



4. MITTELDEUTSCHES FORUM 3D-DRUCK IN DER ANWENDUNG

TAGUNGSBAND

Impressum

Herausgeber:

Hochschule Merseburg
Eberhard-Leibnitz-Straße 2, 06217 Merseburg

Ausgabe:

Erstellt für das 4. Mitteldeutsche Forum „3D-Druck in der Anwendung“ am 17.05.2017 an der Hochschule Mittweida

ISBN-Nr. 978-3-942703-72-7

Layout und Erstellung:

Hochschule Mittweida
Referat Forschung
Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Inhalt:

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

Titelbild: Quelle: enficos, Bild ZMS: Norbert Rasch, Hochschule Mittweida

HERZLICH WILLKOMMEN

Die additiv-generativen Verfahren, die früher auch als Rapid Prototyping – Verfahren und heute als 3D Druckverfahren bezeichnet werden, erfahren gegenwärtig einen enormen Aufschwung.

Bei der flexiblen Fertigung von Zahnkäppchen hat sich diese Technik bereits als Serienwerkzeug etabliert. Inzwischen geht die Entwicklung in Richtung Flugzeugbau weiter. Aber insbesondere bei metallischen Werkstoffen sind noch einige Probleme zu lösen, wobei die Entwicklung mittlerweile auch von Global Playern forciert wird, wie man an der Übernahme von Concept Laser GmbH und Arcam AB durch General Electric gesehen hat.

Am Laserinstitut Hochschule Mittweida beschäftigen wir uns seit 2001 erfolgreich mit der Erzeugung von Mikroteilen aus Metall und Keramik. Seit vorigem Jahr haben wir unsere Aktivitäten auf den Makrobereich erweitert. Unsere langfristige Absicht ist insbesondere, die Baugeschwindigkeit der Verfahren signifikant zu erhöhen. Die Hochschule Mittweida und insbesondere unsere Fakultät Ingenieurwissenschaften wird sich zukünftig verstärkt den Herausforderungen zur Vermittlung der Besonderheiten der neuen Technologien an die Studenten stellen.

Wir laden Sie herzlich zum

4. Mitteldeutschen Forum „3D-Druck in der Anwendung“

am 17. Mai 2017 an die Hochschule Mittweida

ein. In einer interessanten Plenarveranstaltung und insgesamt vier Sektionen werden neueste Entwicklungen in den Bereichen metallischer Werkstoffe und Kunststoffe, Folgeverfahren und biomedizinischer Anwendungen dargestellt. Die begleitende Ausstellung verschafft einen Überblick zu regionalen Aktivitäten auf dem innovativen Technologiefeld.

Wir würden uns freuen, wenn Sie unser Angebot nutzen würden, um durch das Forum neueste Informationen zu einer revolutionären Technologie sowie direkten Kontakt zu den Akteuren zu bekommen.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Horst Exner
Direktor Laserinstitut Hochschule Mittweida

Für die Redebeiträge, die Beiträge zur Kooperationsbörse und die Beiträge zum Tagungsband bedanken sich die Organisatoren

- Jens Bliedtner
- Robby Ebert
- Horst Exner
- Günter Ganß
- Dietmar Glatz
- Peter Schulze
- Kathrin Schaper-Thoma
- Bernd Schmidt

Für die freundliche Unterstützung danken die Veranstalter



die zum Gelingen des 4. Mitteldeutschen Forums 3D-Druck in der Anwendung beigetragen hat.

Veranstalter: Laserinstitut Hochschule Mittweida LHM

Partner: Mitteldeutsches Netzwerk Rapid Prototyping enficos
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Hochschule Merseburg
HTWK Leipzig

Plenarveranstaltung

	Seite
Hybridverfahren für Generative Fertigung - Neueste Entwicklungen	11
Elena Lopez, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden	
3D-Drucken von Metall – präzise und schnell – ein Widerspruch?	14
André Streek, Laserinstitut Hochschule Mittweida	
Additive Fertigung für medizinische Anwendungen – die Implantattechnologie der Zukunft	17
Stefan Kaierle, Laser Zentrum Hannover e.V.	

Sektion I: Folgeverfahren

	Seite
Funktionsintegriertes Finishen von 3D-gedruckten Kunststoffbauteilen	21
Jens Bliedtner, Volker Heineck, Patrick Ongom-Along, Ernst-Abbe-Hochschule Jena	
Funktionsintegration mittels Laserstrahlschmelzen – metallischer 3D-Druck für innovative Bauteile und Werkzeuge	32
Bernhard Müller, Thomas Töppel, Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU	
Pastenunterstützte Hybridverfahren – ein Ansatz zur additiven Multimaterialverarbeitung	36
Ines Dani, Richard Kordaß, Martin Jarezki, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Lukas Stepien, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS	
Vakuumgießen von Kunststoffen - das ergänzende Verfahren	50
Günter Ganß, Ingenieurbüro für Kunststofftechnik	

Sektion 2: Biomedizinische Applikationen

	Seite
Untersuchungen zum 3D-Druck von porösen Calciumphosphat-basierten Hybrid-Scaffolds Matthias Schnabelrauch, Innovent e.V.	83
Herausforderungen und Ansätze für die Verarbeitung von Hydrogelen mit generativen Verfahren Johannes Rost, Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.	108
Zwei-Komponenten-Hydrogele mit biologischem Baustein Michael Hacker, Universität Leipzig	117
"Additive Manufacturing meets Biotechnology" - Neue biotechnologische Konzepte durch additive Fertigungsverfahren Felix Krujatz, Thomas Walther, Juliane Steingroewer, Technische Universität Dresden	122

Sektion 3: 3D-Druck von Metall

	Seite
Prozessoptimierung für die generative Fertigung von Mikro-Wärmeübertragern Martin Erler, Stefan Gronau, Laserinstitut Hochschule Mittweida	136
Simulationsgestützte Automatisierung der additiven Fertigungskette Nils Keller, Additive Works GmbH	153
Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen Philipp Klimant, Technische Universität Chemnitz	175
Laserstrahlschmelzprozess – Einflussgrößen und Sensoren für die Überwachung Stefan Szemkus, Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH	192

Sektion 4: Neue Trends der Additiven Fertigung

	Seite
Filigrane Bauteile mittels 3D-Druck - konstruktive Details für ein fertigungsgerechtes Design Hans-Werner Theobald, 3D-Metall Theobald e.K.	204
Verfahrensgrenzen des Arburg Freeformer Franziska Kaut, Procter & Gamble Service GmbH	230
Bauteile so stabil wie Aluminium - einfach 3D gedruckt Joachim Kasemann, Mark3D GmbH	248
Was können preisgünstige 3D-Drucker leisten - eine Übersicht Dietmar Glatz, Hochschule Merseburg	277
Kontaktdaten der Referenten	280
Kooperationsbörse	283

