblick

- Fortschritte in der Additiven Fertigung und Wiederverwertung von Holzreststoffen
- Entwicklung von speziellen Bindemitteln
- Optimalisierung der Druckparameter
- Herstellung von komplexen Strukturen
- Wiederverwertung von Abfällen
- Erhaltung der Holzqualität
- Erhöhung der Produktivität
- Erhöhung der Qualität
- Erhöhung der Flexibilität

15.10.2025

samsax.de

11


**SAMSAX**  
 NACHHALTIGE ADDITIVE  
 FERTIGUNG IN SACHSEN

Gliederung
Hintergrund
Methoden
Binder Jetting
Materialextrusion
Prototypen
Ausblick

## 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

- 181 -

## 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](http://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](http://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](http://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](http://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, Recyceln
- Positionierung von SAMSax als Maßstab für nachhaltige additive Fertigung durch interdisziplinäre Zusammenarbeit

## 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, Şirir, '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

## Vielen Dank für Ihr Interesse! Ihr SAMSSax 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 Ressourceneffizienz.  
Seit 1763.



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



Das Sächsische Staatsministerium für Infrastruktur  
und Landesentwicklung (SMIL) unterstützt das  
Projekt im Rahmen des Simul+Innovationshubs.

## 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



Informationen  
Ressourcen  
Energie



TU Clausthal



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)



Recycling:

Filament-Rückstände,  
Fehldrucke,  
Stützstrukturen

SLS/SLM (Pulver)



Pulver (nur teilweise  
Produktionsintern)

SLA (UV aktives Resin)



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

[roeben-recycling.de](http://roeben-recycling.de)

## Recycling im (M)SLA „Resin“ 3D-Druck:



Isopropanol als Reinigungsmittel

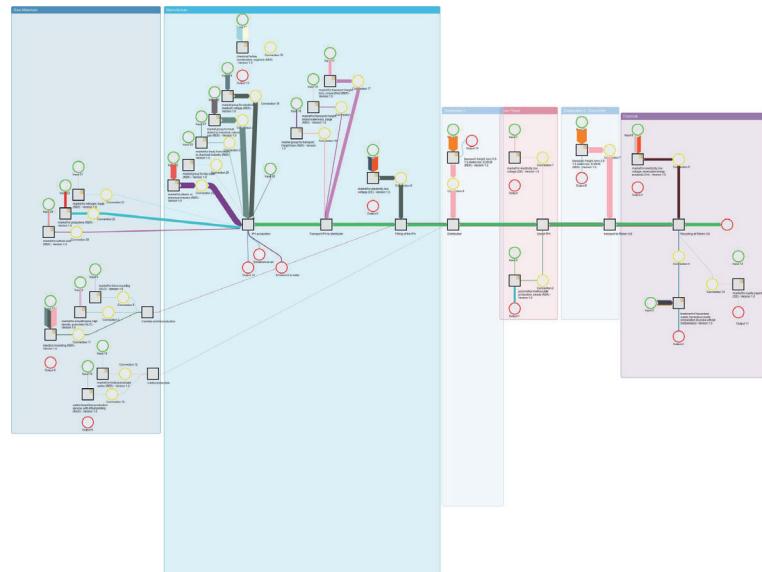


<https://bifab.io/blog/3d-printing-plastic-recycling/>

[roeben-recycling.de](http://roeben-recycling.de)

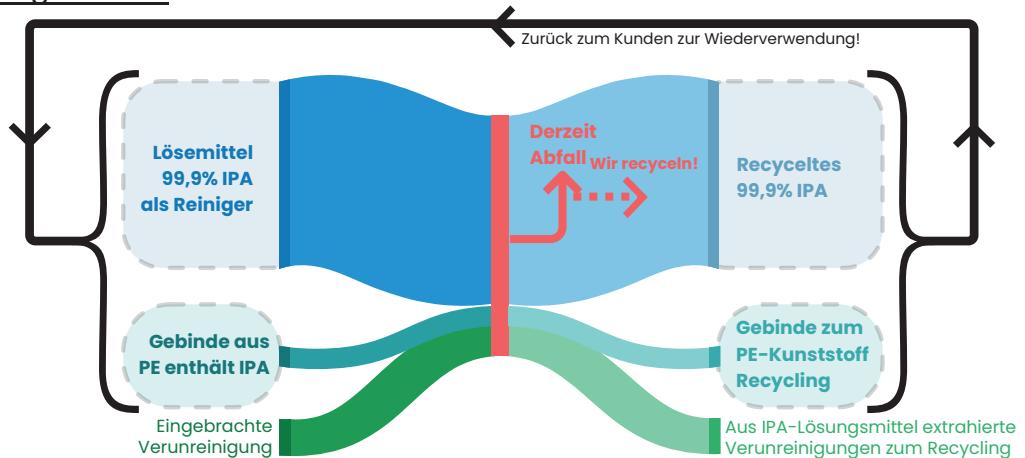
## Umweltbilanz

Umwandlung in ein zirkuläres Produkt:



[roeben-recycling.de](http://roeben-recycling.de)

## Recyclingkreislauf



[roeben-recycling.de](http://roeben-recycling.de)

Danke für ihre Aufmerksamkeit!

**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?



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-optimal systems



## Ist die additive (Wieder)Herstellung von Ersatzteilen sinnvoll?

### Überblick

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



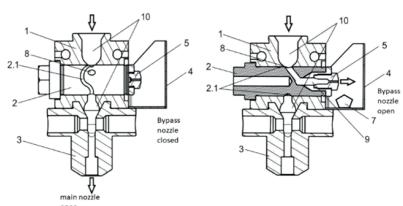
## 3D-Druck → Nachbearbeitung



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

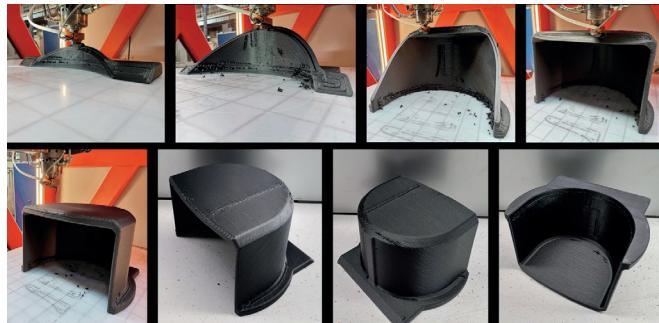
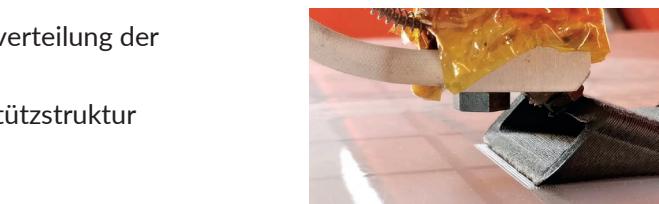


multi optional systems  
**metrom**

## 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-gedruckt: 7 kg
- Druckzeit 4 Stunden
- Materialkosten 56€
- Kosten ~500€/Teil

In Zusammenarbeit mit Partner:

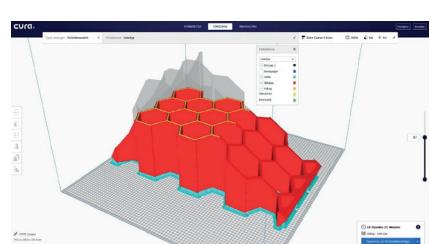
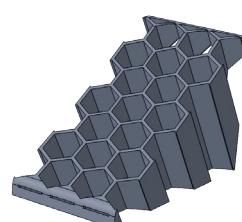


source: Fraunhofer IWU



## SEAM Anlegekeil für Muldenkipper

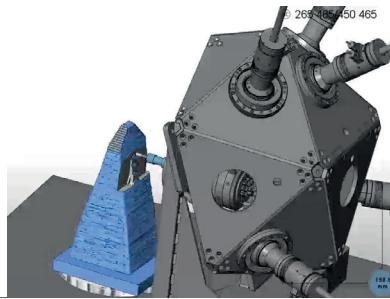
- Substitution eines Stahlbauteils
- Erster Ansatz Druckzeit 10,5 Stunden
- Zweiter Ansatz Druckzeit 4 Stunden
- Materialkosten 120€ bei beiden Varianten
- Leicht und stabil
- Anpassbar an Anforderungen der Arbeitssicherheit und regionalen Bedürfnisse (Hebegewicht, Größe)



## 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:  
**DVS** SLV HALLE



multi-optional systems  
**metrom**

## Baggerzahn 3D-Druck als Reparatur

In Zusammenarbeit mit Partner:

**DVS** SLV HALLE

- Mechanische Bearbeitung auf definiertes Höhenniveau mittels HSC-Zerspanung
- Auftragen ohne Zwischenscan mit Hartauftragsmaterial
- Keine mechanische Nachbearbeitung
- Wiederherstellungszzeit 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

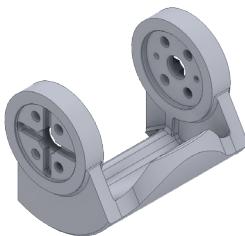


multi-optional systems  
**metrom**

## Neufertigung als Ersatz zu Gussbauteilen - Gasschieber



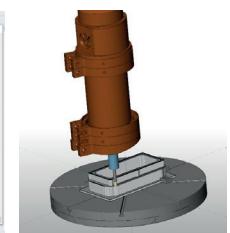
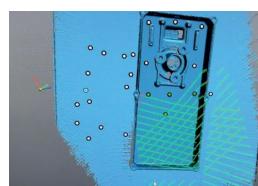
- Herstellung mittels wire-DED (75kg bei Nettogewicht 28kg) mit Voestalpine Thermanite
- Zwischenbearbeitung unzugänglicher Bereiche
- Fertigung von Referenzpunkten für finale Bearbeitung
- Herstellungszeit Schweißen+Fräsen 2 Wochen vs. 6 Monate Lieferzeit
- Aufgrund Einzelstück Kostenvorteil von ca. 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



multi optional systems  
**metrom**

## Fertigung in der Mobile Smart Factory

Mobile

Smart

Factory (in a box)

- 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



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

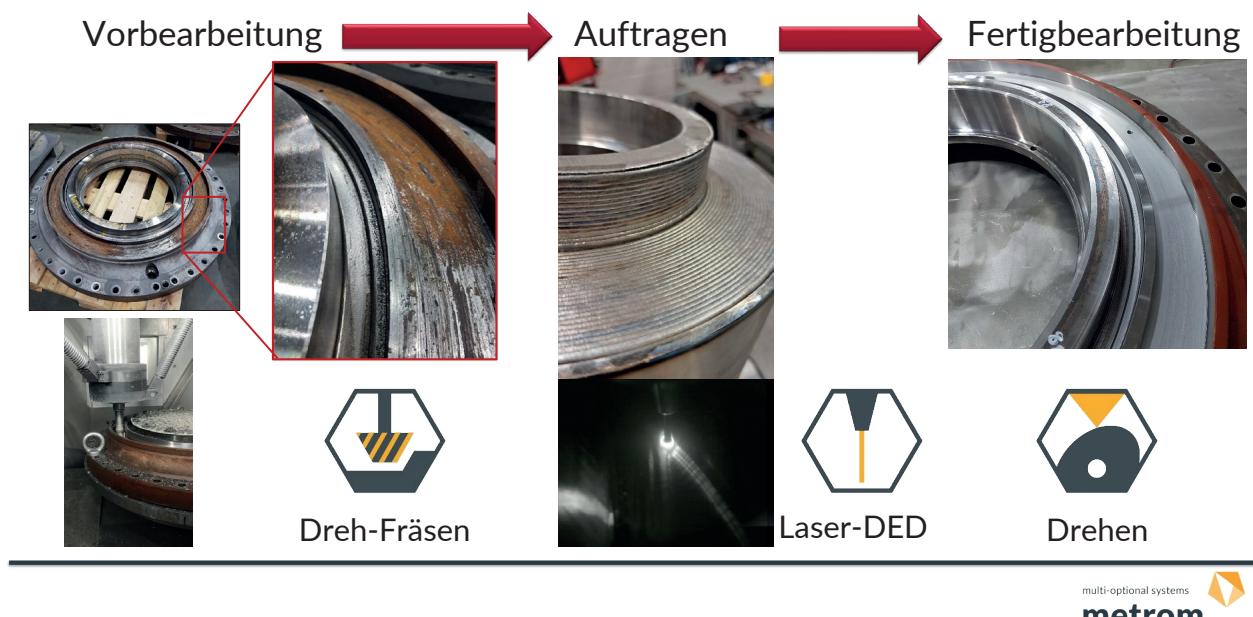


3 Fertiges Bauteil  
>15:00Uhr



multi-optional systems  
**metrom**

## Wiederherstellung durch Hybridbearbeitung in einer Maschine



multi-optional systems  
**metrom**

## 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-optimal 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 - Lüburg*



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

### Makro Selective Laser Melting von:

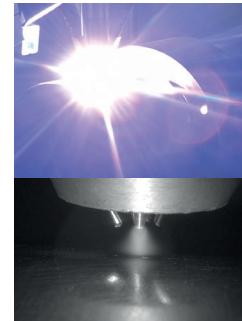
 **Laserinstitut**  
Hochschule Mittweida



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

### WIG-<sup>3D</sup>-Schweißen von

**OSCAR**  
JUST ADD METAL.

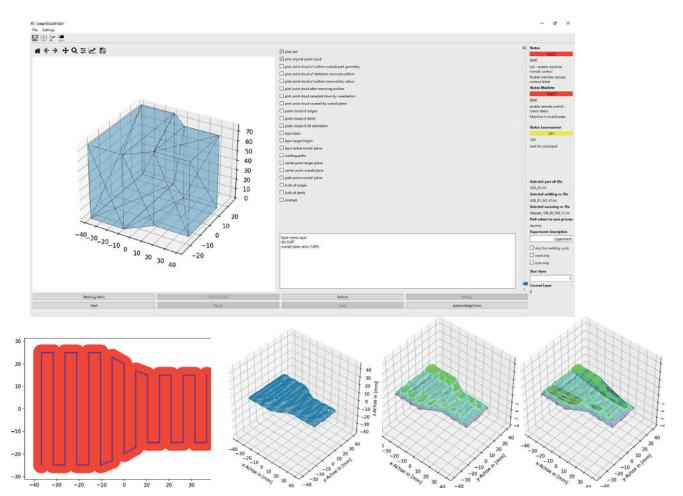


Material: Bronze, Stahl, Inconel  
Vorteile: omnidirektional,  
kein Pulverhandling  
Überhänge

multi-optional systems  
**metrom** 

## Ausblick Automatisierung

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



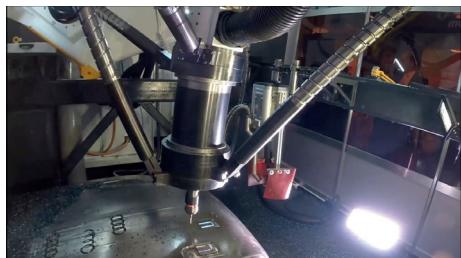
In Zusammenarbeit mit Partner:

 **TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**  **FTM**  
Fügetechnik und Montage

multi-optional systems  
**metrom** 

## Ausblick 3D-Druck + Nachbearbeitung für Großbauteile

Mobile hybride  
Maschine



Mobile Maschine  
+ Roboter



Mobile Maschine +  
Fahrssystem



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

# AGENDA

**01**

Über uns

**02**

Gemeinsam in  
die Zukunft!

**03**

Geomagic  
Freeform

**04**

Erstes Treffen  
3D-Scannen

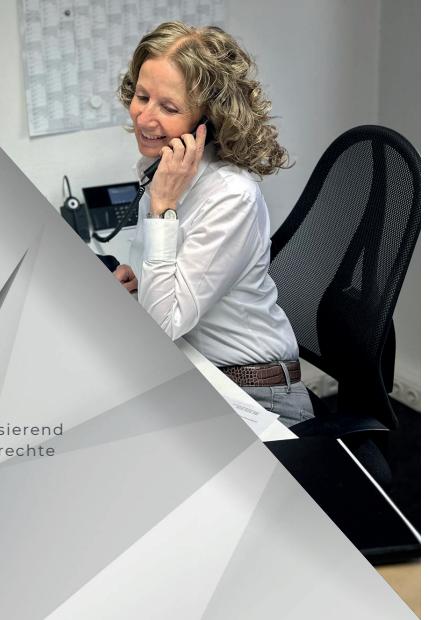
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

# 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

AK

# SCANNER

Artec 3D



SHINING 3D®



REVOPOINT



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

AK

# SCANNER



©Copyright 2025 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

The image shows a medical professional in a white coat using a handheld 3D scanner to capture data from a patient's arm. A large, semi-transparent watermark of the AK logo is overlaid on the top left. In the center, the text "GEOMAGIC FREEFORM" is displayed in large, bold, black letters.

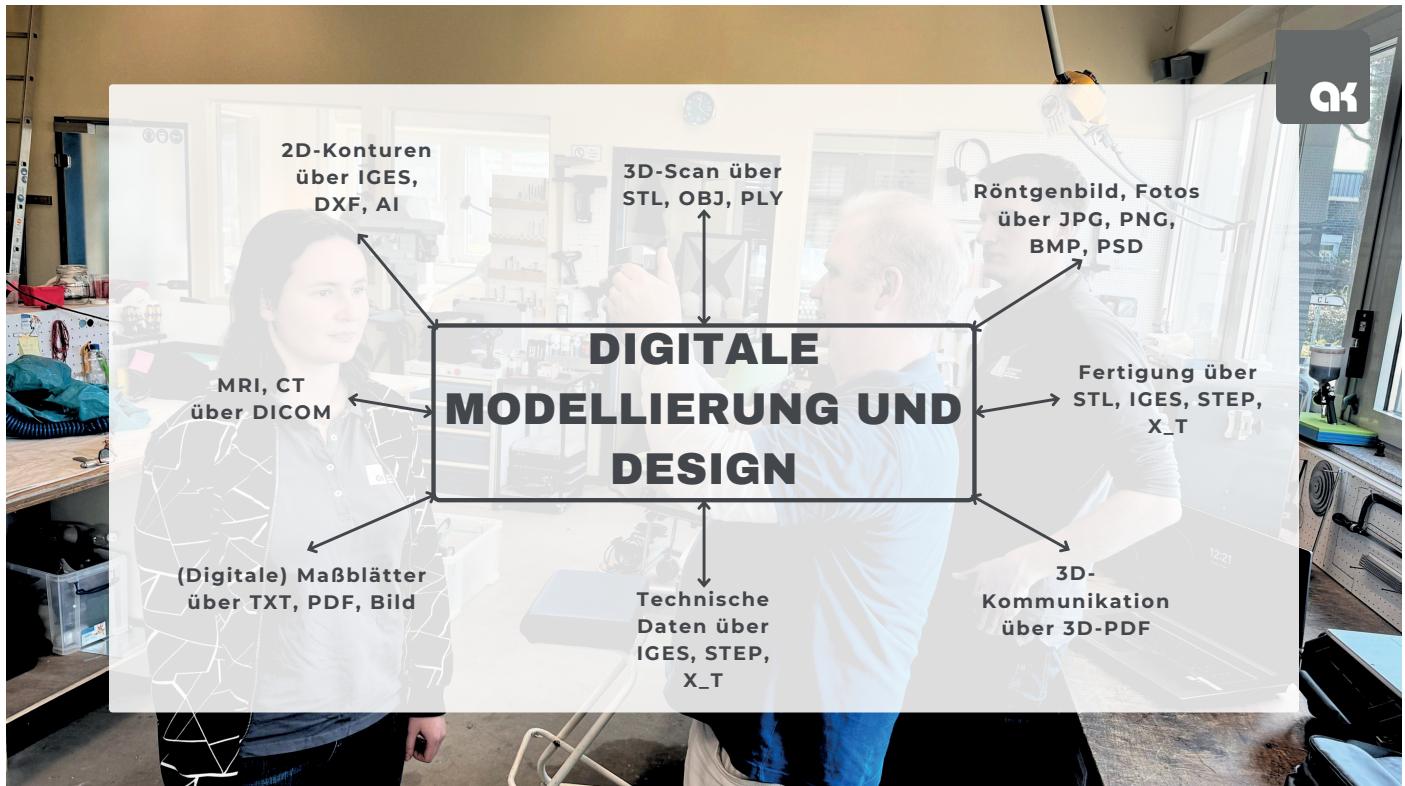
©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

# HYBRIDE MODELLIERUNG



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

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG



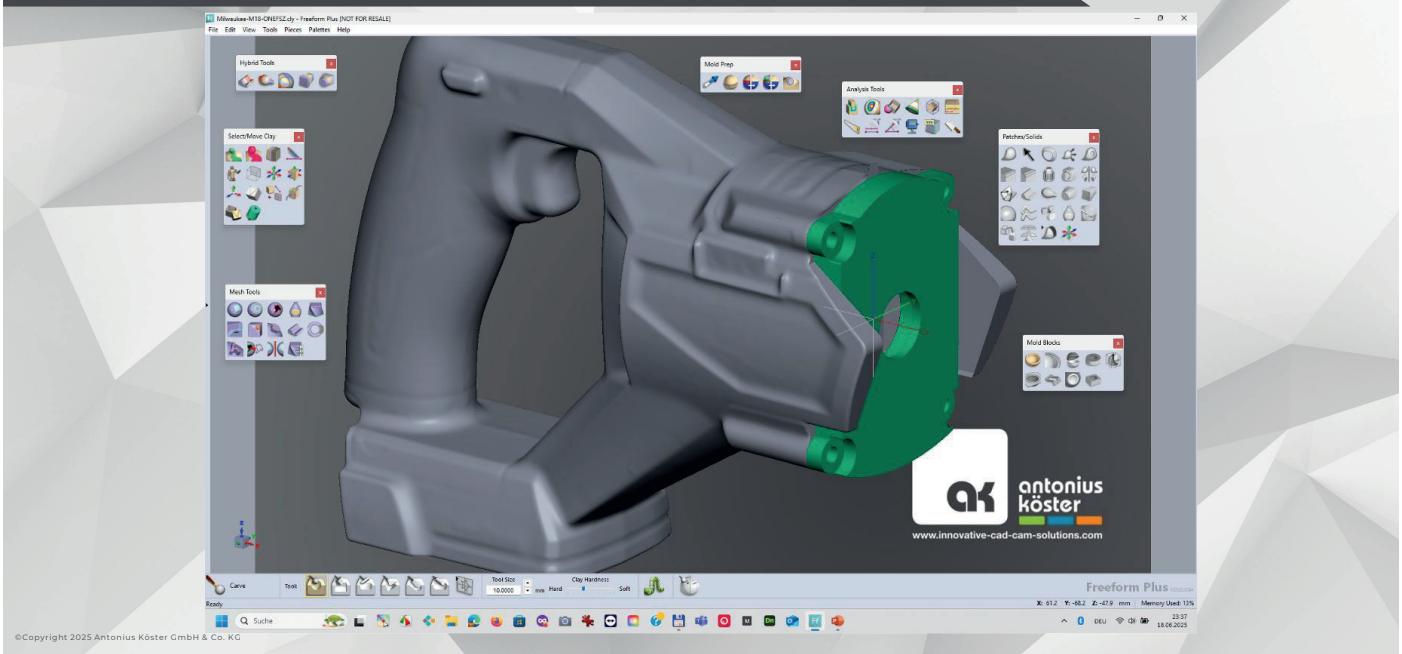
## DIGITALE WERKSTATT



## SCAN-VERARBEITUNG



# VEREINFACHUNG / NURBS SOLIDS



## 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



Competence in 3D...



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG



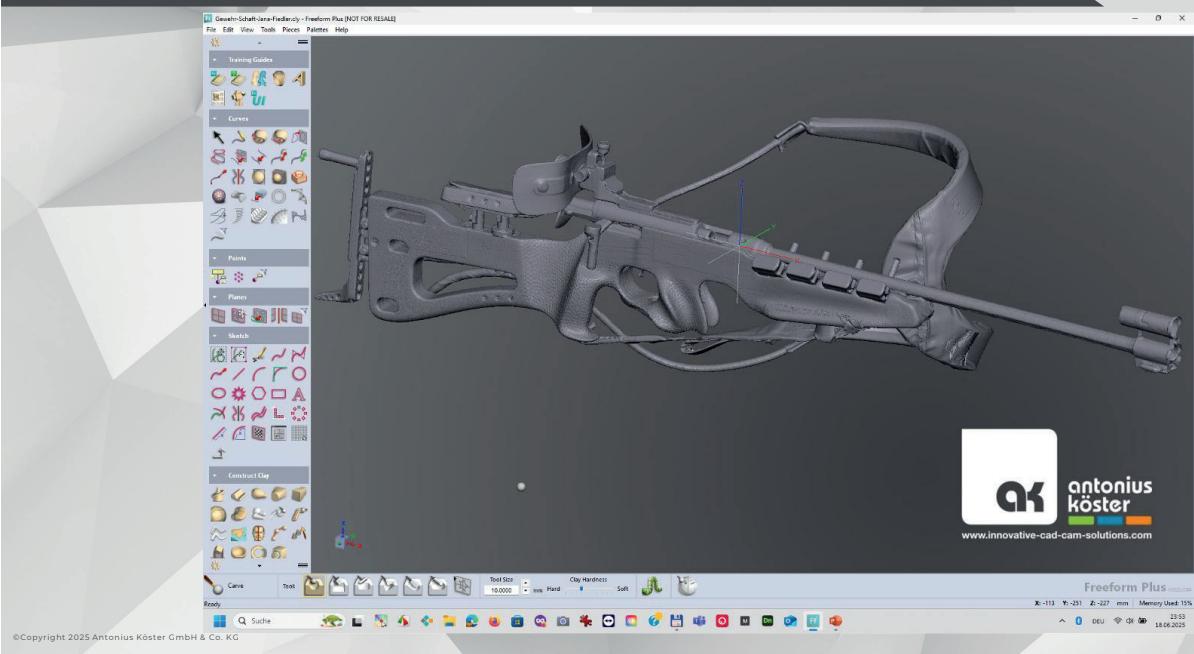
# ERSTES TREFFEN 3D-SCANNEN

©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

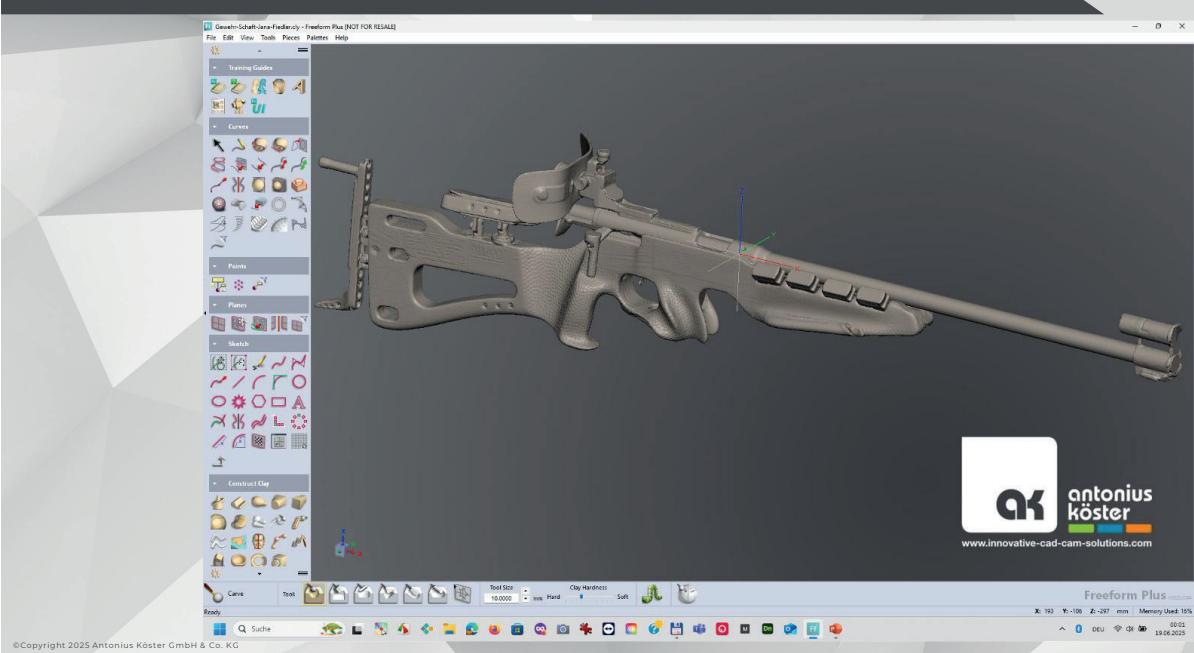


©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

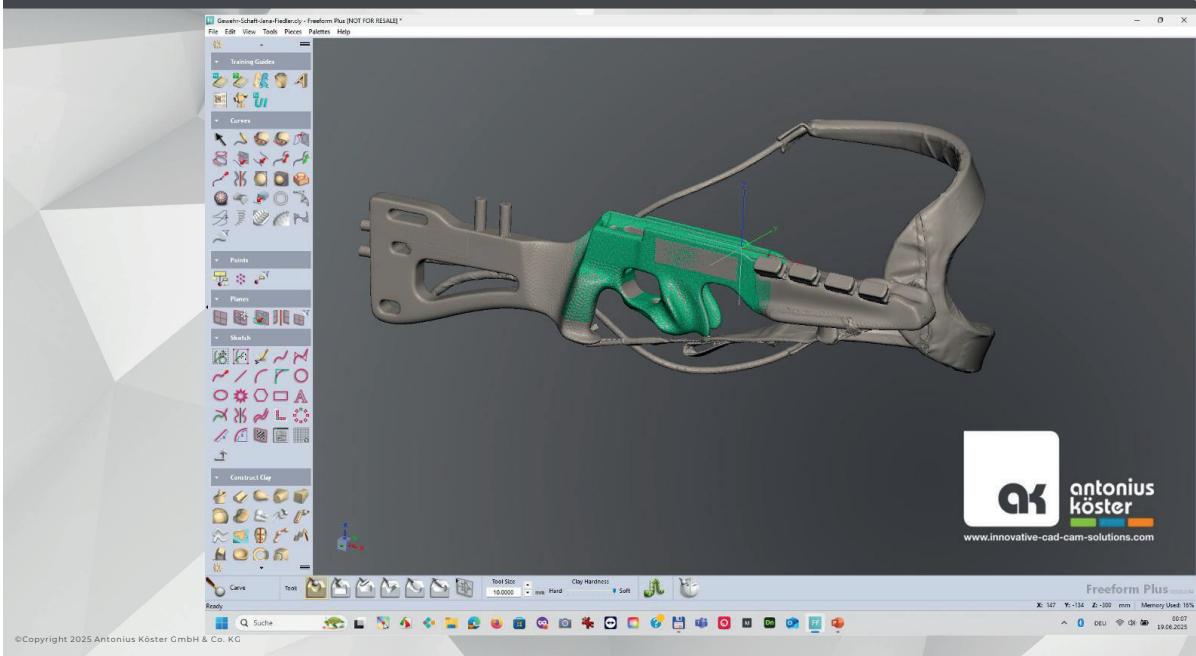
## FREEFORM PLUS - SCAN IMPORT (MESH)



## FREEFORM PLUS - SCAN BEREINIGUNG



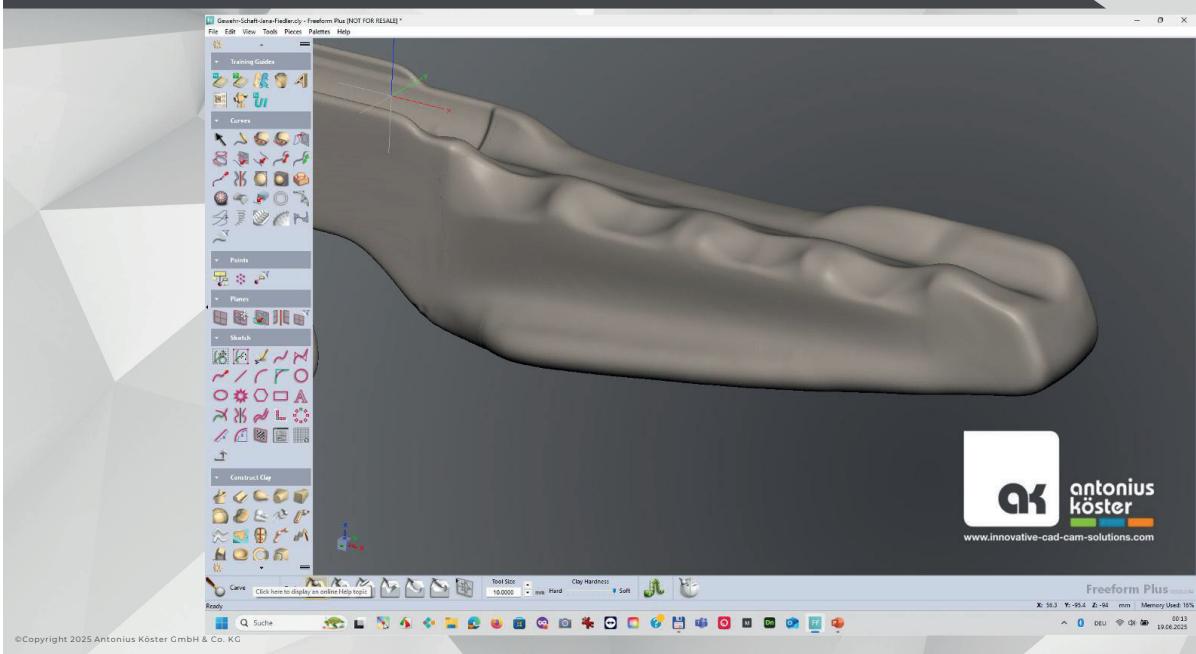
## FREEFORM PLUS - CLAY (VOXEL MODELING)