PLENARVERANSTALTUNG

Hybridverfahren für die Generative Fertigung - Neueste Entwicklungen

Elena López

Fraunhofer IWS Dresden

Kurzbiografie Elena López

Geboren in Madrid, Spanien. Studium des Chemieingenieurwesens an der Universidad de Valladolid (Spanien) und Universität Erlangen-Nürnberg. Promotion an der TU-Dresden im Jahr 2014 zum Thema „Plasmaätzen von kristallinen Siliziumsolarzellen mittels Atmosphärendruck-Plasmen“

Als Marie-Curie-Stipendiatin in der Firma Centrotherm zwischen 2004-2006 im Bereich der Entwicklung von Prozessen für die Photovoltaik tätig. Seit 2006 als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fraunhofer IWS in Dresden tätig und seit 2014 Koordinatorin des Großvorhabens AGENT-3D zum Thema Generative Fertigung mit Laufzeit 8 Jahre, ca. 120 Partner aus Industrie und Forschung und gesamtem Projektvolumen von ca. 75 Mio €. Seit April 2017 Abteilungsleiterin des Bereiches Additive Fertigung in Fraunhofer IWS, Dresden.



Abstract

E. Lopez, F. Brückner, A. Seidel, T. Finaske, M. Riede, R. Willner, C. Leyens, E. Beyer

Meanwhile, different Additive Manufacturing (AM) technologies got introduced in various industrial branches, e. g. aerospace and space, tooling or medical technologies. This was driven by advanced manufacturing capabilities as higher complexity (for free), increased and more variable material usage or higher production flexibility (e. g. in case of spare parts).

Even though AM technologies provide a high near-net shape geometry, there is often the need for post-processing. Hence, AM is strongly combined with conventional finishing technologies as milling, grinding or polishing. Compared to subtractive machining, AM represents still a small niche in the whole manufacturing world, but has huge growing potentials. Hence, the combination of additive with conventional manufacturing is going to enable enhanced production feasibilities and the AM market.

For example, higher flexibility can be reached by intermediate machining of areas which are difficult to access after the fabrication of the full geometry. In addition, the full part can be produced in just one fixture yielding a high and rapid production outcome for selected parts.

Within this talk, different approaches for hybrid manufacturing are introduced and discussed. Due to different part requirements, hybrid approaches can yield high benefits. In addition, exemplary parts from different industrial branches are shown. Finally, the talk closes with the presentation of potential development work.

3D-Drucken von Metall - präzise und schnell - ein Widerspruch?

André Streek

Laserinstitut Hochschule Mittweida

3D-Drucken von Metall - präzise und schnell - ein Widerspruch?

André Streek, Robby Ebert, Horst Exner

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, Mittweida, D-09648, Germany

Keywords Rapid Prototyping, Lasersintern, Metall, Polygonscanner, Hochrate, Mikro

So schnell wie möglich, so präzise wie nötig,.. ist für industrielle Fertigungsprozesse neben den Aspekten der Gewinnmaximierung vielmehr auch Herausforderung, um an den globalisierten Märkten bestehen zu können. Im Bereich der additiven Fertigungstechnologie mit einer durch die Kosten bestimmten Konkurrenzsituation zu konventionellen spanenden oder anderen urformenden Herstellungsmethoden gilt dieses Credo in besonderen Maße. Geht es doch um nicht vielmehr als den vielversprechenden Einsatz dieser Technologie in Umfeld der vierten industriellen Revolution. Waren vor Jahren additiv gefertigte metallische Bauteile noch ein Nischenprodukt, so setzte infolge der breiten Akzeptanz des, vor allem kostengünstigen 3D Drucks per „Fused Deposition Modeling“ (FDM) ein allgemeines Umdenken zum Einsatz additiver Fertigungstechnologien bei Design und Konstruktion funktioneller Baugruppen ein. Dieser Vertrauensbonus muss, durch eine zielgerichtete und beständige Weiterentwicklung der Verfahrens in eine verlässliche, kostengünstige und umweltfreundliche Zukunftstechnologie überführt werden.

Prozesstechnologisch hat sich hinsichtlich Präzision und Geschwindigkeit seit den 90'er Jahren an der, vormals als „Rapid Prototyping“ bezeichneten, pulverbettbasierten Fertigungstechnologie nur wenig verändert, lässt man die allgemeinen technischen Weiterentwicklungen an energieeffizienteren Strahlquellen und verbesserter Rechentechnik außer Acht. Zwar versuchen ausnahmslos alle namhaften Hersteller kommerzieller Metallsinteranlagen durch Parallelisierung und Vervielfältigung optischer Komponenten (sog. Doppel- oder Mehrkopf-anlagen) erhöhte Aufbauraten zu erzielen, erkaufen sich dies jedoch durch deutliche Einschränkungen in der Anlagenflexibilität bei Fertigung kleinerer Losgrößen.

Grund für die momentane Beschränktheit der Bauraten sind die zugrundeliegenden physikalischen Prozessmechanismen, der Energieabsorption und -dissipation des laserbestrahlten Pulverbetts. Diese Mechanismen verbieten es den gegenwärtig eingesetzten Prozessregimen, die hohen verfügbaren Laserleistungen bei hinreichend kleiner Fokussierung in adäquate Scangeschwindigkeiten zu überführen. Folglich arbeiten alle kommerziellen SLM-Verfahren mit Strahlableitgeschwindigkeiten im Bereich weniger Meter pro Sekunde bzw. darunter.

Für die zu erzielende Marktdurchdringung unter Beibehaltung der technologischen Vorteile und Flexibilität der pulverbettbasierten Sinterverfahren (SLM) ist es eine der vordringlichsten Aufgabe und Herausforderung die Bauraten zu erhöhen und die Präzision beliebig zu steigern. Durch die Entwicklungen des Lasermikrosinterns seit dem Jahr 2002 verfügt das Laserinstitut der Hochschule Mittweida über eine hohe Expertise beim Einsatz mikro- und nanoskalige Pulver als Ausgangsmaterial für die additive Mikrofertigung. Wesentlich ist hierbei, dass neben der Generierung hochaufgelöster Mikrobauerteile derartiger Mikropulver auch Prozessführungen erlauben, die die gegenwärtig gültigen Geschwindigkeitsgrenzen der „makroskopischen“ SLM-Verfahren überwinden zu können. Bedingung hierfür ist die Weiterentwicklung der Rakeltechnologie sowie eine dezidierte Prozessführung unter Einsatz neuester Strahlableittechnologien.

In den vergangenen Jahren wurde am Laserinstitut der Hochschule Mittweida aktiv an einer Hochratelaserprozesstechnik für die additive Fertigung im Milli- bis Mikrobereich geforscht. Unterstützt durch die eigenen Entwicklungen zur ultraschnellen Strahlableitung mit Scangeschwindigkeiten von bis zu 1000 m/s lassen sich gegenwärtig Hochleistungslaser zur additiven Mikrofertigung einsetzen. Die in den Untersuchungen erzielten Maßhaltigkeiten ($\sim 30 \mu\text{m}$) und Oberflächenqualitäten ($R_a \sim 3 \mu\text{m}$) vor allem aber die erzielbaren Aufbauraten zeigen ein hohes Potential, des auf den Namen „Hochrate-Mikro-SLM“ getauften Verfahrens für den zukunftsweisenden Einsatz in der industriellen digitalen Produktion.