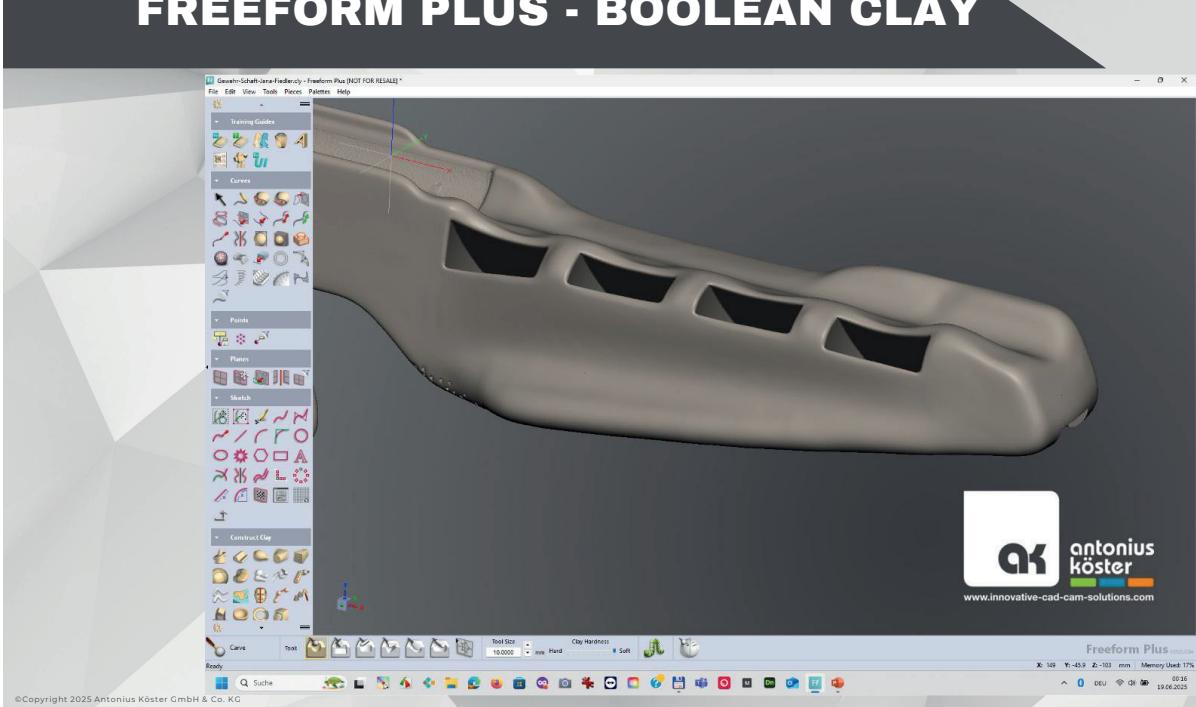
## FREEFORM PLUS - UMGESTALTUNG



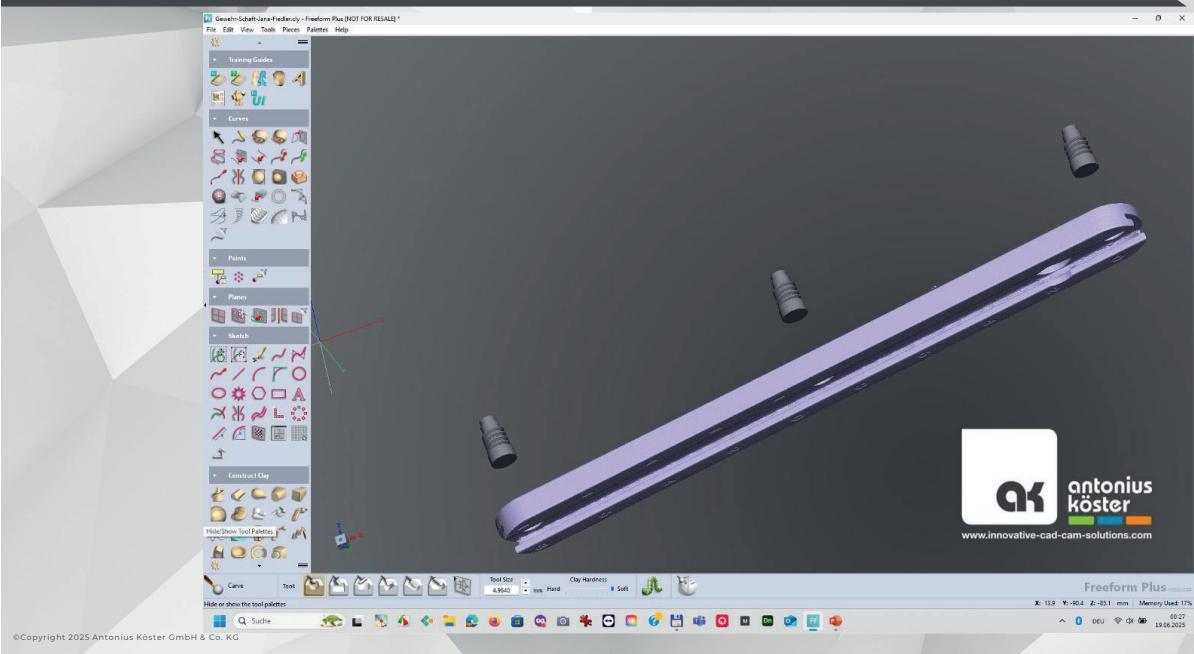
## FREEFORM PLUS - GLÄTTUNG



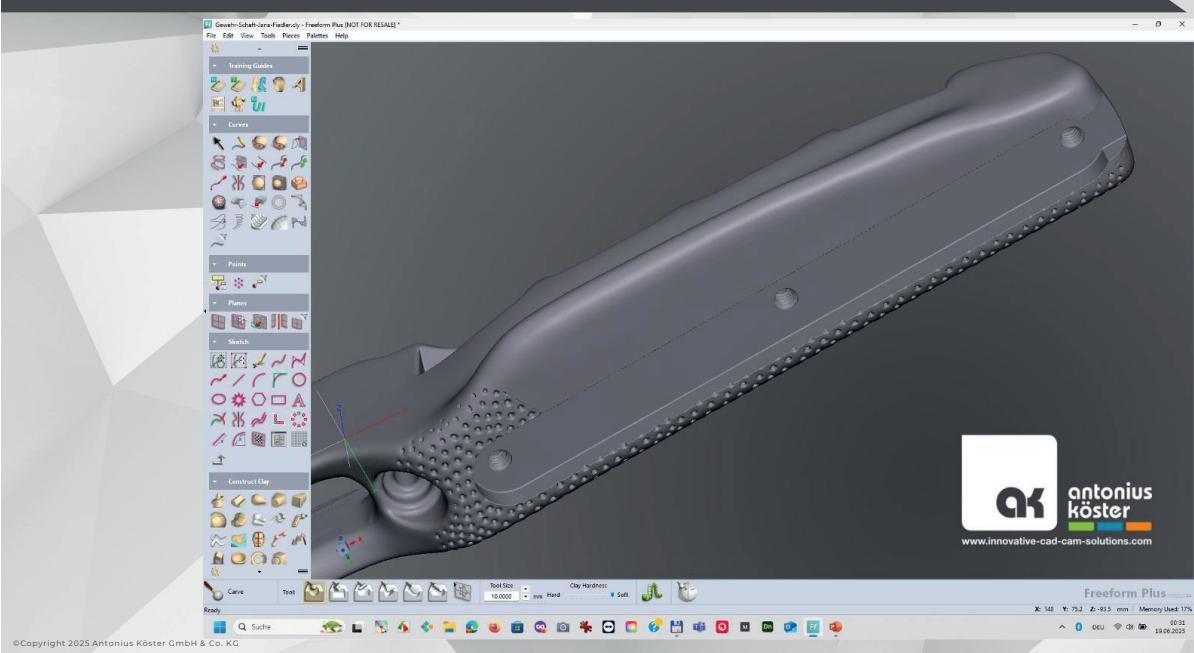
## FREEFORM PLUS - BOOLEAN CLAY



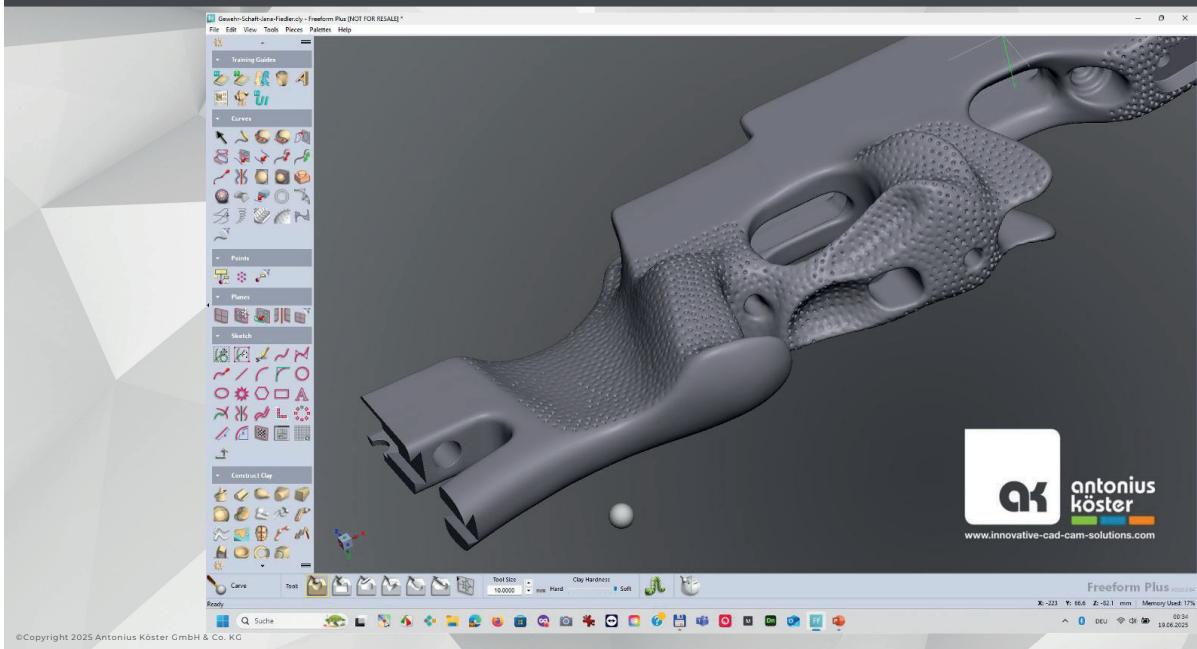
## FREEFORM PLUS - BOOLEAN MESH / SOLID



## FREEFORM PLUS - BOOLEAN MESH / SOLID



## FREEFORM PLUS - BEIBEHALTUNG DER TEXTUR



## SLS - FÄRBEN - GLÄTTEN - MONTIEREN



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG

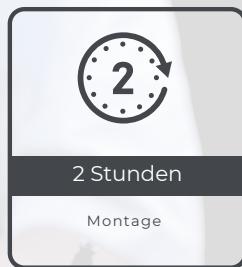
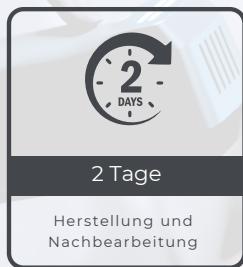
**FIRST TEST**



©Copyright 2025 Antonius Köster GmbH & Co. KG



## NACHKALKULATION: SCHAFT FÜR EIN BIATHLON-GEWEHR



# FALL: SCHAFT FÜR EIN BIATHLON-GEWEHR

AK

## 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 S.A.S / 26. November 2025



- » 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 2015



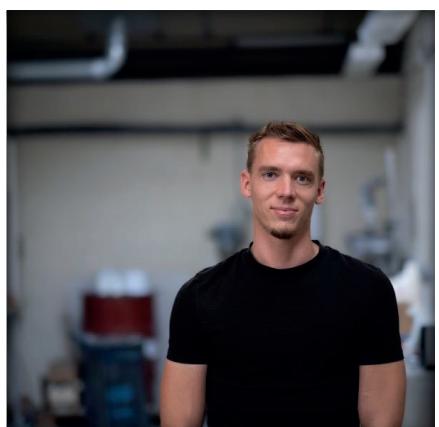
### #3 SYNTHENE/ FORMULIERUNG



- » 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

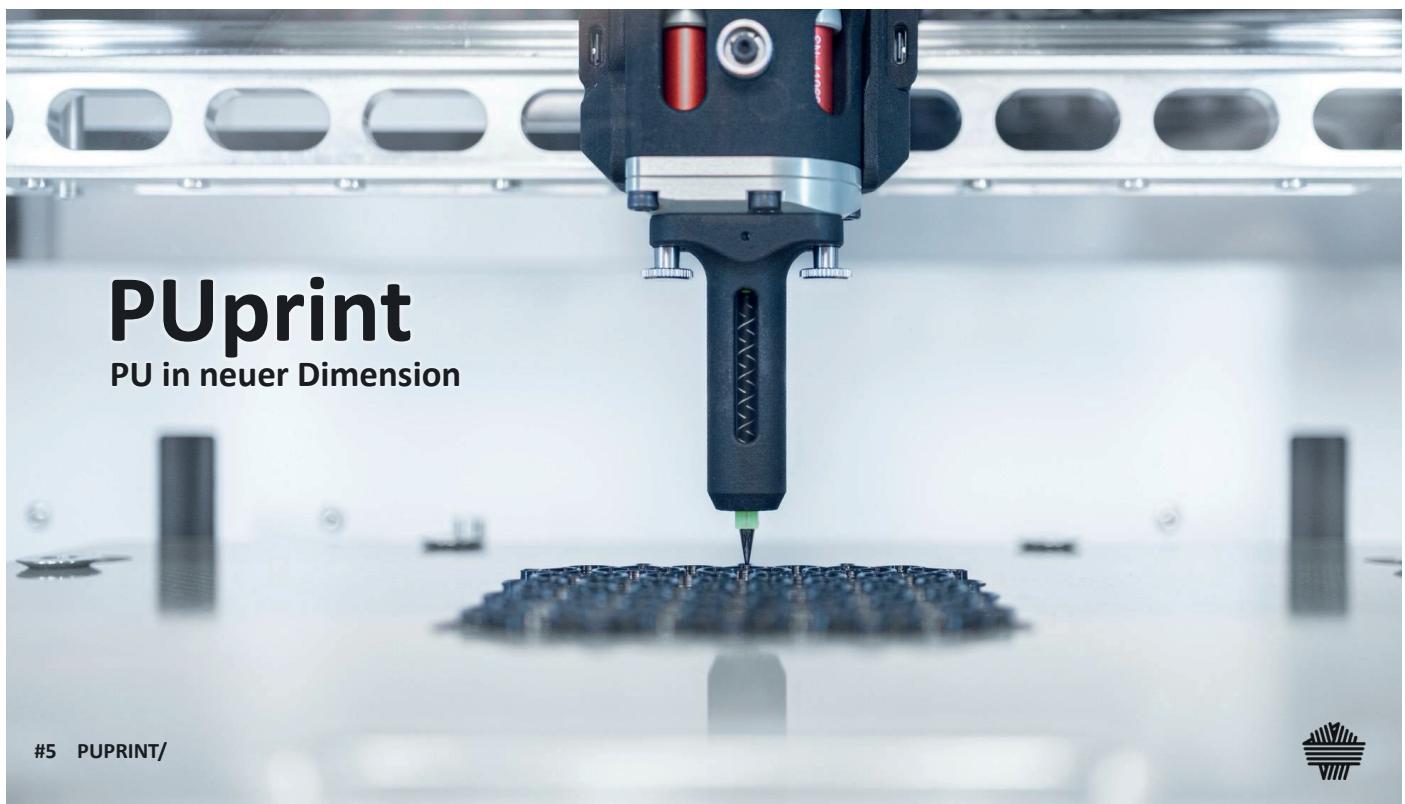


© SYNTHENE SAS / 26. November 2015

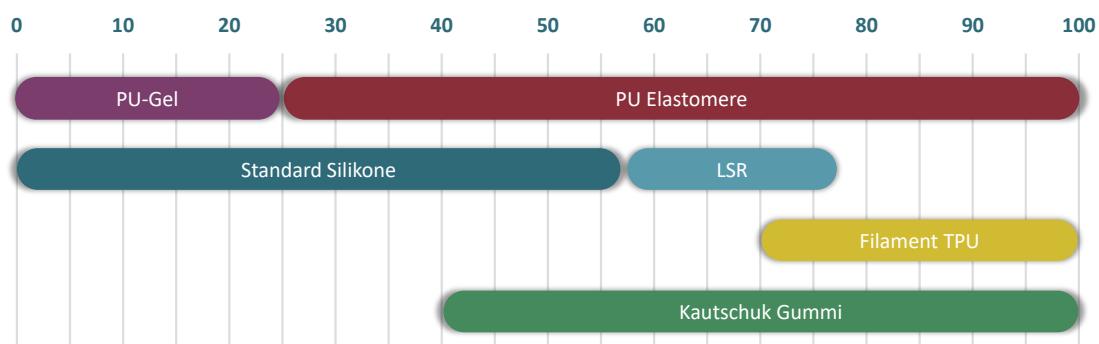


### #4 SYNTHENE/ QUALITÄT & FLEXIBILITÄT





© SYNTIENE S.A./ 26. November 2015



#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



© SYNTHENE S.A.S./26. November 2025



Entwickelt in enger Zusammenarbeit mit Lynxter garantiert optimale Performance.

## #7 PUPRINT/ ÜBERSICHT



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



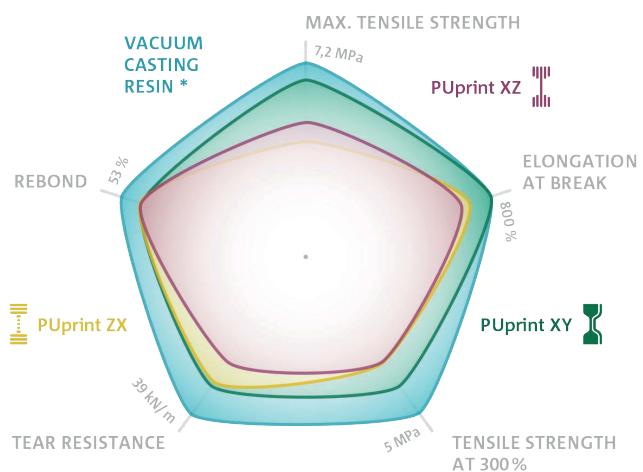
© SYNTHENE S.A.S./26. November 2025



## #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





#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**



#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](mailto:aen@synthene.com)



#13 SYNTHENE/ KONTAKT



# 3D-Druck in der Praxis

## Chancen, Grenzen und Erkenntnisse aus dem Mittelstand

### Agenda

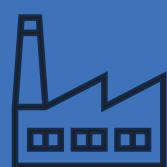
- Vorstellung / Perspektive
- Chancen des 3D-Drucks im Mittelstand
- Grenzen & Herausforderungen
- Erkenntnisse aus der Praxis
- Ausblick & Potenziale

# Vorstellung / Perspektive

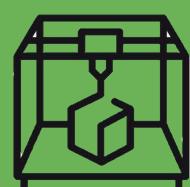
## Vorstellung



- 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

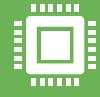
Kürzere Entwicklungszyklen durch kurze Lieferzeiten: Besonders für Start-ups oder innovative Mittelständler wichtig oder Sondermaschinenbau



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“

- Maschinenuzuverlässigkeit: 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 Probefeld: 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!



Marcus Geßner  
0341 23 18 37 25  
[marcus.gessner@rapidobject.com](mailto:marcus.gessner@rapidobject.com)  
Rapidobject GmbH, Weißenfelser Str. 84  
04229 Leipzig

- [www.rapidobject.com](http://www.rapidobject.com)
- [www.linkedin.com/company/rapidobject-gmbh](http://www.linkedin.com/company/rapidobject-gmbh)
- [www.xing.com/companies/rapidobjectgmbh](http://www.xing.com/companies/rapidobjectgmbh)
- [www.youtube.com/rapidobject](http://www.youtube.com/rapidobject)
- [www.facebook.com/Rapidobject](http://www.facebook.com/Rapidobject)

# BACKUP

# **Innovative Polymer-AM: Von Hochleistung bis Mikropräzision**



HOCHSCHULE | TTZ OBERFRANKEN  
COBURG | Digitale Intelligenz in Lichtenfels

# Optimierung der Materialeigenschaften für 3D gedruckte polymere Spritzgusswerkzeuge

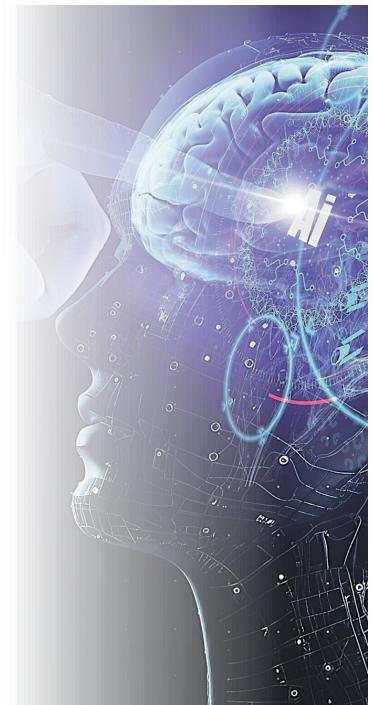
Valentin Wiesner,

Markus Stark, Alexander Rost, Marcel Trier, Kai Graß

Bayerisches Staatsministerium für  
Wissenschaft und Kunst



**FADZ**  
Zweckverband  
Stadt und Landkreis Lichtenfels



HOCHSCHULE | TTZ OBERFRANKEN  
COBURG | 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



**HOCHSCHULE | TTZ OBERFRANKEN  
COBURG**  
Digitale Intelligenz in Lichtenfels

# Zielsetzung

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

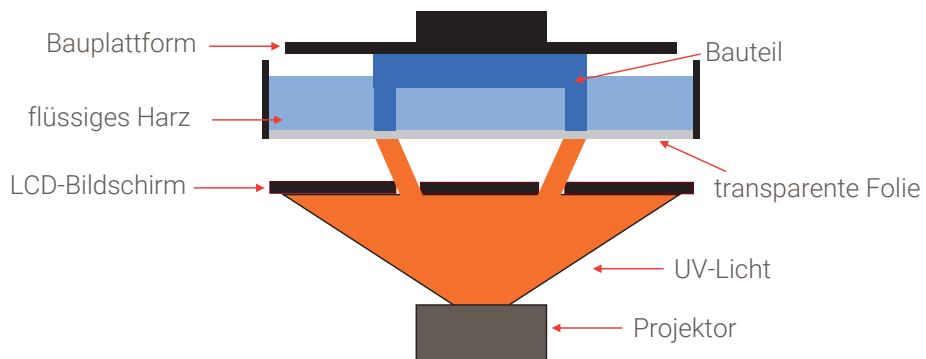


**HOCHSCHULE | TTZ OBERFRANKEN  
COBURG**  
Digitale Intelligenz in Lichtenfels

4

# Technologievorstellung - Verfahren

## Masked Stereolithografie (MSLA/LCD)



schematische Darstellung des MSLA-Verfahrens



[www.kunststoff.de]

5



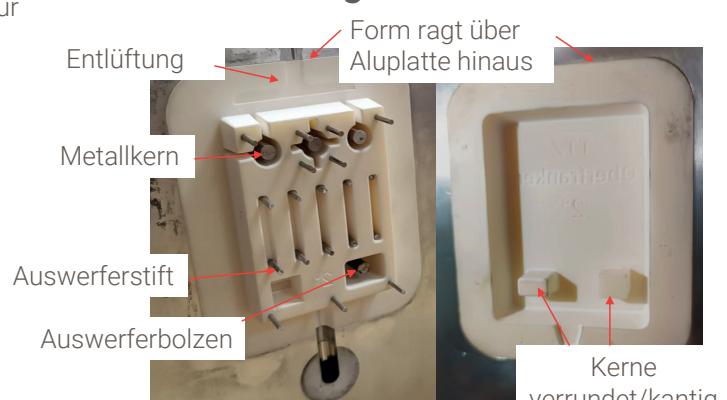
# Technologievorstellung - Testgeometrie

## Testbauteil



Bauteiltestgeometrie  
mit 2° Entformungsschräge

## Werkzeugeinsatz



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

6

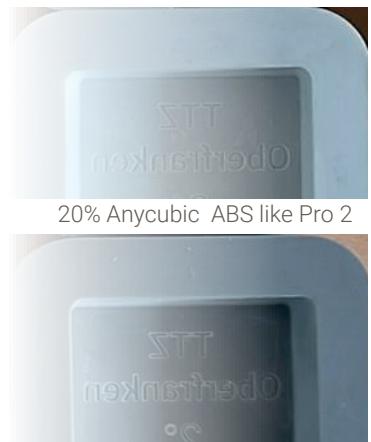


# Versuchsaufbau - Harzqualifizierung

## Untersuchte Harze

Material	Materialkennwerte				Druck- und Nachbearbeitungsparameter						
	Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	Zug-E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung in %	HDT in °C @ 0,45 MPa	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	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	

100% BASF RG 3280



20% Anycubic ABS like Pro 2

30% Loctite IND 147



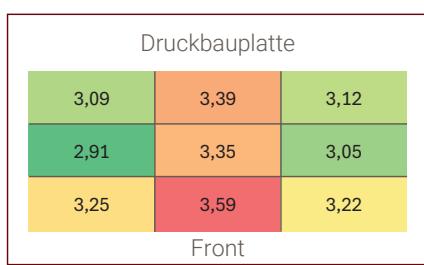
7

[1,2,3]

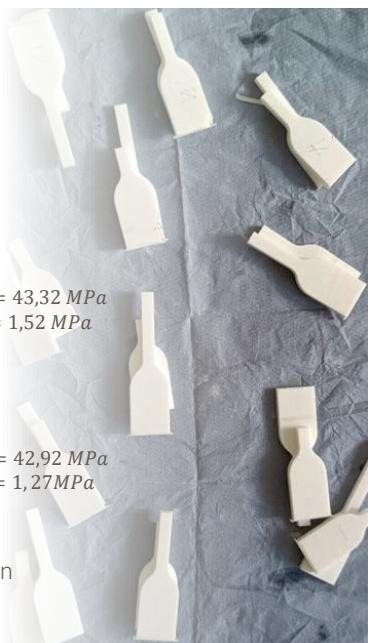
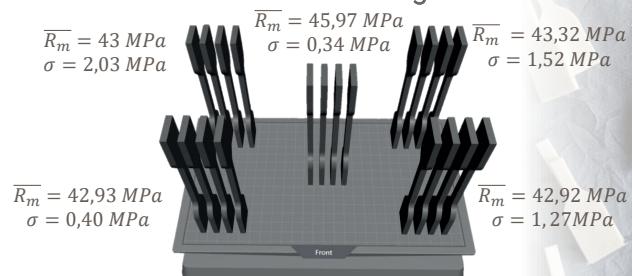
# Versuchsaufbau - Druckprozessqualifizierung

## Qualifizierung MSLA-Drucker: ELEGOO Saturn 4 Ultra 16K

### Schritt 1: UV-Messungen



### Schritt 2: Validierungsdruck



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

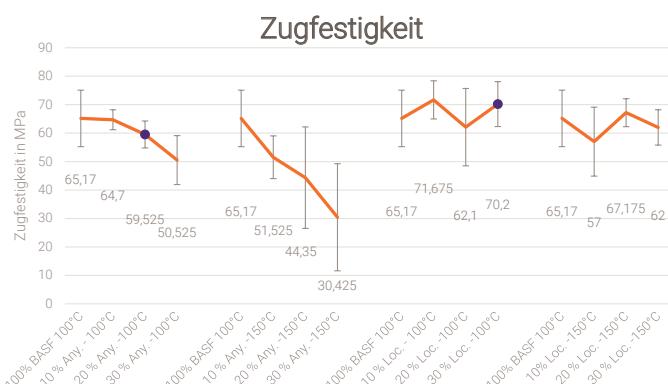
$$t_{gemisch} = 0.2t_{Any} + (1 - 0.2)t_{BASF}$$



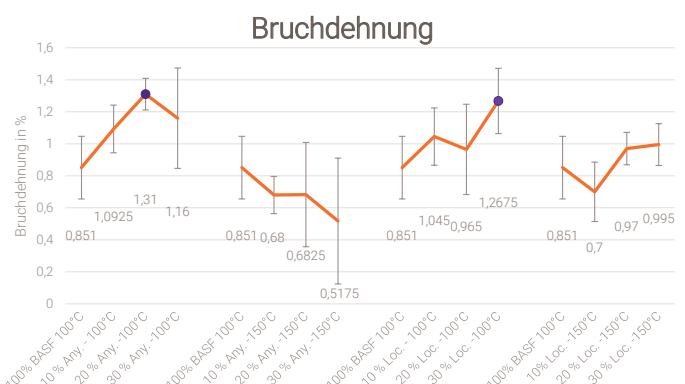
9

## 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



Gesamte Zykluszeit = Zykluszeit im Werkzeug + Kühlzeit mit offenem Werkzeug

11



Spritzgussmaschine  
ergotech 25/280-120system



## 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 Kernausbruch 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: 3Dimensionsal, (o.D.), „Forward AM Ultracur3D RG 3280 Resin ceramic filled (BASF)“, [Online], Verfügbar unter: [https://www.3dimensionsal.de/bASF-ultracur3d-rg-rg-3280-resin-ceramic-filled-3317#attribute\\_values=17,2440,1569,1093,1040,1186,2454,2562](https://www.3dimensionsal.de/bASF-ultracur3d-rg-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](http://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 Materialen 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



[7]

### 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 Biegefesteitgkeit/-steifigkeit

# Ziele der Untersuchung

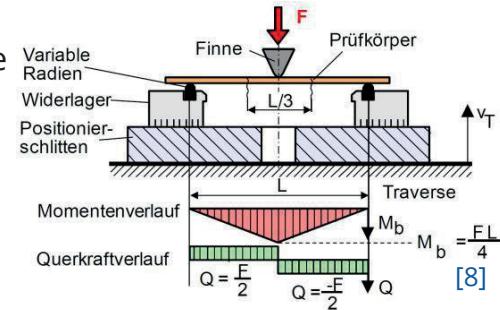
- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von FLM-Polycarbonat-Bauteilen durch UD-Tape-Verstärkung

## Teilziele:

- Experimentelle Untersuchung  
Zugversuch      3-Pkt.-Biegeversuche



[8]



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

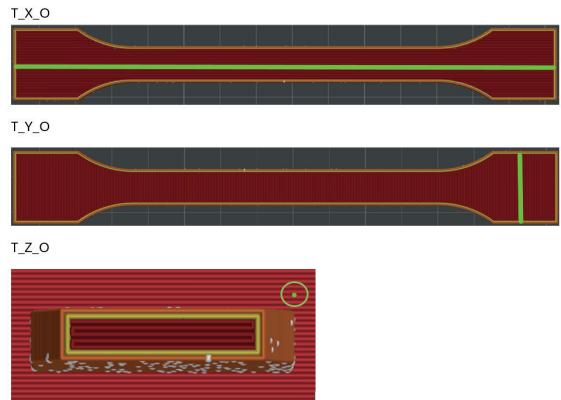
- Unverstärkt (nur PC)
- Verstärkt (PC + UD-Tape an Oberfläche)

## 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

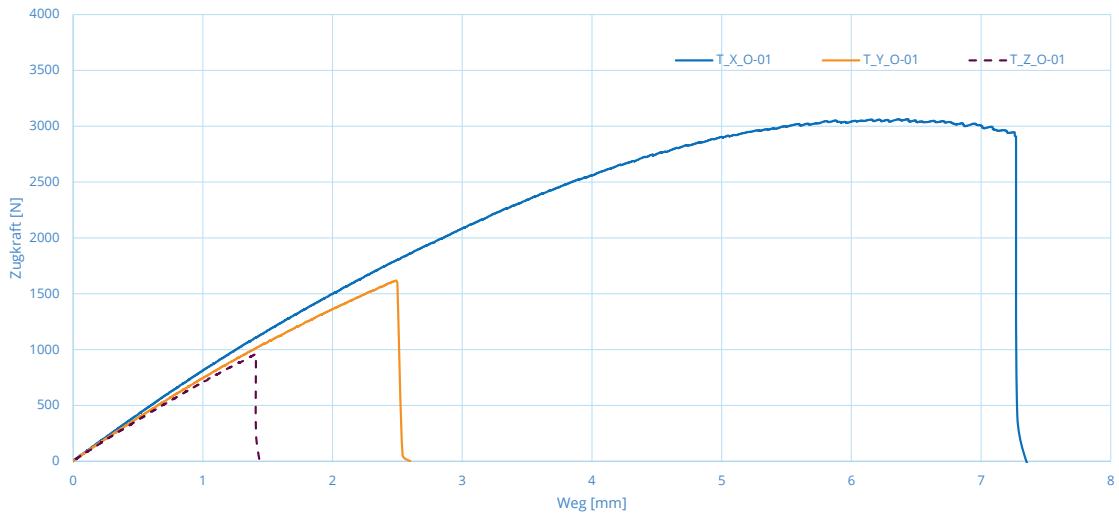
## Randbedingungen:

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

## Versagensmodell:

- Hashin-Kriterium: Faserbruch, Matrixversagen, Schubversagen

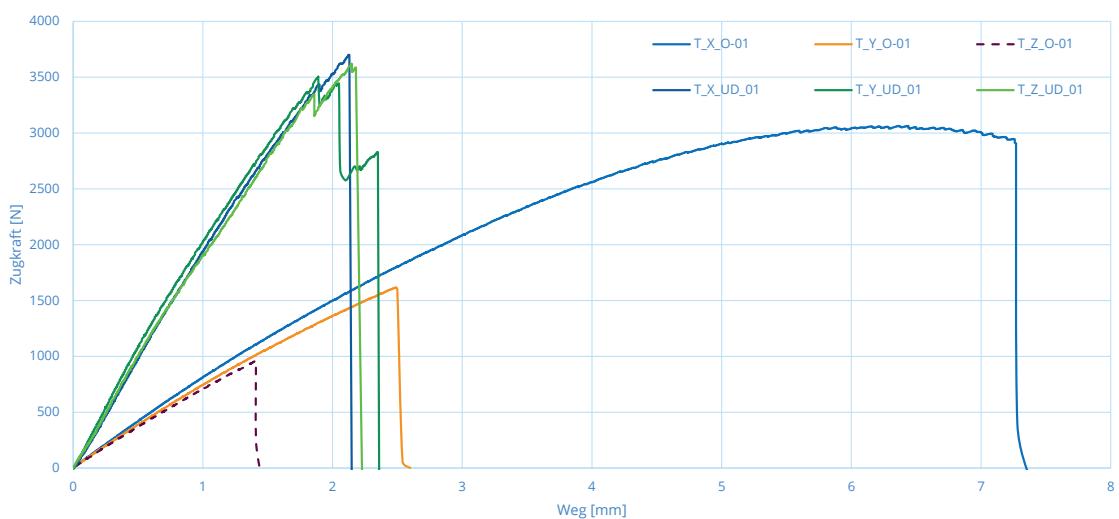
# Ergebnisse Zugversuch



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

Professur Intelligente Maschinensysteme  
Fakultät Ingenieurwissenschaften | HOCHSCHULE  
MITTWEIDA

# Ergebnisse Zugversuch



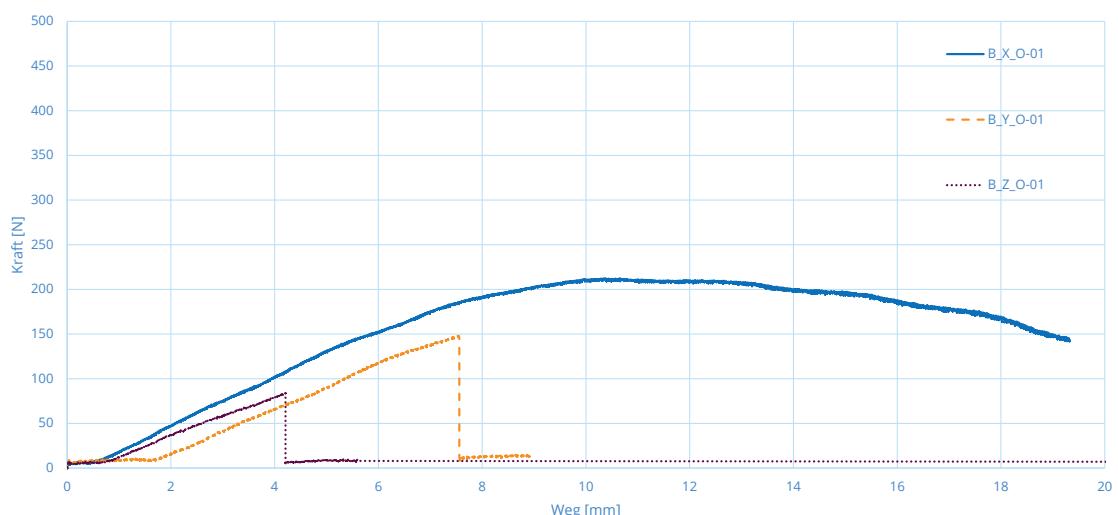
12 12. Mitteldeutsches Forum - 3D-Druck in der Anwendung | Dr.-Ing. Hagen Bankwitz  
(C) 29.10.2025 Hochschule Mittweida