Additive Fertigung für medizinische Anwendungen - die Implantattechnologie der Zukunft

Stefan Kaierle

Laser Zentrum Hannover

Beruflicher Werdegang Stefan Kaierle

Stefan Kaierle hat an der RWTH Aachen Elektrotechnik studiert und anschließend im Maschinenbau promoviert. 1998 wechselte er zum Fraunhofer ILT und übernahm die Leitung der Abteilung Systemtechnik. Er hat mehr als 250 wissenschaftliche Artikel veröffentlicht und hält über 10 Patente. 2012 wechselte er zum Laser Zentrum Hannover und übernahm die Leitung der Abteilung Werkstoff- und Prozesstechnik. Ebenfalls seit 2012 ist er Dozent an der Leibniz Universität Hannover LUH. Stefan Kaierle war von 2003 bis 2013 Präsident des European Laser Institute (ELI) und ist zur Zeit Mitglied im Board of Directors des Laser Institute of America (LIA) sowie im Board of Stakeholders der European Technology Platform Photonics²¹. Neben zahlreichen Gremientätigkeiten übernahm er den Vorsitz als General Chair, Chairman bzw. Board Member bei verschiedenen internationalen Konferenzen. Seine akademischen Leistungen wurden vom Laser Institute of America (Fellow), dem European Laser Institute (Fellow) und dem CIOMP der Chinesischen Akademie der Wissenschaften (Ehrenprofessur) ausgezeichnet.



Kurzfassung

Additive Fertigung für medizinische Anwendungen – die Implantattechnologie der Zukunft

Stefan Kaieler, Yvonne Wessarges, Jörg Hermsdorf, Ludger Overmeyer
Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Germany

Additive Fertigung erlaubt die wirtschaftliche Produktion von individuellen und komplex geformten Bauteilen. Durch die Verarbeitung von Metallpulvern ermöglicht das selektive Laserschmelzen die Herstellung von belastungsangepassten Bauteilen mit großer Designfreiheit, wobei hohe Werkstoffdichten und exzellente mechanische Eigenschaften vergleichbar mit gegossenen Bauteilen erreicht werden. Abhängig von der verfügbaren Systemtechnik können präzise dreidimensionale Bauteile vom Mikro- bis zum Makro-Maßstab erstellt werden.

Magnesiumlegierungen sind aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften wie Biokompatibilität, Bioresorbierbarkeit, mechanischer Eigenschaften vergleichbar mit menschlichen Knochen und aufgrund ihres geringen Gewichts ein wichtiges Material für den Leichtbau oder für medizinische Implantate. Die Prozessierbarkeit von Magnesiumlegierungen durch das selektive Laserschmelzen wird daher einen hohen Stellenwert für die Herstellung von innovativen industriellen Bauteilen sowie von Implantaten haben.

Darüber hinaus sind Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen (FGL) ebenfalls sehr geeignete Materialien für medizinische Anwendungen. Ebenfalls biokompatibel können diese Materialien aktorische Funktionen ausüben, sogar wenn diese bereits als Implantat im Körper eingesetzt sind. So können „intelligente“ Implantate mit post-operativ veränderbaren Eigenschaften und Funktionen hergestellt werden.

Im Vortrag werden die bisher erzielten Ergebnisse bei der Verarbeitung von Magnesiumlegierungen und Nickel-Titan FGL mittels selektivem Laserschmelzen vorgestellt und deren mögliche Anwendungen speziell für den medizinischen Einsatz aufgezeigt.

Sektion I

FOLGEVERFAHREN

Funktionsintegriertes Finishen von 3D-gedruckten Kunststoffbauteilen

Jens Bliedtner und Mitautoren

Ernst Abbe Hochschule Jena

Kurzvita Prof. Dr. Jens Bliedtner

Wissenschaftlicher Werdegang

- 1989 Diplomabschluss der Fachrichtung Gerätetechnik (FSU Jena)
- 1997 Promotionsabschluss zum Dr.-Ing. (FSU Jena)
- 1989- 1995 wissenschaftlicher Assistent Friedrich-Schiller-Universität Jena
- 1995- 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Demonstrationszentrum für das Bearbeiten neuer Materialien in Jena
- 1995- 2000 wiss. Mitarbeiter, Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH Jena
- 1991- 2000 Geschäftsführer, Ing. Büro für Lasertechnik Jena
- 1999- 2000 Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Jena
- seit 2000 Professor (C3) an der Fachhochschule Jena
Fertigungstechnik und –automatisierung, Optiktechnologie
- 2001 – 2003 Prodekan
- 2003 – 2006 Dekan
- 2003 – 2010 Studiengangsleiter Laser- und Optotechnologien
- seit 2003 Mitglied des Forschungsausschusses

Kurzfassung

„Funktionsintegriertes Finishen von 3D-gedruckten Kunststoffbauteilen“

Jens Bliedtner, Volker Heineck, Martin Uebel, Andrea Barz, Michael Möhwald *

Martin Schilling, Christian Schilling**

Christian Böhme ***

* Ernst Abbe Hochschule Jena

** 3D-Schilling, Oberspier

*** Develos Design, Leipzig

Abstract

Ein großer Vorteil von additiven Verfahren besteht in der Herstellung von sehr komplexen Bauteilgeometrien, bspw. mit Innenkonturen und nahezu beliebig gestaltbaren Außengeometrien oder das Erzeugen von kompletten Baugruppen in einem Baujob. Einschränkungen für den Anwendungsbereich dieser innovativen Fertigungstechnologie stellt oftmals die erreichbare Genauigkeit hinsichtlich Formgestalt und Oberflächenrauigkeit dar. Die Ursachen dafür liegen einerseits in dem Verfahrensprinzip der Additiven Technologien, dem Treppungseffekt, und andererseits in der Verarbeitbarkeit der Kunststoffe bzw. deren Materialeigenschaften. Um qualitative hochwertige Oberflächen von additiv gefertigten Bauteilen erreichen zu können, ist meist ein aufwändiger händischer Nachbearbeitungsschritt erforderlich. Aktuell gibt es viele Bestrebungen, den Nachbearbeitungsprozess möglichst substituieren zu können. Entwicklungen zielen zum einen auf die qualitative Verbesserung des Bauprozesses ab, bspw. durch kleinere Schichtdicken oder das Bereitstellen von Materialien mit verbesserten Eigenschaften für den Bauprozess. Zum anderen werden spezielle Methoden entwickelt, die Nachbearbeitungsschritte vereinfachen und effizienter gestalten. Im vorliegenden Beitrag werden Lösungen zu beiden Entwicklungsrichtungen vorgestellt und anhand von ausgewählten Anwendungsbeispielen diskutiert. Ferner werden Finishingverfahren vorgestellt, die zu einem zusätzlichen Funktionalisieren von additiv gefertigten Oberflächen führen.

Key words: 3D-Druck, Additive Technologien, Kunststoffe, Finishing, Funktionalisierung, Bauprozess

„Funktionsintegriertes Finishen von 3D-gedruckten Kunststoffbauteilen“

Jens Bliedtner, Volker Heineck, Martin Uebel, Andrea Barz, Michael Möhwald * Martin Schilling, Christian Schilling**
Christian Böhme ***

* *Ernst Abbe Hochschule Jena*

** *3D-Schilling, Oberspier*

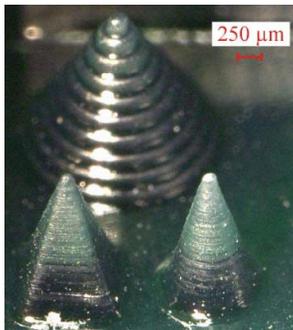
*** *Develos Design, Leipzig*

Key words

3D-Druck, Additive Technologien, Kunststoffe, Finishing, Funktionalisierung, Bauprozess

Einleitung

Der Einsatz von additiven Technologien ist im Bereich der Kunststofftechnik für den Prototypenbau fest etabliert. Diese innovativen Verfahren, verstärkt auch für die direkte Herstellung von Funktionsbauteilen einsetzen zu können, ist Thema vieler aktueller Entwicklungen. Oftmals stehen den vielen Verfahrensvorteilen, wie die Herstellung sehr komplexer Geometrien, die Integration von Innenkonturen oder die Fertigung komplexer Baugruppen auch Nachteile gegenüber, die den Durchbruch zur Herstellung von Funktionsbauteilen noch einschränken. Dies sind insbesondere die erreichbare Präzision, die Anisotropie der Materialeigenschaften sowie der zumeist aufwändige Nachbearbeitungsprozess. Typisch für diese Verfahrenstechnologie ist der sogenannte „Stufeneffekt“, durch den 2,5 D-Materialauftrag (siehe Abb. 1a). Dieser Einfluss lässt sich in Bezug auf die Formgenauigkeit minimieren, wenn die Schichtdicke kleiner gewählt werden kann. Des Weiteren gibt es vielfältige Bestrebungen Materialien zu entwickeln, die höhere Formgenauigkeiten (Minimierung des Schwindverhaltens) und bessere Oberflächeneigenschaften erreichen lassen. Die Abbildung 1.b illustriert exemplarisch den Einsatz eines speziell entwickelten SLA-Materials für den Bereich der Schmuckindustrie, mit hohen Anforderungen an die Abformgenauigkeiten im nachfolgenden Abformprozess.



a)



b)

Abb. 1: Oberflächenzustände additiv gefertigter Kunststoffe am Beispiel des Stereolithografieverfahrens (SLA).

a) „Treppenstufeneffekt“ in Abhängigkeit der gewählten Schichtdicke,
b) Schmuckelement der Firma 3Dsystems /Blie2013/

Weitere Verfahrensentwicklungen zielen darauf ab, Kunststoffmaterialien einzusetzen, die den üblichen Standardmaterialien, bspw. des Kunststoffspritzgusses entsprechen /*stra2017/*, /*alph2017/*.

Durch diese Entwicklungen lässt sich der Aufwand für die Nachbearbeitungsschritte reduzieren, wobei aber auf einen nachgelagerten Finishingprozess oftmals nicht vollständig verzichtet werden kann. Im Folgenden werden Lösungsvorschläge diskutiert, die durch die Endbearbeitung der Oberflächen zugleich ein Funktionalisieren dieser gestatten.

Charakterisierung additiv gefertigter Oberflächen

Die erreichbare Oberflächengüte additiv gefertigter Bauteile ist z.T. sehr verschieden und hängt insbesondere, von den gewählten Verfahren, den Materialien sowie Prozessparametern ab. Eine typische Oberflächentopografie eines lasergesinterten Polyamidbauteils veranschaulicht die Abbildung 2. Die erreichbaren Oberflächenkenngrößen sind von der Materialart, der mittleren Korngröße sowie der Kornverteilung, aber auch vom Versinterungsgrad abhängig. Typische arithmetische Mittenrauwerte liegen im Bereich zwischen 5 μm und 10 μm für das Lasersintern /*Blie2013/*.

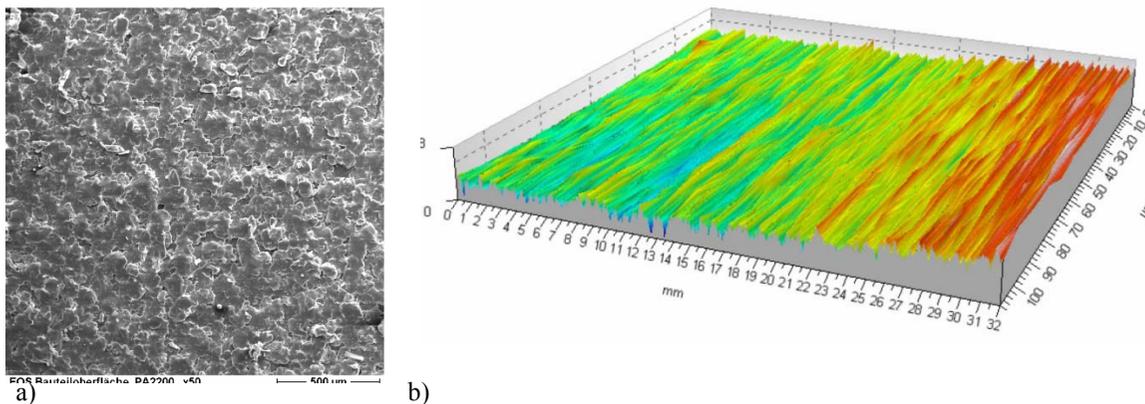


Abb. 2: Oberflächenzustand eines lasergesinterten Kunststoffbauteiles aus PA2200
des Oberflächenprofils /*Blie2013/*

a) Mikroskopische Darstellung der gesinterten Bauteiloberfläche, b) Darstellung

Verfahrensbedingt werden durch den Einsatz von flüssigen Monomeren als Basismaterial im Vergleich zu den pulverbettbasierten Verfahren höhere Oberflächenqualitäten erzielt. In der Abbildung 3 sind vier additive Verfahren, die für den Einsatz von Kunststoffen sehr häufig angewendet werden gegenübergestellt.