Professur Intelligente Maschinensysteme  
Fakultät Ingenieurwissenschaften | HOCHSCHULE  
MITTWEIDA

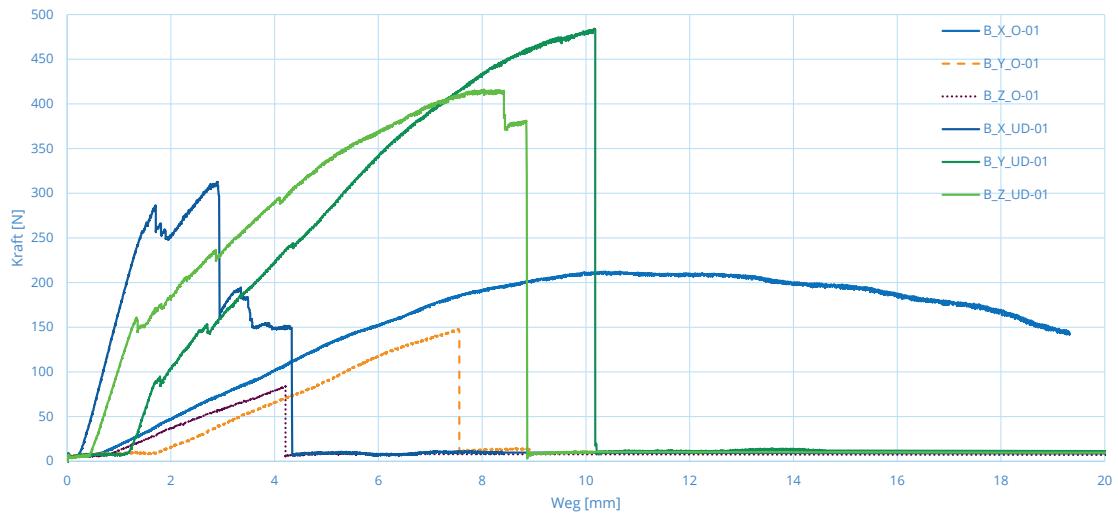
# Ergebnisse Zugversuch: Mechanische Kennwerte

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



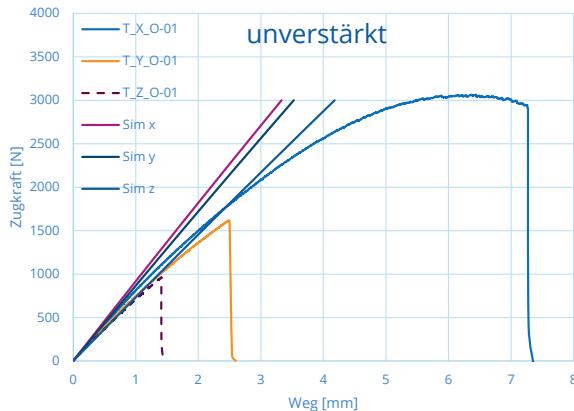
# Ergebnisse 3-Punkt-Biegeversuch



## Ergebnisse 3-Punkt-Biegeversuch: Mechanische Kennwerte

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

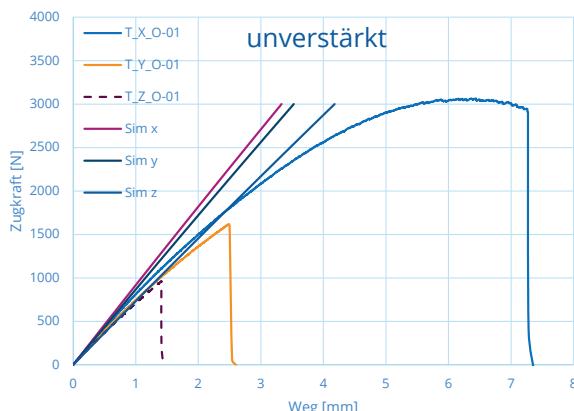
# Vergleich Simulation und Experiment: Zugversuch



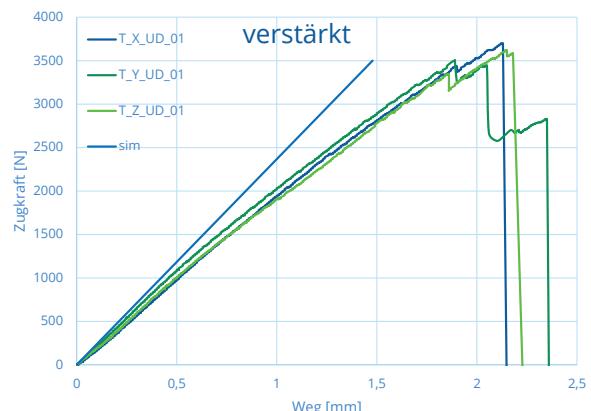
Eigenschaft	Simulation/ Datenblatt	Messungen
Zugfestigkeit x [MPa]	62,7	76,9±0,3
Zugfestigkeit y [MPa]	62,7	43,0±5,0
Zugfestigkeit z [MPa]	41,9	22,0±4,7

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

# Vergleich Simulation und Experiment: Zugversuch



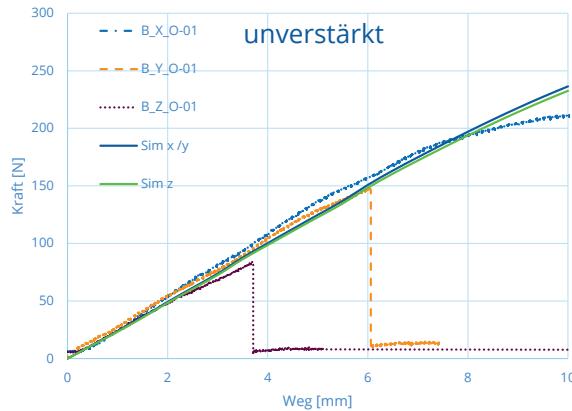
Eigenschaft	Simulation/ Datenblatt	Messungen
Zugfestigkeit x [MPa]	62,7	76,9±0,3
Zugfestigkeit y [MPa]	62,7	43,0±5,0
Zugfestigkeit z [MPa]	41,9	22,0±4,7



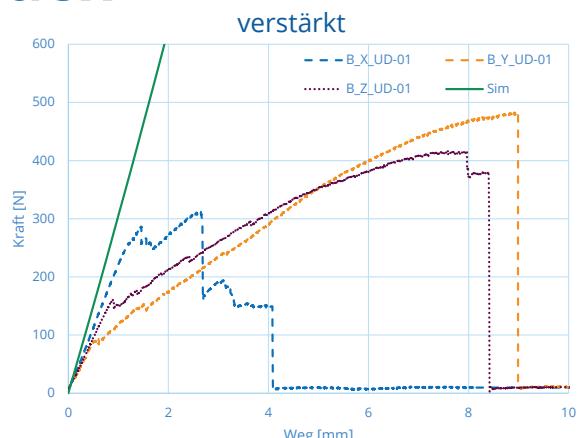
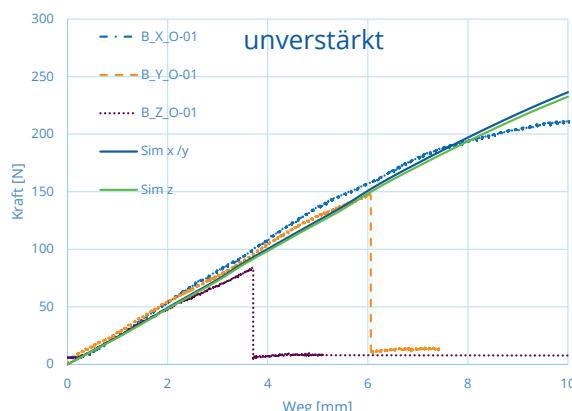
- Hashin-Kriterium ergab einen Sicherheitsfaktor von 1,11 bei einer Zugkraft von 3500N
- Dominierendes Versagen: Faserbruch

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

# Vergleich Simulation und Experiment: Dreipunkt-Biegeversuch



# Vergleich Simulation und Experiment: Dreipunkt-Biegeversuch



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

# 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

# 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



# 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](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](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](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](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 Hauffe (M.Sc.)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter –  
Bereich Polymerchemie HTWD

15.10.2025

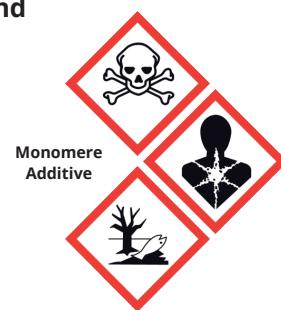


## Mikroplastik in der Umwelt

### Was ist Mikroplastik?

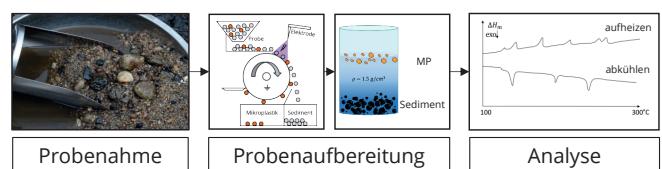


### Warum ist es umwelt- und gesundheitsgefährlich?



[https://wir-für-recyclat.de/muellmeer-mehr-muell/](https://wir-fuer-recyclat.de/muellmeer-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

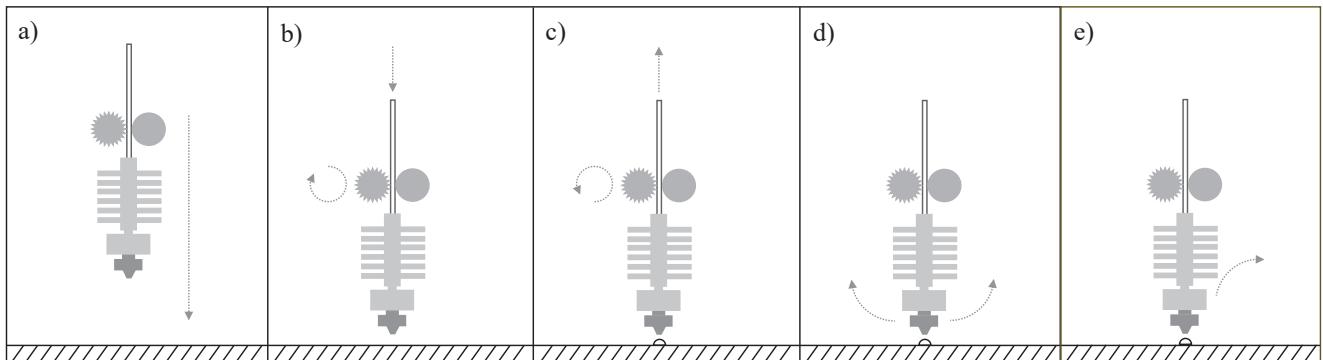
- Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffen weltweit wachsend
- 2 Mio. Tonnen/Jahr in 1950 → **414 Mio. Tonnen/Jahr** in 2023
- davon landen etwa 1,5 – 2,0 % als Müll in der Umwelt → **Mikroplastik (MP)**



## Referenzmaterialien für die MP-Analytik (Stand d. Technik)

Eigenschaften/ Anforderungen	Kryogenes Mahlen + Siebfaktionierung	Direktsynthese durch Emulsionspolymerisation/ Präzipitation	Additive Fertigung durch Mikroextrusion
<b>Partikelform</b>	unregelmäßige Fragmente	sphärische Partikel	halbkugelförmig, verschiedene Formen denkbar
<b>Weitere benötigte Hilfsmittel und -stoffe</b>	flüssiger Stickstoff, Kryomühle, Siebe	Labor + Abzug, Lösungsmittel, Filter	modifizierter 3D-Drucker
<b>Partikelgröße und Größenverteilung</b>	50 – 5000 µm; breite Partikelgrößenverteilung, Eingrenzung durch Siebung	< 20 µm; engverteilte bis monodisperse Partikelgrößenfraktion	100 – 5000 µm; spezifische monodisperse Partikelgröße
<b>exakte Partikelanzahl herstellbar?</b>	nein	nein	ja
<b>Bandbreite möglicher Polymere</b>	fast alle Polymere (schlechtere Verarbeitung, um so niedriger der Glasübergang)	auf einige wenige beschränkt	fast alle Polymere

# Herstellungsverfahren



## Herausforderungen:

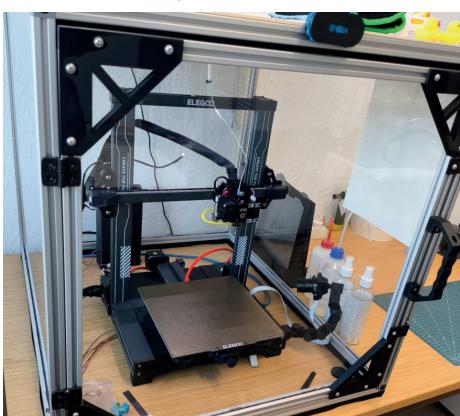
- Stringing an den Partikeln
- wiederholgenaue Extrusionsmenge
- verstopfende Düsen

## 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

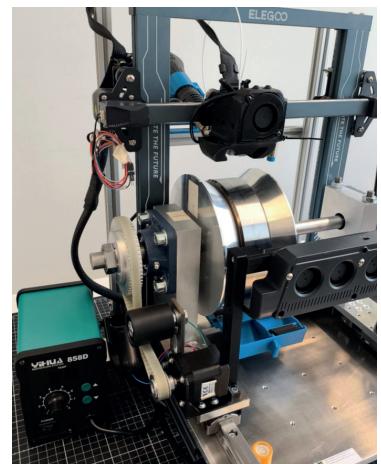


## # 02 – Renkforce RF 10000



## # 03 – Umgebauter Elegoo Neptune 4 Pro mit Rolle

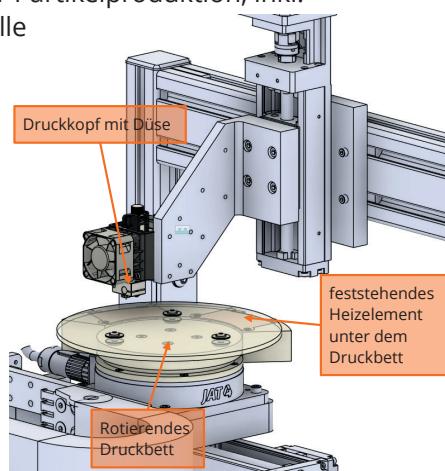
- für kontinuierliche Partikelproduktion (1000 Partikel/h)



- diskontinuierliche Partikelproduktion auf Druckbett (ca. 7000 Partikel/Platte)
- Produktion von etwa 1000 – 5000 Partikel/h

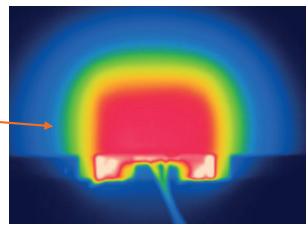
## Drucksysteme - #04 - JAT-Demonstrator für präzise Fertigung

- 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:  $\pm 10 \mu\text{m}$
- Positionierauflösung:  $0,02236 \mu\text{m}$  (x-, y-Achse);  $0,045776 \mu\text{m}$  (z-Achse)
- Wiederholgenauigkeit:  $3 \mu\text{m}$
- Servomotoren mit Absolutencodern



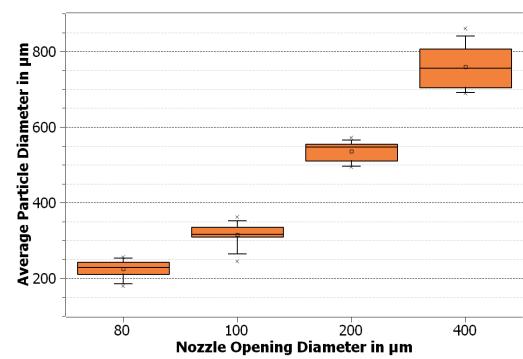
Temperaturfeld der Heizzone auf der Glasdruckplatte

**HTW**D 15.10.2025 Additive Fertigung von Mikroplastik-Referenzpartikel / HTWD / Maurice Hauffe

7

## Ergebnisse – Polymertypen und Partikelgrößen

Düsen-durch-messer in $\mu\text{m}$	Polymer mit Angabe der Partikelgröße in $\mu\text{m}$ (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:  $150 \mu\text{m}$

**HTW**D 15.10.2025 Additive Fertigung von Mikroplastik-Referenzpartikel / HTWD / Maurice Hauffe

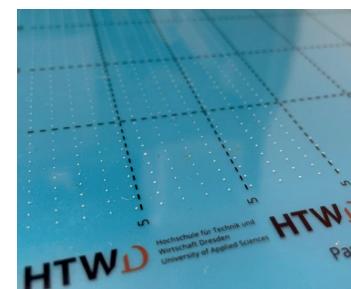
8

# Ergebnisse – Partikeleigenschaften

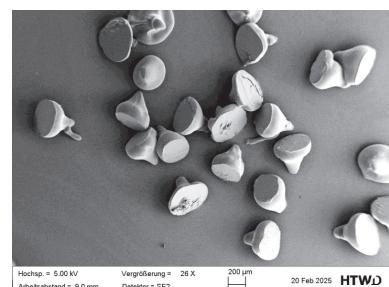
- Anzahlgenaue Produktion von Partikeln
- Druck auf verschiedene Substrate möglich
- Morphologie der Partikel: halbrund bis tropfenförmig
- Herstellung von Partikeln aus allen thermoplastischen Kunststoffen möglich