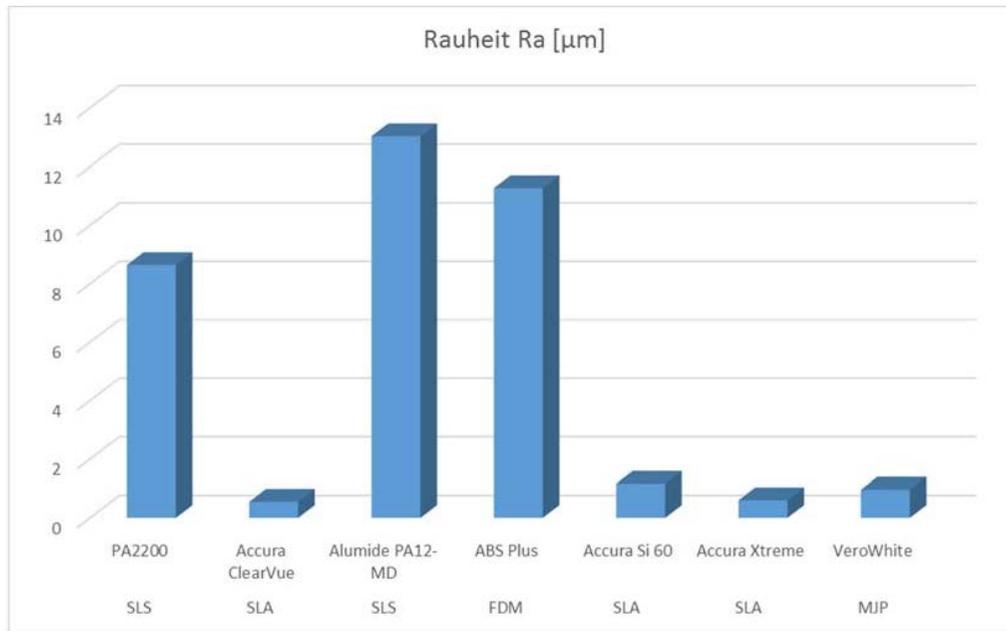


Abb. 3: Vergleich der arithmetischen Oberflächenqualitäten von Bauteilen hergestellt mittels Stereolithografie (SLA), Selektivem Lasersintern (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) und Multi-Jet-Printing (MJP)

Oberflächenqualitäten von $Ra < 1\mu\text{m}$, wie sie bspw. durch das SLA- oder MJP-Verfahren (Multi-Jet-Printing) erreicht werden können, sind für eine Reihe von Anwendungen bereits ausreichend. Für höhere Anforderungen an die Oberflächenqualität schließt sich eine Nachbearbeitungsstufe an. Die Bauteile der SLA- und MJP-Verfahren werden häufig als Modell für weitere Abformverfahren (Vakuummuss oder Feinguss) eingesetzt, u.a. aufgrund des geringeren Finishingaufwandes. Sehr oft werden die geforderten Oberflächenqualitäten aber erst erreicht bzw. gezielt verbessert durch eine oder mehrere nachträgliche Finishingsschritte. Sehr häufig werden abrasive Verfahren, wie bspw. das Sandstrahlen oder Glasperlstrahlen für lasergesinterte Bauteile eingesetzt. Interessant sind ebenfalls die speziellen Methoden des Gleitschleifens.

Funktionalisieren von additiv gefertigten Oberflächen

Unter dem Begriff Funktionalisieren wird das gezielte Ändern von Oberflächenzuständen verstanden, um das Bauteil mit spezifische Eigenschaften, bspw. Leitfähigkeit, Reflexions- oder Transmissionsvermögen, Verfestigung oder Verbesserung des Adhäsionsverhalten für eine nachträgliche Oberflächenbeschichtung ausstatten zu können.

Verfahrenskombination mit HSC-Fräsen

Für das Funktionalisieren additiv gefertigter Oberflächen mit wasserlöslichen Lackschichten ist ein mehrstufiger Nachbearbeitungsprozess für anspruchsvolle Oberflächen erforderlich. In den meisten Fällen erfolgen diese Nachbearbeitungsschritte in einem händischen Prozess durch einen geübten Modellbauer. Sehr zeitintensiv ist dieses Funktionalisieren, wenn die Flächen sehr komplex (z.B. Freiformflächen) oder filigran gestaltet sind und ein hoher Anspruch an die Formgestalt gestellt wird. Eine Alternative zur händischen Nachbearbeitung solcher anspruchsvoller Oberflächen stellt das HSC-Fräsen dar. Voraussetzung dafür ist das Verwenden eines Nullpunktspannsystems oder die Möglichkeit des Bauteileinmessens auf der 5-Achs-HSC-Fräsmaschine. Die Abbildung 4 illustriert die hohen erreichbaren Oberflächengüten am Beispiel eines HSC-gefrästen Modells. Der Aufwand für den noch erforderlichen finalen Polierprozess vor den Lackierarbeitsstufen kann deutlich minimiert werden. Der hier gezeigte HSC-Prozess kann problemlos auf additiv gefertigte Oberflächen übertragen werden. Eine Kombination der beiden Verfahrenstechnologien wird insbesondere interessant, wenn bspw. Innenkonturen durch Fräsverfahren nicht herstellbar sind.



Abb. 4: Modell eines zweisitzigen Elektrofahrzeuges – Designstudie

Oberflächenbeschichten

In den durchgeführten Untersuchungen wurde ebenfalls experimentell untersucht, inwieweit additiv gefertigte Oberflächen durch PVD-Prozesse beschichtet bzw. funktionalisiert werden können. Bei der physikalischen Gasphasenabscheidung (**Physical Vapour Deposition, PVD**) wird eine feste Substanz in die Gasphase überführt. Aus der Gasphase kondensiert dann das Material als feste dünne Schicht auf dem Substrat. Gewählt wurde die Vakuumbedampfung mit einer plasma-ionengestützten Beschichtung. Dem Dampfstrom der schichtbildenden Teilchen wird dabei ein Ionenstrom von energiereichen Argon-Ionen überlagert. Von Vorteil ist bei dieser Technologie, dass mit niedrigeren Arbeitstemperaturen bedampft werden kann. Erprobt wurden die Beschichtungsmaterialien Gold und Silber auf ausgewählten Kunststoffmaterialien, die durch SLA und MJP additive gefertigt wurden. Im Vergleich dazu wurde eine Probe mit einem transparenten Lack beschichtet. Die erreichbaren Oberflächenrauigkeiten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Oberflächenrauheiten in Abhängigkeit der Oberflächenbeschichtung

	Oberflächenschicht	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
	Klarlack	0,204	0,301	1,350
	Silber	0,450	0,508	2,206
	Gold	0,162	0,212	0,844

Die im PVD-Verfahren funktionalisierten Oberflächen weisen eine sehr gute Schichthaftung auf und können auch auf komplex geformte Oberflächen sehr homogen aufgedampft werden. Die erforderliche Schichtdicke kann ebenfalls reproduzierbar eingestellt werden. Einen entsprechenden Demonstrator veranschaulicht die Abbildung 5.

Abb. 5: Fotografische Darstellung eines Anschauungsmodells mit funktionalisierten Oberflächen

Schleifen und Polieren von additiv gefertigten Bauelementen

In den letzten Jahren wurden Materialien entwickelt, die besonders gute Transmissionseigenschaften im sichtbaren Bereich besitzen. Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass optische Bauelemente zunächst als Anschauungsobjekte schnell und flexibel additiv hergestellt werden können. Für den Einsatz als funktionales Bauteil (abbildendes optisches Element) sind jedoch zum einen deutlich erhöhte Anforderungen an die Oberflächen und zum anderen an einen homogenen Aufbau der Objekte gefordert. Dafür müssen geeignete Nacharbeitsmethoden gewählt werden, um optisch wirksame Flächen zu erhalten. Eine Funktionalisierung der Oberflächen wird hierbei hinsichtlich der geforderten hohen Transmissionseigenschaften angestrebt. Die Abbildung 6.a illustriert die optischen Bauelemente nach dem Bauprozess durch das MJF-Verfahren mit dem speziell entwickelten Material „vero clear“, In Abbildung 6.b. ist eine optische Oberfläche nach dem Läpp- und Polierprozess dargestellt.



a) **Abb. 6:** Additiv gefertigte optische Bauelemente. a) nach dem Druckprozess, b) nach dem Polierprozess

Die entwickelten transparenten Materialien weisen sehr gute Eigenschaften auf, um die additiv gefertigten Bauelemente sowohl im Läppprozess mit Siliziumkarbid als auch im Polierprozess mit Aluminiumoxid endbearbeiten zu können. Die erreichbaren Oberflächenrauigkeiten liegen im einstelligen nm-Bereich (R_q) und entsprechen im Wesentlichen denen, die konventionell in der Optiktechnologie erreicht werden. Nach dem Funktionalisieren der optisch wirksamen Oberflächen liegen relativ hohe Reintransmissionsgrade dieser verfügbaren Materialien vor. Die getestete Langzeittransmissionscharakteristik

(VIS-Bereich) ist ebenfalls sehr hoch. In einem Testintervall 20 - 120 Tage konnten keine signifikanten Änderungen im Transmissionsverhalten der Materialien „vero clear“ (MJP-Verfahren) und ClearVue (SLA-Verfahren) analysiert werden. Für einfache optische Anwendungen, z.B. Beleuchtungstechnik, ist somit die beschriebene Methode des Funktionalisierens sehr gut geeignet. Für abbildende optische Bauelemente ist jedoch die Anisotropie des schichtweisen Aufbaus im Inneren des Transmissionselementes nachteilig */Blie2017/*. Eine Möglichkeit bietet ein nachträglicher Abformprozess des polierten Modells über das Vakuumgießen. Durch diesen Prozessschritt kann die Anisotropie eliminiert werden, bei gleichzeitigem Funktionserhalt der optisch wirksamen Oberflächen.

Erzeugen von leitfähigen Oberflächen

Leitfähige Strukturen auf Kunststoffoberflächen zu erzeugen bietet ein großes Potential für MID- Anwendungen (Molded Interconnect Devices). Mit diesem Verfahren werden bspw. spritzgegossene Schaltungsträger hergestellt, welche mehrere Funktionen in einem Bauteil vereinen. Mit dem MID- Verfahren kann die benötigte Bauteilanzahl für eine Baugruppe reduziert werden, wodurch Herstellungskosten, Material und Gewicht eingespart werden. Ziel im Rahmen des Forschungsvorhabens */VP2156319TA4/* ist es, mittels Laserstrahlung selektiv elektrisch leitfähige Strukturen auf Kunststoffen zu erzeugen. Der Anspruch besteht darin, die Funktionalisierung ressourceneffizient auf handelsüblichen Kunststoffoberfläche nach dem Fertigungsprozess umzusetzen. Da in diesem Verfahren die Notwendigkeit von Zusätzen nicht gegeben ist, bleiben wichtige Werkstoffparameter des Bauteils unbeeinflusst und es lässt sich das Spektrum von Kunststoffen für das Funktionalisieren deutlich erhöhen. Darüber hinaus ermöglicht dieses Verfahren eine erhebliche Kostenersparnis, da eine aufwendige Herstellung spezieller Werkzeuge entfällt und keine teuren Additive benötigt werden. In Rahmen der Untersuchungen konnten leitfähige Strukturen auf Materialien wie ABS, PBT, PET und PC erzeugt werden.

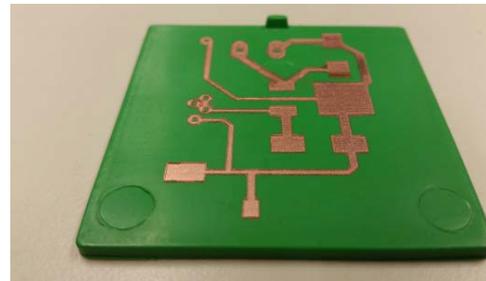


Abb. 7: Erzeugen von leitfähigen Strukturen auf ebenen Oberflächen, Material: PBT

Die Verfahrensschritte zum Funktionalisieren umfassen:

1. Additive Fertigung des Bauteil
2. Laserstrukturieren der leitfähigen Bahnen
3. Chemische Aktivierung der laserstrukturierten Bahnen
4. Chemisch verkupfern der aktivierten Bereiche

Mit diesem Verfahren lassen sich gezielt Oberflächenbereiche elektrisch leitfähig funktionalisieren, die Leiterplattenansprüche im Wesentlichen erfüllen. Dies betrifft insbesondere die Haftung der leitfähigen Strukturen sowie die elektrischen Leitfähigkeitsanforderungen.

Mit Hilfe von 3D-Laserbearbeitungsanlagen lassen sich diese Ergebnisse auch in den 3D-Bereich der additiven Anwendungen übertragen. Untersucht wurde eine Gehäuseanwendung zum Aufbau einer integrierten Schaltung auf der Gehäuseinnenseite, Abb. 8.

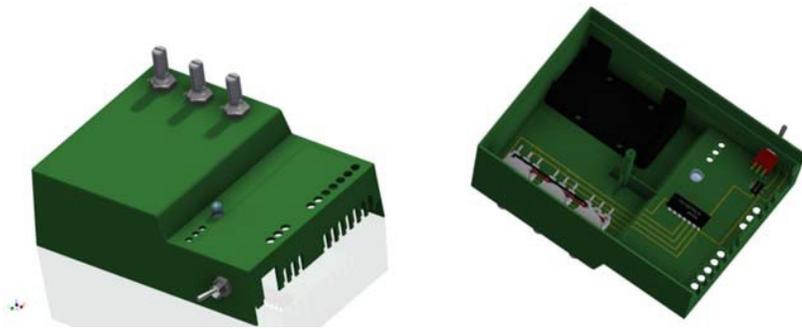


Abb. 8: Gehäuseintegrierte Anwendung zum Funktionalisieren von leitfähigen Strukturen

Das Funktionalisieren von leitfähigen Strukturen konnte für die Materialien ABS sowie PA6 erfolgreich nachgewiesen werden.