Additiv gefertigte Referenzpartikel, produziert mit einer 400 µm Düse a) einzelner LDPE-Partikel; b) exakt 1000 LDPE Partikel, c) einzelner Partikel aus PMMA



PA6/6.6 Partikel auf einer zuschneidbaren Folie (auch wasserlöslich möglich)



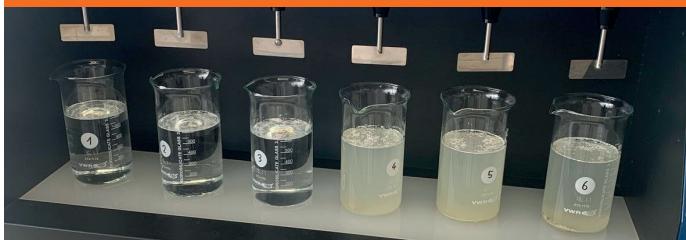
Rasterelektronenaufnahme von tropfenförmigen LDPE-Partikeln, produziert mit 200 µm-Düse (26-fache Vergrößerung)

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



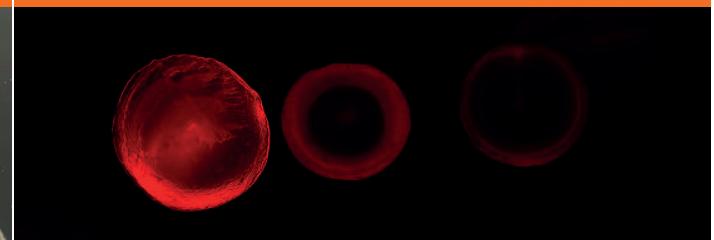
### Wechselwirkung von MP und Pflanzenwurzeln



### 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 Partikelfraktionen
- 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	Yellow	Green	Green	Green	Green	Orange	Orange	Green	Green
	600±90									
	300±45	Yellow								Yellow
	150±25	Yellow								Yellow
	≤ 100	Orange	Orange							Orange
	≤ 10									
Erfolgreich hergestellt		Machbarkeit nachgewiesen		Mögliches weiteres Forschungsziel		in Prüfung zur Machbarkeit				

**Vielen Dank!**

**HTWD**

Hochschule für Technik und  
Wirtschaft Dresden  
University of Applied Sciences



Infos und Kontakt:

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<sup>a</sup>, D. Linke<sup>a</sup>, J. Bliedtner<sup>a</sup>, W. Liao<sup>b</sup>, C. Zhang<sup>b</sup>, G. Notni<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

<sup>b</sup>Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

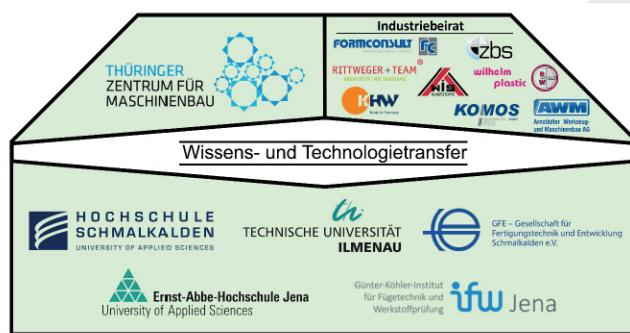
23.10.2025



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



## 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

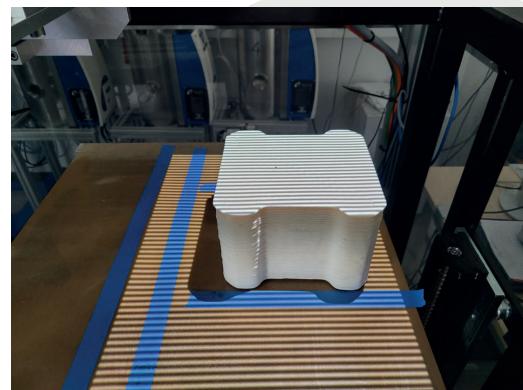


Abb. 1: Streifenprojektion zur Detektion der Schichtinformationen

23.10.2025



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU



Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmalkalde e.V.



ifw Jena



Ernst-Abbe-Hochschule Jena  
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE  
SCHMALKALDEN  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## 1. Grundlagen Materialextrusionsverfahren

Additive Fertigung mittels Materialextrusion (MEX) nach DIN EN ISO 52900

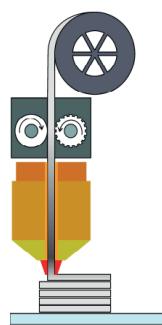


Abb. 2: Grundprinzip der  
Filamentextrusion  
[Gonzalez-Gutierrez et al.]

Filament-basiert	Granulat-basiert
<b>Verfahrensprinzip</b>	
Strangablageverfahren mittels Extrusion thermisch plastifizierten Materials	
<b>Materialförderung</b>	
direkt, Filament als Kolben	indirekt, mittels Förderschnecke
<b>Düsendurchmesser</b>	
$\approx 0,4 - 1,0 \text{ mm}$	$\approx 1,0 - 6,0 \text{ mm}$
<b>Materialaustragsraten</b>	
$\approx 0,01 \text{ kg/h}$	$\approx 0,5 - 6,5 \text{ kg/h}$

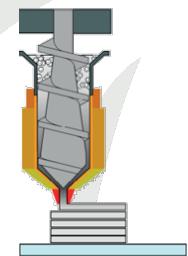


Abb. 3: Grundprinzip der  
Granulatextrusion  
[Gonzalez-Gutierrez et al.]

23.10.2025



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU



Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmalkalde e.V.



ifw Jena



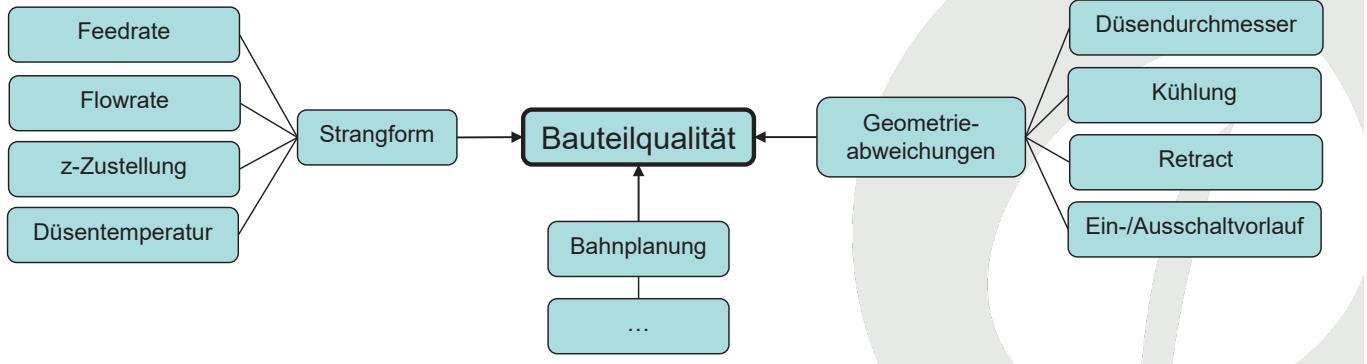
Ernst-Abbe-Hochschule Jena  
University of Applied Sciences



HOCHSCHULE  
SCHMALKALDEN  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## 2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren

ausgewählte Prozessparameter als Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität

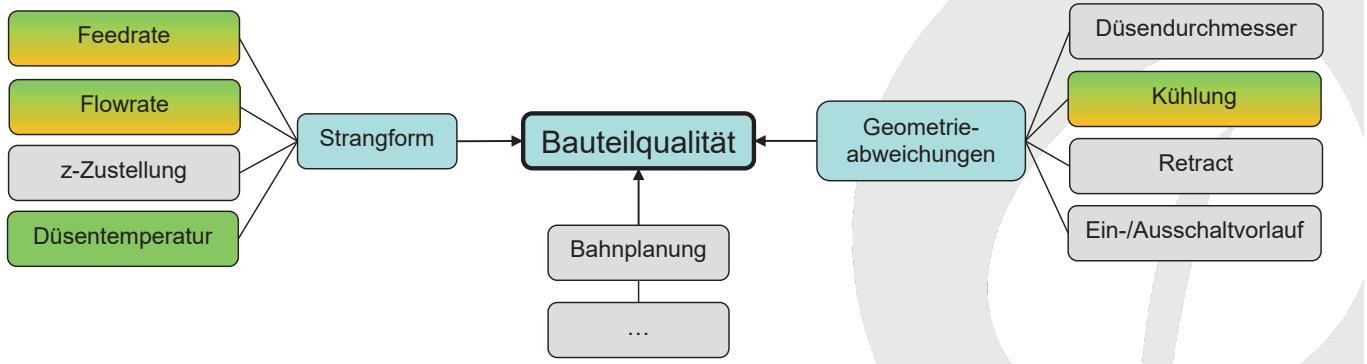


23.10.2025



## 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

## 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

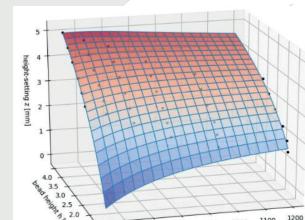


Abb. 10: Prozessmodell nach [Layher et al.]

live einstellbar:

23.10.2025

## 2. Prozessfehler beim Materialextrusionsverfahren

- **Warping** (-> Haftvermittler)
- **Wärmestau** (-> Kühlung)
- **Delamination** (-> Kühlung)

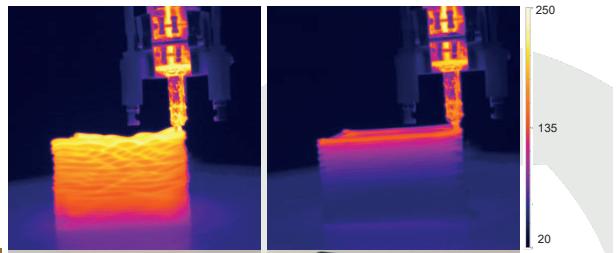


Abb. 11: Warping

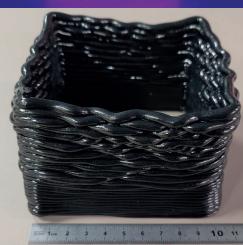


Abb. 12: Wärmestau



Abb. 13: Delamination

live einstellbar: ●

23.10.2025



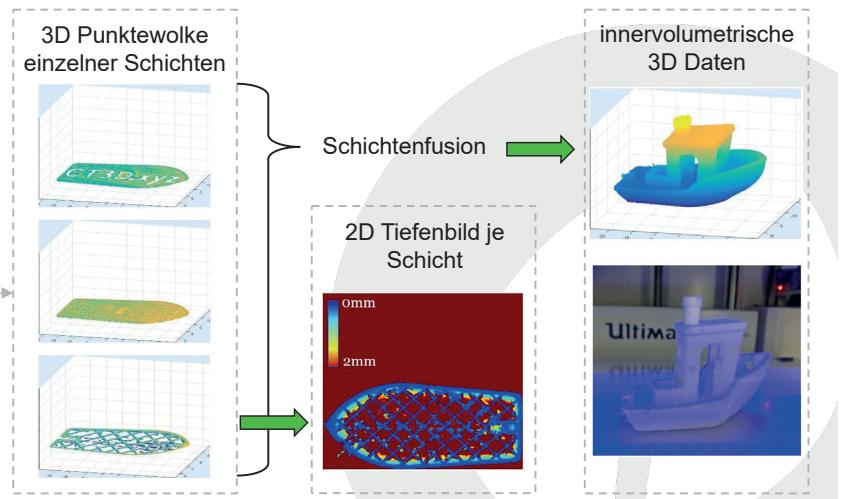
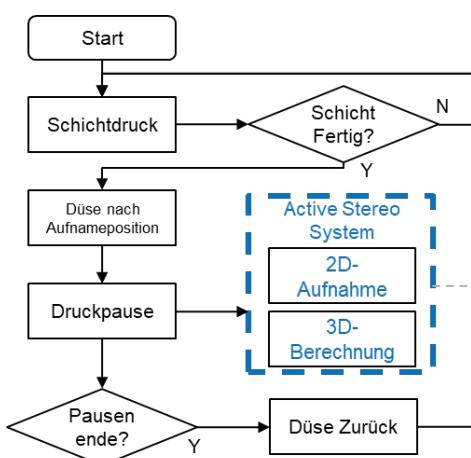
Kofinanziert von der  
Europäischen Union



LEGELOOG  
Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmalkalde e.V.



## 3. Grundlagen der optischen Schichtüberwachung



23.10.2025



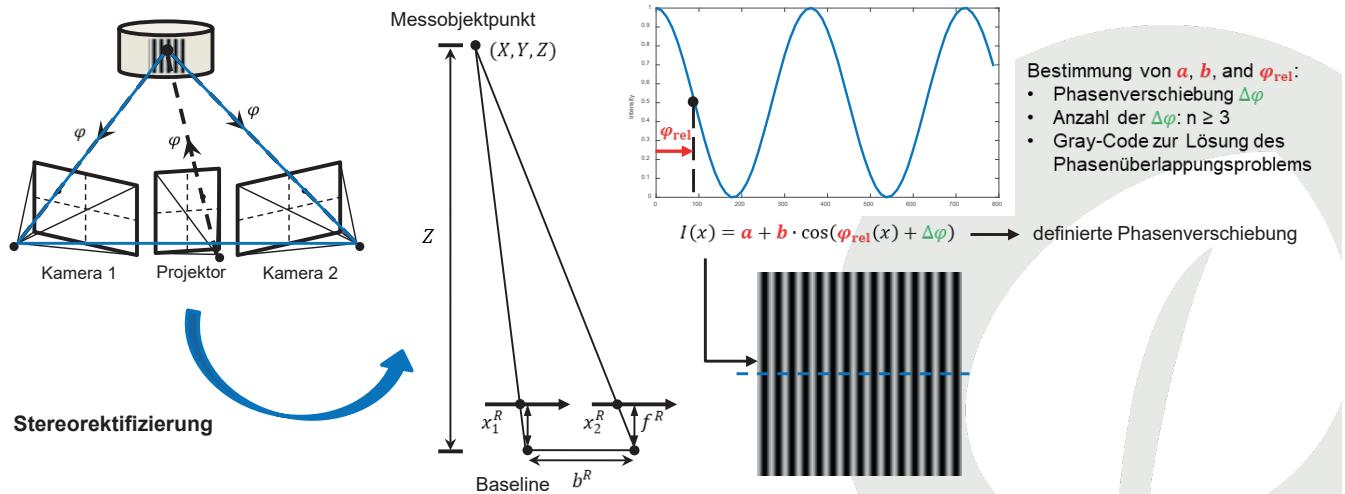
Kofinanziert von der  
Europäischen Union



LEGELOOG  
Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmalkalde e.V.



### 3. Grundlagen der optischen Schichtüberwachung



23.10.2025



### 3. Grundlagen der optischen Schichtüberwachung

- geometrische Merkmale wie 3D-Form und Geometriemaße
- Oberflächengüte
- innere Struktur



### Schichtinformationen durch 3D innenvolumetrische Bildinformationen

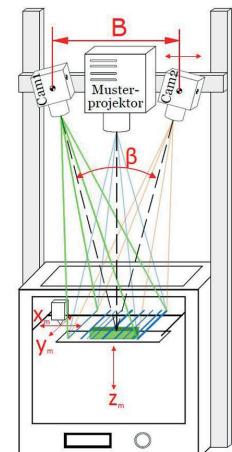
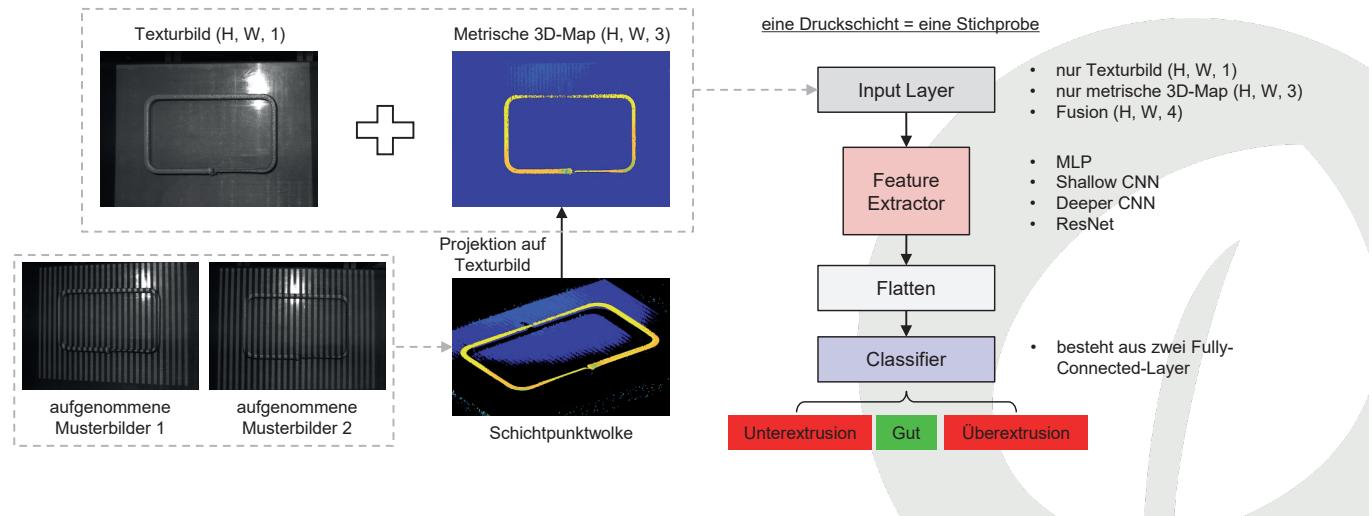


Abb. 14: Proof-of-Concept Aufbau im TUI Labor [Preißler]

23.10.2025



#### 4. KI-basierte Klassifizierung von Prozessfehlern



23.10.2025



#### 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

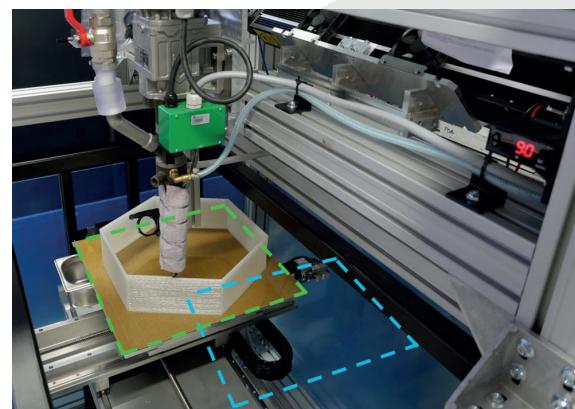


Abb. 15: schichtweise Aufnahme der Geometrie; Bauposition; ● Fotoposition ●

23.10.2025



## 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



LEGELOOG  
Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmaka e.V.