Zusammenfassung

Das funktionsintegrierte Finishen von 3D-gedruckten Kunststoffformteilen bietet die Möglichkeit den Nachbearbeitungsprozess von additiv gefertigten Bauteilen zu optimieren, um gezielt Gebrauchswertsteigerungen vornehmen zu können. Es konnte gezeigt werden, dass Oberflächen mit sehr hohen Anforderungen an die Mikrorauigkeit durch PVD-Beschichten oder Läppen und Polieren erzielt werden können. Des Weiteren können additiv gefertigte Bauteile mit definierten leitfähigen Strukturen erzeugt werden, die ein großes Potential für MID-Anwendungen bieten.

Literatur

- /Blie2013/ Bliedtner, J.; Müller, H.; Barz, A.: Lasermaterialbearbeitung – Grundlagen-Verfahren- Anwendungen –Beispiele. Hanser Verlag. 2013. ISBN: 978-3-446-42168-4
- /Blie2017/ Jens Bliedtner, Martin Schilling, Uwe Brick, Volker Heineck, Uwe Bauch, Andrea Barz, Michael Möhwald, Christian Schilling and Marko Aubel: Production of Optical Plastic Components. Potential and limits of additive manufacturing procedures. Optik&Photonik. 2/2017.WILEY
- /stra2017/ Stratasys: Digitale Materialien. <http://www.stratasys.com/de/materialien/polyjet/digitales-abs>, 05.05.2017
- /alph2017/ Alphacam: FDM-Materialien. <http://www.alphacam.de/3d-drucker/fdm-3d-drucker/fdm-materialien.html?gclid=CKOYvMTc3tMCFVPGsgodbwULVA>, 05.05.2017

Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Kooperationsprojektes mit dem Titel „Ressourceneffizientes Funktionalisieren von dreidimensionalen Kunststoffformteilen mit nano- und mikroskaligen Materialien“ (PolymerAktiv FKZ:VP2156319TA4) erstellt.

Funktionsintegration mittels Laserstrahlschmelzen - metallischer 3D-Druck für innovative Bauteile und Werkzeuge

Bernhard Müller
Thomas Töppel

Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung - Fraunhofer IWU

Beruflicher Werdegang Bernhard Müller

Bernhard Müller studierte Maschinenbau (Produktionstechnik) an der Technischen Universität Dresden und fertigte seine Diplomarbeit 1997 an der California State University, Long Beach (USA) an. Er arbeitete 12 Jahre in der deutschen Gießerei- und Automobilzulieferindustrie mit den Schwerpunkten Forschung & Entwicklung und Management und agierte dabei zuletzt als Werkleiter.

2001 promovierte er an der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden zum Doktoringenieur. 2008 kam Dr. Müller zum Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, wo er die „Generativen Verfahren“ als ein neues Forschungs- und Geschäftsfeld etablierte und als Abteilungsleiter verantwortet. Schon in seiner universitären Ausbildung und früheren Tätigkeiten beschäftigt sich Dr. Müller wiederkehrend mit generativen Fertigungsverfahren (Rapid Prototyping, Additive Manufacturing, 3D-Drucken) – inzwischen seit über 20 Jahren – und fokussiert sich dabei heute auf die Laser-Strahlschmelztechnologie (metallischer 3D-Druck). Dr. Müller ist seit 2014 Sprecher der Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung und leitet das Industrienetzwerk Strahlschmelzen als Netzwerkmanager. Er ist darüber hinaus ehrenamtlich in zahlreichen Gremien aktiv – sowohl national (Vorstand des AGENT-3D e. V., VDI-Fachausschuss „GPL FB1_FA105 Rapid Prototyping/Rapid Manufacturing“; Fachausschuss 13 „Rapid-Technologien“ der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS) als auch international (Fachbeirat der Rapid.Tech Fachmesse und Kongress für Additive Manufacturing und 3D-Druck, Editorial Board des Springer-Journals „PIAM Progress in Additive Manufacturing“; Jury des IAMA International Additive Manufacturing Award).

Dr. Müller ist Autor von über 50 fachlichen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen und hat ebenfalls über 50 Fachvorträge auf nationalen und internationalen Tagungen, Konferenzen und Workshops gehalten.



Beruflicher Werdegang Thomas Töppel

Thomas Töppel studierte von 2003 bis 2007 Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Maschinenbau an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig. Seinen Berufseinstieg fand er als Gusstechnologe bei einem mittelständischen Automobilzulieferer im Bereich Leichtmetallguss. Dort gehörten die technologische Betreuung von Serienbauteilen und Neuprojekten sowie die Mitarbeit im Innovationsmanagement zu seinen Aufgabenschwerpunkten.

Seit 2009 ist Herr Töppel als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU beschäftigt. Am Dresdener Institutsteil des Fraunhofer IWU arbeitet Herr Töppel in der Abteilung »Generative Verfahren« und ist dort für die Akquisition, Planung und Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Zusammenhang mit generativer Fertigung zuständig. Seine Forschungs- und Arbeitsschwerpunkte sind dabei die technologische Weiterentwicklung des Verfahrens Laser-Strahlschmelzen sowie Forschung zur Implementierung der Laser-Strahlschmelztechnologie für die Herstellung medizinischer und medizintechnischer Produkte wie beispielsweise Implantate. Seit 2017 leitet Herr Töppel die Gruppe »Prozesstechnik«.

Herr Töppel ist bereits seit mehr als zehn Jahren mit der generativen Fertigung vertraut. Dazu zählen neben dem Laser-Strahlschmelzen metallischer Werkstoffe auch Technologien wie das Fused Layer Modeling (FLM) von Kunststoffen und das 3D-Drucken von Sandformen für Prototypen-Gussteile.

Herr Töppel ist Autor von über 20 Veröffentlichungen zum Laser-Strahlschmelzen. Neben seiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Fraunhofer IWU ist er Co-Netzwerkmanager des Industrienetzwerks »Strahlschmelzen«, welches die Kompetenz von vorwiegend kleinen und mittelständischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der generativen Strahlschmelztechnologie bündelt. Zudem ist Herr Töppel gehört dem Editorial Board der amerikanischen Fachzeitschrift »3D Printing and Additive Manufacturing« (Mary Ann Liebert, Inc. Publishers) an, welche ein bedeutendes Forum für die Veröffentlichung weltweiter Forschungsarbeiten zu generativer Fertigung und verwandten Technologien ist.



Abstract

Laserstrahlschmelzen, ein pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren, bietet zahlreiche Möglichkeiten, in Werkzeugen und Bauteilen bestehende Funktionalitäten zu verbessern bzw. auch völlig neue Funktionalitäten zu integrieren.

Dabei kann in drei Gruppen der Funktionalisierung unterschieden werden: geometrische Funktionalisierung, werkstoffliche Funktionalisierung und integrative Funktionalisierung.