## 7. Ergebnisdiskussion

### Bewertungsmetriken

#### 1. Level - Fehlerdetektion

$$\begin{aligned} \text{Precision} &= \frac{TP}{TP+FP} \\ \text{Recall} &= \frac{TP}{TP+FN} \\ \text{Specificity} &= \frac{TN}{TN+FP} \\ \text{F1score} &= 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \end{aligned}$$

TP : True Positive  
TN : True Negative  
FP : False Positive  
FN : False Negative

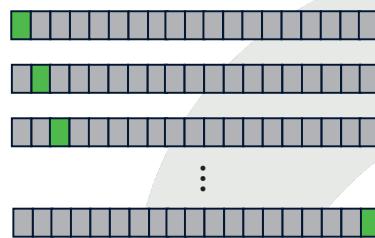
Gut Fehler

#### 2. Level - Dreiklassenklassifikation

- Accuracy
- Confusion Matrix

Unterextrusion Gut Überextrusion

### Leave-one-layer-out Validation



Test

Train

- für alle 97 Schichten; jeweils 96 zum Training und 1 zum Testen.
- dies wird 97-mal gemacht, um die finalen Metriken zu berechnen.
- die Vorgehensweise entspricht eher realen Anwendungsszenarien.

23.10.2025



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



LEGELOOG  
Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmaka e.V.



## 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 outperform die Verwendung einer einzelnen Bildmodalität als Input.
- tiefere, komplexe Netzerke extrahieren die physikalischen Informationen eindeutig besser.

23.10.2025



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU

Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmelzschicht e.V.

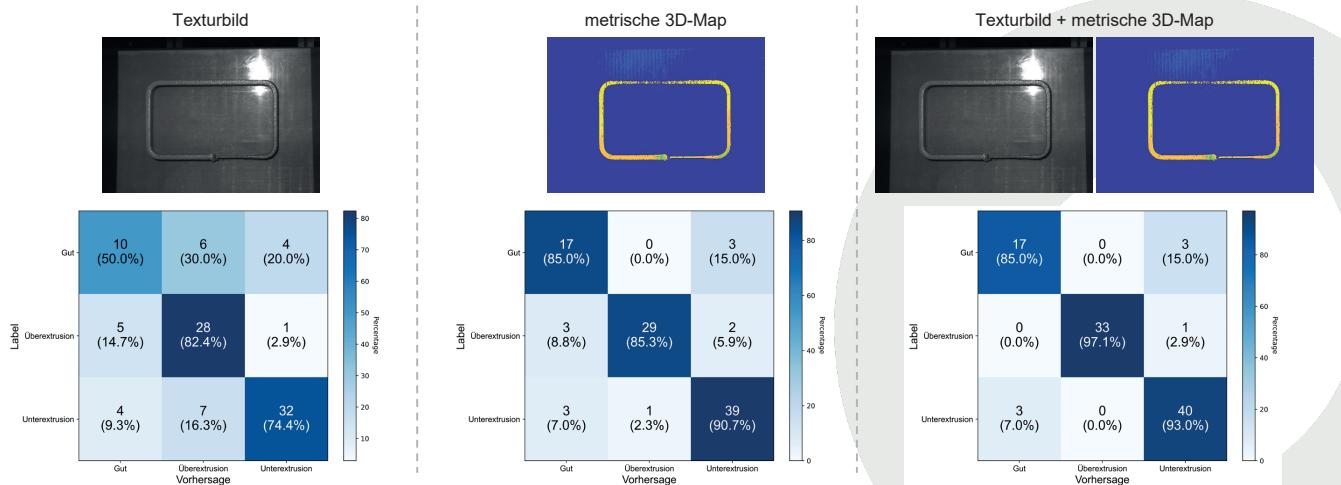
**ifw** Jena

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



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU

Gesellschaft für  
Fertigungstechnik und Entwick-  
lung Schmelzschicht e.V.

**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 Punktewolke 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



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

23.10.2025



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



## Literatur



**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

23.10.2025



# Gamechanger 3D-Druck

Aber wie sieht das mit der Qualität aus?

## Kurzvorstellung

### Amador Miano

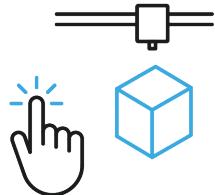
Dipl. Ing-Maschinenbau

Über 25 Jahre im Mittelstand und Großunternehmen aktiv

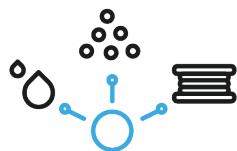
Und letztendlich in einem Startup gelandet ☺



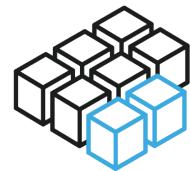
## 3D-Druck: längst mehr als Nischentechnologie



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
- Gleicht 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

- komplexe Teile
- klein- und mittelvolumig
- kleine und mittlere Losgrößen
- Alternative für Guss- und Spritzgussteile
- Kunststoffe, Metalle, Harze

Verfügbarkeit



Technische  
Einsatzgrenzen

- Normteile
- einfache Dreh- und Frästeile
- ehem. Blechteile
- Schmiedeteile
- großvolumige Gussteile

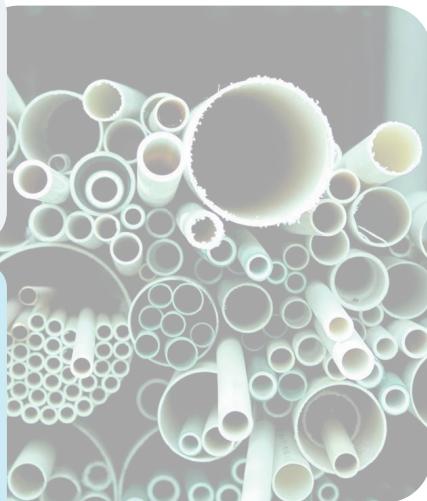
## Technologie- und Materialauswahl (1)

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

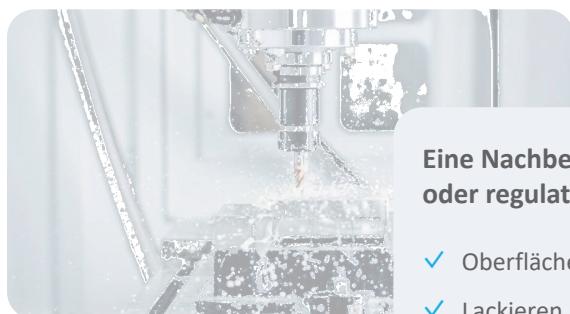


### Werkstoffe im 3D-Druck

- Keine Normen und Regelwerke
- Lieferantenspezifische Kennwerte
- teilweise fehlende Langzeiterfahrungen
- technologische Einschränkungen

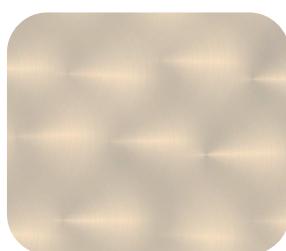


## Post-Processing: fertig erst, wenn's passt!

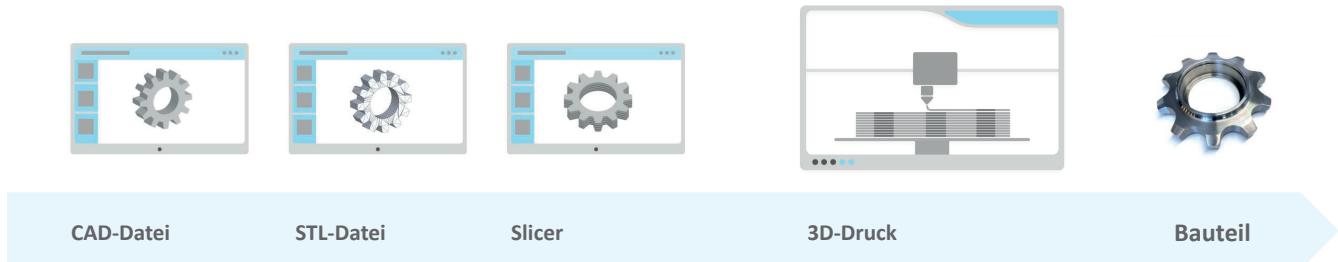


Eine Nachbearbeitung ist oft erforderlich, um technische, optische oder regulatorische Anforderungen zu erfüllen:

- ✓ Oberflächenbehandlung (Strahlen, chem. Glätten, Schleifen...)
- ✓ Lackieren und Beschichten
- ✓ Mechanische Nacharbeit (Gewinde, Passungen...)
- ✓ Sonstiges (Wärmebehandlung, Sterilisation, Infiltration...)



## Teile einfach auf Knopfdruck? Es ist etwas komplizierter...



CAD-Datei

STL-Datei

Slicer

3D-Druck

Bauteil

- Auflösung
- Detailschärfe

- Schichthöhen /-dicken
- Geschwindigkeit
- Füllung, Stützstrukturen
- ...

- Druckparameter
- Materialeigenschaften
- Gerätespezifische Besonderheiten
- ...

## Vorsicht bei Spot-Plattformen

STP hochladen &  
Anforderungen definieren

STP

[www.einkaufsplattform-3d-druck.de](http://www.einkaufsplattform-3d-druck.de)

3D-Modell hochladen  
Format: .stp, .stl, .step

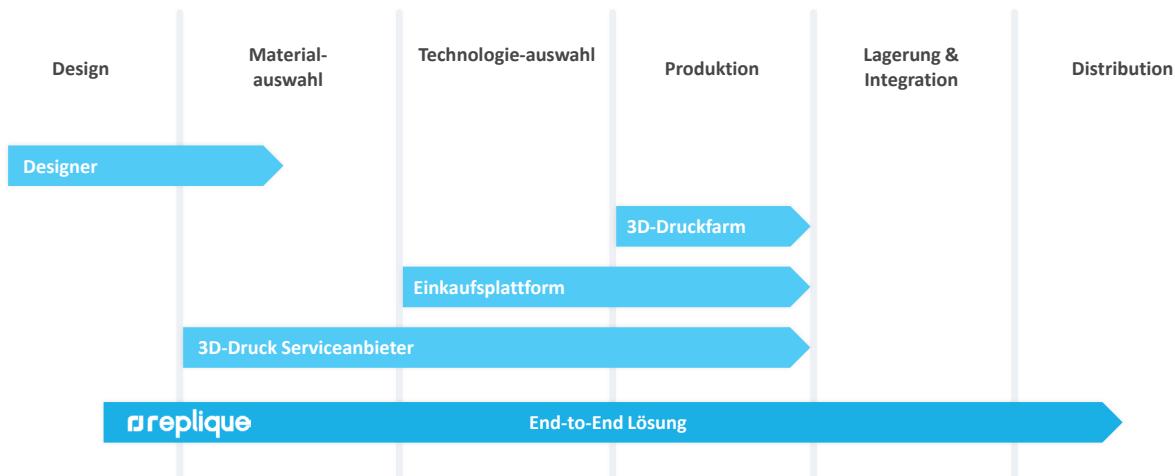
Zeichnung hochladen  
Format: .pdf, .dxf, .dwg, .tif

Sofortangebot erhalten  
Teil bestellen

### Was ist mit:

- Beratung hinsichtlich optimaler Technologie/Material??
- Qualifikation des Lieferanten?
- Gewährleistungsansprüchen?
- Datensicherheit?

## Replique ermöglicht End-to-End Zugang zu 3D-Druck



## Zusammenfassung

- 3D-Druck ist für bestimmte Anwendungen eine hervorragende Alternative zu traditionellen Fertigungsmethoden
- 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  $h$ .

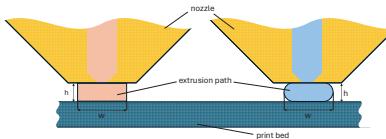


Abbildung 1: Modelle der Extrudatquerschnittsfläche (links: Rechteck, rechts: abgerundetes Rechteck)

Daraus ergibt sich für den abgegebenen Volumenstrom  $Q_{out} = v_{head} \cdot A_{ext}$  und für die Annahme eines abgerundeten Rechtecks als Querschnittsfläche:

$$\begin{aligned} Q_{out} &= v_{head} \cdot \left[ \frac{\pi}{4} h^2 + h \cdot (w - h) \right] & (1) \\ &= A_{fil} \cdot v_f \end{aligned}$$

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.

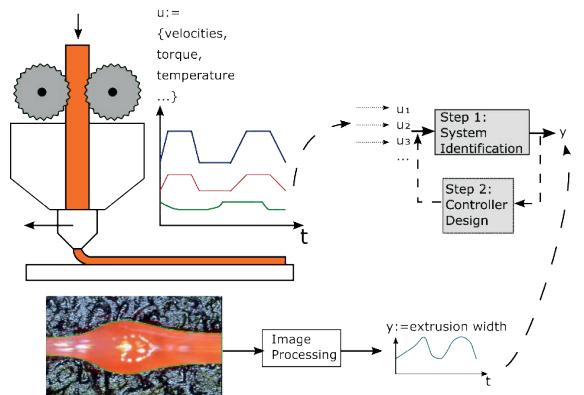


Abbildung 2: Methodikübersicht zur Systemidentifikation und Reglerentwurf für den Extrusionsbasierten 3D-Druck

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 Aufnahmorts 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  $Q_{out}$ .

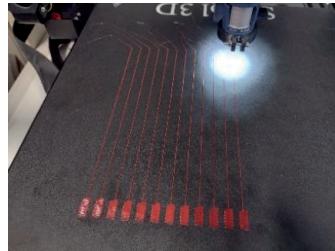


Abbildung 3: Versuchsaufbau

## 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 Bettneivellierungsfunktion. Dabei scannt ein Abstandssensor die Druckfläche und ermittelt Schieflage 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 ca  $\pm 7\mu\text{m}$  in 95% der Tests und ist somit hinreichend genau.

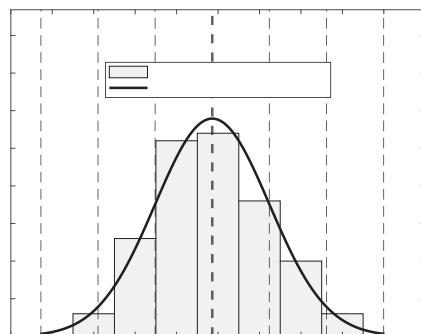


Abbildung 4: Statistische Auswertung der Abtastgenauigkeit des Abstandssensors

## 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 100 $\mu$ m 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.

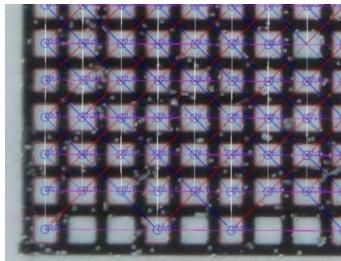


Abbildung 5: Kalibermuster und detektierte Objektpunkte

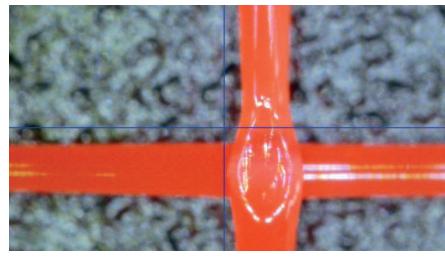


Abbildung 6: Referenzierung der Kamera im Koordinatensystem des 3D-Druckers

## 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 Binärmasken 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

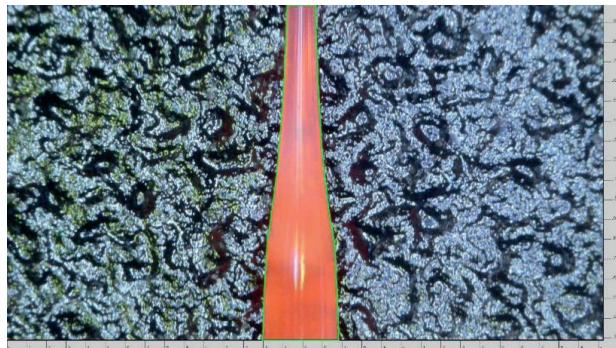


Abbildung 8: Segmentiertes Extrudat und Zuordnung im Koordinatensystem des 3D-Druckers

## 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 Triebards (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 Triebards 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 gefitett, wobei in Abhängigkeit vom Beschleunigungsvorzeichen jeweils ein eigener Parametersatz ( $K, T_1, T_2$ ) ermittelt wurde, um den nichtlinearen Charakter des Systems abzubilden.

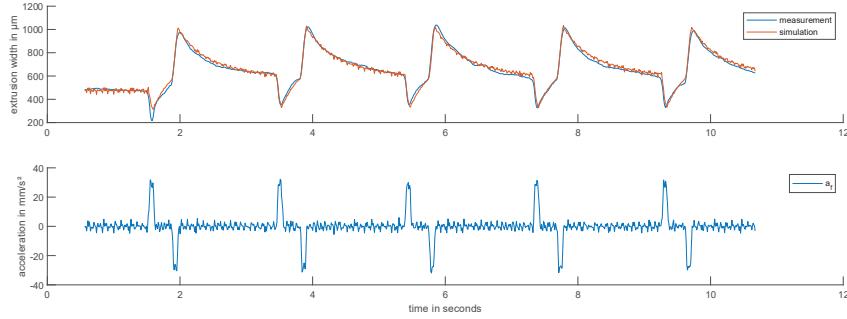


Abbildung 9: Transientenverhalten des Extruders

## 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 Gütfunktion 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.

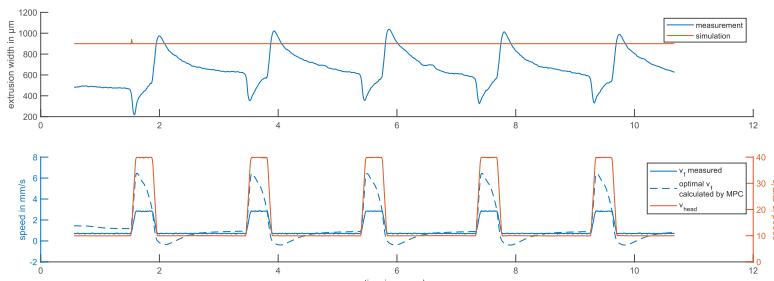


Abbildung 10: Ermitteltes Geschwindigkeitsprofil für variierende Druckkopfgeschwindigkeit

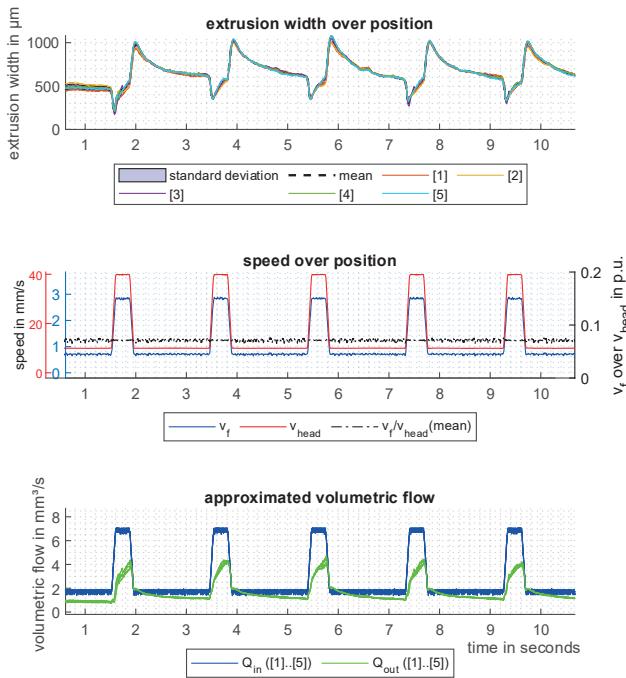


Abbildung 11: Messergebnisse für ein Geschwindigkeitssprungexperiment und einer Soll-Extrusionsbreite von 900 µm

## 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 sechsachsen 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 CO<sub>2</sub> 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 sachte 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.

Galloppi 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<sup>1\*</sup>, Carsten Schulz<sup>2</sup>, Jörg Bagdahn<sup>3</sup>**

<sup>1\*</sup> Hochschule Anhalt University of Applied Sciences ; [sebastian.gersch@hs-anhalt.de](mailto:sebastian.gersch@hs-anhalt.de)

<sup>2</sup> Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg ; [carsten.schulz@oth-regensburg.de](mailto:carsten.schulz@oth-regensburg.de)

<sup>3</sup> Hochschule Anhalt University of Applied Sciences ; [joerg.bagdahn@hs-anhalt.de](mailto:joerg.bagdahn@hs-anhalt.de)

\* Korrespondenz-Autor: [sebastian.gersch@hs-anhalt.de](mailto: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 erwies 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 Strukturauteile 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 Scanvektorlänge 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 Freischliff 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

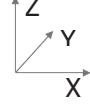
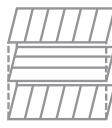
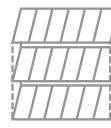
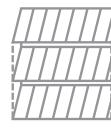
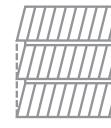
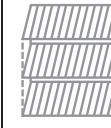
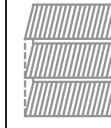
Als Werkstoff wurde AlSi10Mg-Pulver mit Partikelgrößenverteilung 20 - 63 µm der Firma EOS verwendet. [11] Die Proben wurden auf einer LPBF-Anlage des Typs SLM 280 HL (Nikon SLM Solutions) unter Argonatmosphäre gefertigt (Restsauerstoff < 4ppm). Die Schichtdicke betrug 30 µm. Der Volumenschmelzprozess 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	Orthogonal	Parallel				
	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 × 10 mm × 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.

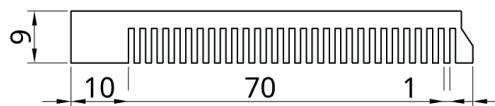


Abbildung 1: Bemaßung der Cantilevergeometrie (Tiefe = 10mm) [5]

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.

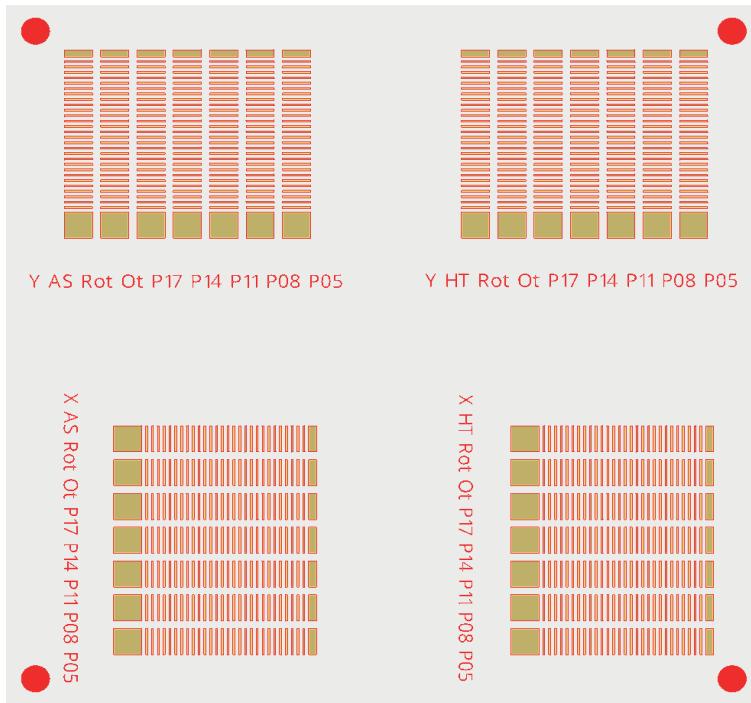


Abbildung 2: Schematische Anordnung der Cantilever auf der Bauplatte mit X- und Y-Orientierung. Draufsicht auf Fertigungsebene (X-Y) mit „as-build-Setup“ links und „HT-Setup“ rechts

### 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  $285\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) für 120 min ( $\pm 15$  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 Freischmitt 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 Freischmitt 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  $\Delta z$ .



Abbildung 3: Schematische Darstellung  $\Delta z$  und Messpunkt nach Trennung des Cantilever links [5]; Foto der Cantilever nach dem Freischmitt: 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  $\Delta z$  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.

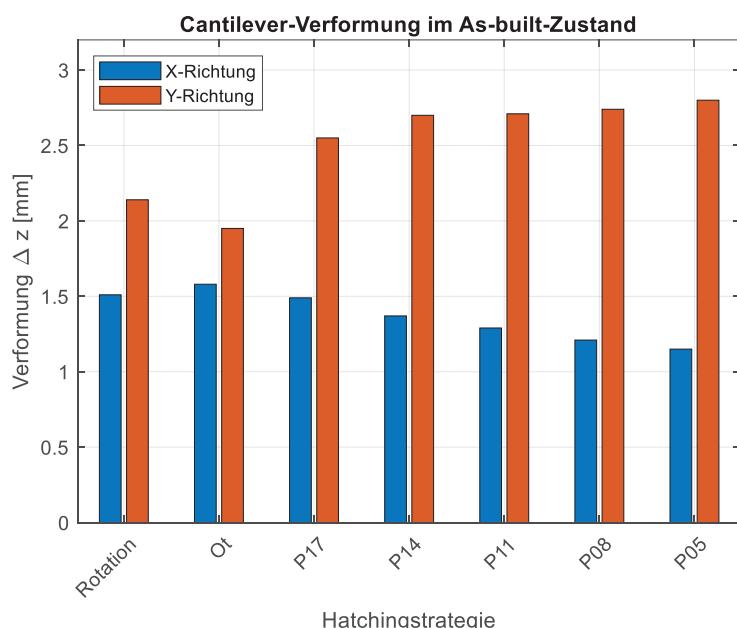


Abbildung 4: Balkendiagramm der Verformungen  $\Delta z$  im as-built-Zustand für alle Strategien, dargestellt für X- und Y-Orientierung

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  $\approx 81\%$ )
- P05, Y: 2,80 mm → 0,95 mm (Reduktion um  $\approx 66\%$ )
- OT, X: 1,58 mm → 0,71 mm (Reduktion um  $\approx 55\%$ )
- OT, Y: 1,95 mm → 0,87 mm (Reduktion um  $\approx 55\%$ )

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 %.

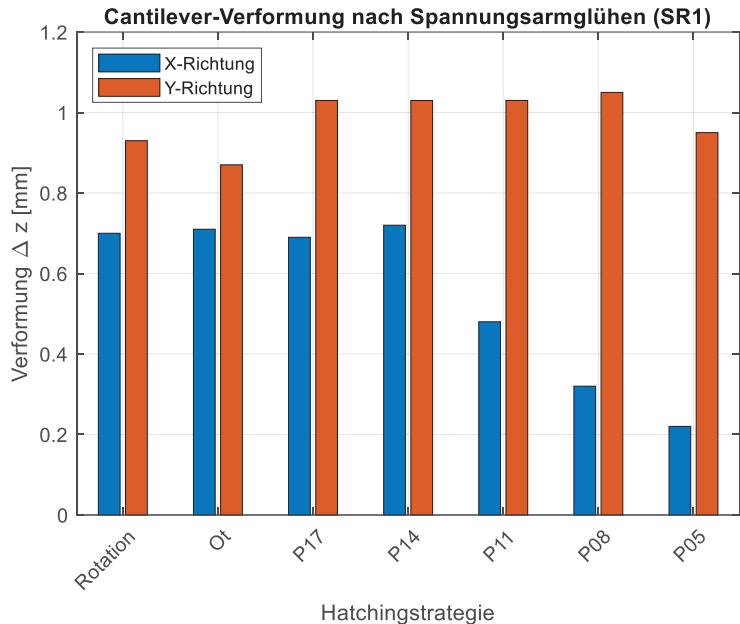


Abbildung 5: Balkendiagramm der Versätze  $\Delta z$  nach Spannungsarmglühen (HT) für alle Strategien, X- und Y-Orientierung.

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 Scanvektorlänge, 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 metamatials 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. Sufiarov, „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. Strantza, 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 Zielerlementen, Polystyrol und andere petrochemische Materialien genutzt, um die gewünschten Requisiten herzustellen. Gleichzeitig gibt es in der Branche eine große Motivation nachhaltigere 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 (Schleifstäbe, 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 Holzpuver hinsichtlich Zusammensetzung (Holzarten) sowie Partikelgrößenverteilung und -formen variiert.

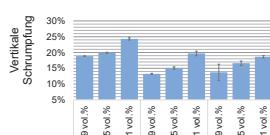
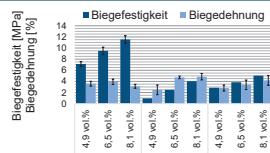


### Lösungsansätze

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 vorhersehbare 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, Culmina® und Zelluloseleim erprobt und verglichen.

### Binderauswahl

- Drei bio-basierte Binder zeigen sich als vielversprechend: Alginat, Culmina® und Zell-Leim (Zelluloseleim)
  - Mechanische Eigenschaften und Schrumpfungsverhalten 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 je drei Hohlzylindern (ø = 46 mm, h = 64 mm) gemessen
  - Zell-Leim zeigt geringste Rissbildung
- ➔ Kompromiss zwischen zulässiger Schrumpfung und erforderlicher Festigkeit notwendig



### Prozesskette

#### Slicing

- Nach Möglichkeit keine Deckflächen zur besseren Trocknung
- 5 Randschichten und 40 % Infill (Grid)
- Kompensation 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 µm
- 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



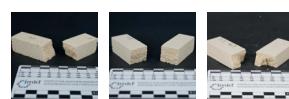
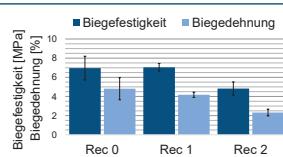
#### Nachbearbeitung

- 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 Plangeschliffen. Anschließend werden die Segmente miteinander verleitet und nachmodelliert (Risse kaschiert, Details nachgearbeitet).



### Recyclingfähigkeit

- Gleichbleibende Materialqualität als Schlüsselleigenschaft für Kreislaufähnlichkeit
- 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 getester 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

### 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

# Untersuchungen zur Pulverrheologie 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

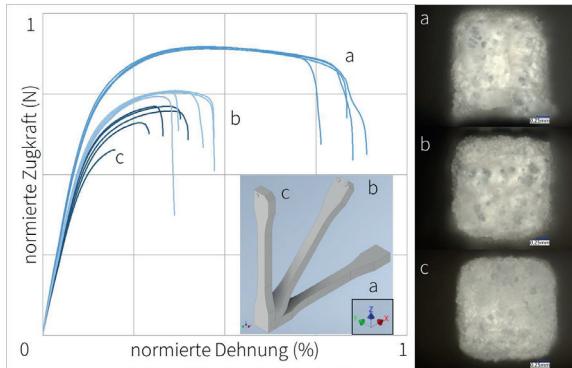


Abb. 1: Zugkurven für Hantelproben aus Druckjob 1 in drei unterschiedlichen Ausrichtungen (links), Mikroskopie der Bruchflächen (rechts)

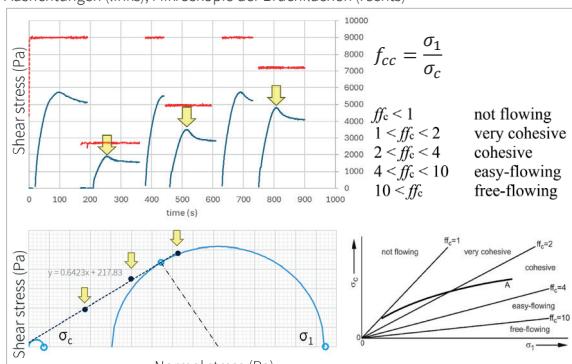


Abb. 2: Messung der Fließfähigkeit der Pulver durch Pulver-Scherversuche (oben links), zur Bestimmung u. a. des Fließorts (unten links) und der Fließfähigkeit (rechts)

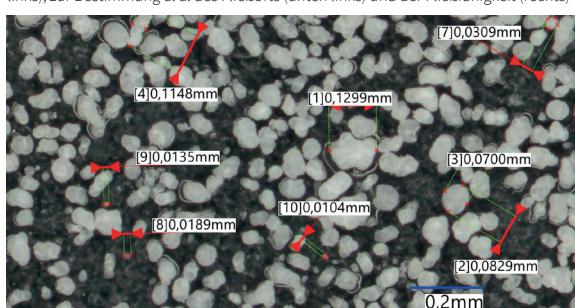


Abb. 3: PA12-Pulver, fixiert auf Klebeband, von welchem zuvor überschüssiges Pulver mit einem zweiten Klebeband entfernt wurde, 200fache-Vergrößerung

**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 Z2020 mit 200N-Kraftmessdose) in Anlehnung an ISO 527-1 und 2 geprüft. Die Pulverproben wurden mit einem Rheometer (Anton Paar, MCR) mit Pulverscherzelle und Temperiereinheit untersucht. Durch die Ermittlung von Fließort, Druckfestigkeit  $\sigma_c$  und Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  wurde die Fließfähigkeit  $f_{fc}$  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-Agglymerate 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

# 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 Verfahr- 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.

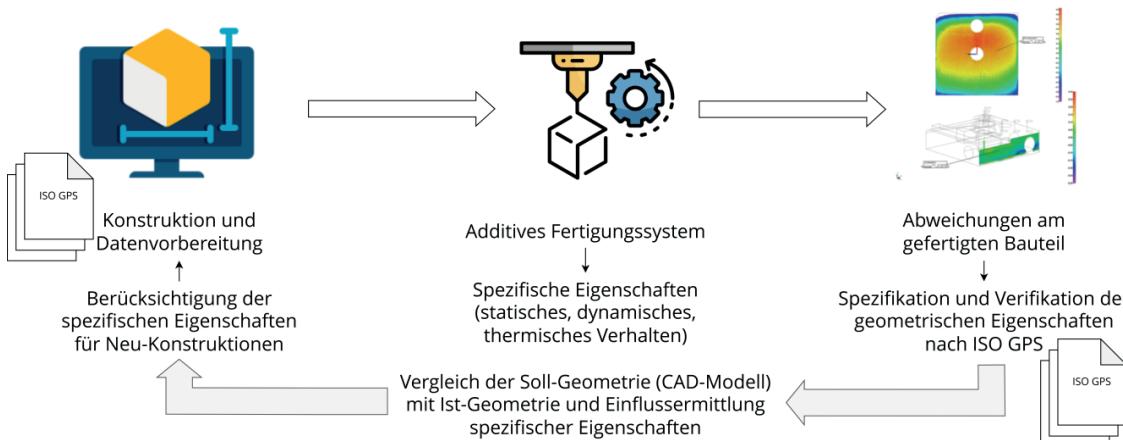


Abb. 1: Definition der systemspezifischen Eigenschaften mittels ISO GPS