Zur geometrischen Funktionalisierung zählen beispielsweise funktionale Hohlräume und Kanäle und auch zelluläre Strukturen, welche vor allem in Werkzeugen und Formen als Temperierkanäle oder als Methode für den strukturellen Leichtbau von Bauteilen genutzt werden.

In die Gruppe der werkstofflichen Funktionalisierung reihen sich neue Möglichkeiten der Verarbeitung von Hochleistungs- und Funktionswerkstoffen ein, welche beispielsweise mit konventionellen Fertigungsverfahren nur sehr schwer verarbeitbar sind und mit additiver Fertigung endkonturnah in Form gebracht werden können.

Die dritte Gruppe der integrativen Funktionalisierung umfasst vorrangig die Integration von Sensorik und/oder Aktorik und elektrischen bzw. elektronischen Funktionalitäten.

Im vorliegenden Beitrag werden Beispiele von Werkzeugen und Formen sowie metallischen Bauteilen mit entsprechender Funktionalisierung mittels additiver Fertigungsverfahren vorgestellt.

Pastenunterstützte Hybridverfahren - ein Ansatz zur additiven Multimaterialverarbeitung

Ines Dani und Mitautoren

Fraunhofer IWU

Kurzfassung

Pastenunterstützte Hybridverfahren – Ein Ansatz zur additiven Multimaterialverarbeitung

Ines Dani, Richard Kordaß, Martin Jaretzki,
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Zur Ausschöpfung des Potenzials der additiven Fertigung zur Herstellung hochintegrierter Funktionssysteme sind automatisierbare Prozesse zur Multimaterialverarbeitung mit Hilfe der etablierten pulverbettbasierten Prozesse notwendig.

Mittels Laserstrahlschmelzen (LBM) werden bisher vorrangig Materialvariationen in Aufbauichtung vorgenommen. Das Einbringen eines anderen pulverförmigen Materials erfolgt durch nachfolgendes Aufrakeln oder eine Prozessunterbrechung, das Entfernen des Pulvers sowie die Neubeschichtung mit dem zweiten Pulver erfolgen [SIN-2015, ALJ-2008, REG-2007, OTT-2012]. Eine Durchmischung der Pulverwerkstoffe während und insbesondere nach dem Schichtaufbau lässt sich jedoch nicht verhindern. Diese Pulver werden für weitere Bauprozesse unbrauchbar.

Materialkombinationen in der Bauebene sind bisher nicht umfassend realisierbar. Im Sinne einer automatisierten und wirtschaftlichen Fertigung wird daher weitestgehend auf Materialkombinationen verzichtet.

Zur Lösung dieses Problems wurde ein in eine LBM-Anlage integrierbares System bestehend aus mechanischen Pastendispensern und einer Absaugeinheit entwickelt. Mittels LBM wird zunächst eine Kavität erzeugt, das darin befindliche Pulver entfernt und ein pastöses Zweitmaterial eingebracht. Die thermische Aktivierung der Paste erfolgt durch die Bauplattformheizung sowie den Laserstrahl. Die zum System gehörige entwickelte Software erlaubt die manuelle, aber auch die ablaufgesteuerte Bewegungsführung des Systems. Ein hoher Automatisierungsgrad wird somit bereits in der Entwicklungsphase beachtet.

Eine potenzielle Anwendung für diesen Prozess ist die Erweiterung der Möglichkeiten der konturnahen Kühlung im Werkzeugbau. In filigranen Bereichen eines Werkzeugeinsatzes, die nicht mit einem Kühlkanal versehen werden können, wird ein Kupfereinsatz zur erhöhten Wärmeleitung eingebracht.

Langfristig können mit dem Prozess auch isolierte Leiterbahnen in Metallbauteilen hergestellt werden, da Pasten mit verschiedenen Füllmaterialien erhältlich und verarbeitbar sind.

Referenzen

- [ALJ-2008] Al-Jamal, O. M.; Hinduja, S.; Li, L. Characteristics of the bond in Cu-H13 tool steel parts fabricated using SLM In: CIRP Annals-Manufacturing Technology 57, 1 (2008) 239–242
- [OTT-2012] Ott, M. Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung, Technische Universität München. Dissertation. 2012
- [REG-2007] Regenfuß, P.; Ebert, R.; Exner, H. Laser Micro Sintering: a Versatile Instrument for the Generation of Microparts WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007
- [SIN-2015] Sing, S. L. et al. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Intermetallic phase formation between AlSi10Mg and C18400 copper alloy In: Materials Characterization 107 (2015) 220–227

PASTENUNTERSTÜTZTE HYBRIDVERFAHREN EIN ANSATZ ZUR ADDITIVEN MULTIMATERIALVERARBEITUNG

Ines Dani, Richard Kordaß, Martin Jarezki – Fraunhofer IWU

© Fraunhofer IWU

1

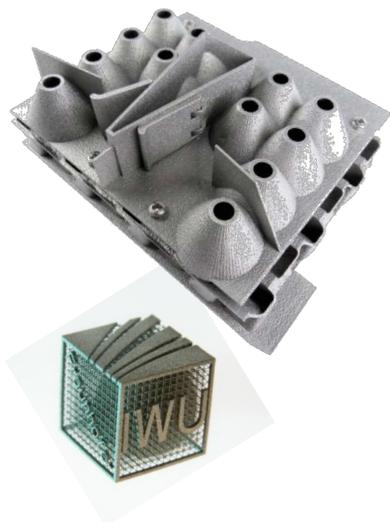
 **Fraunhofer**
IWU

GLIEDERUNG

- Motivation
- Konzepte zur Multimaterialfertigung
- Erste Umsetzung
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation - Vorteile und Herausforderungen pulverbettbasierter additiver Verfahren (Beispiel Laserstrahlschmelzen)

- 😊 Hohe Materialausnutzung
- 😊 Herstellung (fast) beliebiger Geometrien
- 😊 Keine Werkzeuge notwendig - Einzelstückfertigung



- ☹️ Geringe Baurate – hohe Kosten
- ☹️ Materialvielfalt begrenzt
- ☹️ Nachbearbeitung notwendig
- ☹️ In einem Prozess (meist) nur ein Material verarbeitbar

Motivation - Warum additive Multimaterialfertigung?

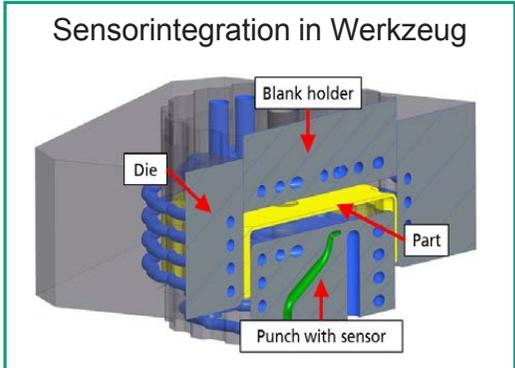
Optimierte Bauteilfunktion durch Kombination von Materialien mit angepassten Eigenschaften



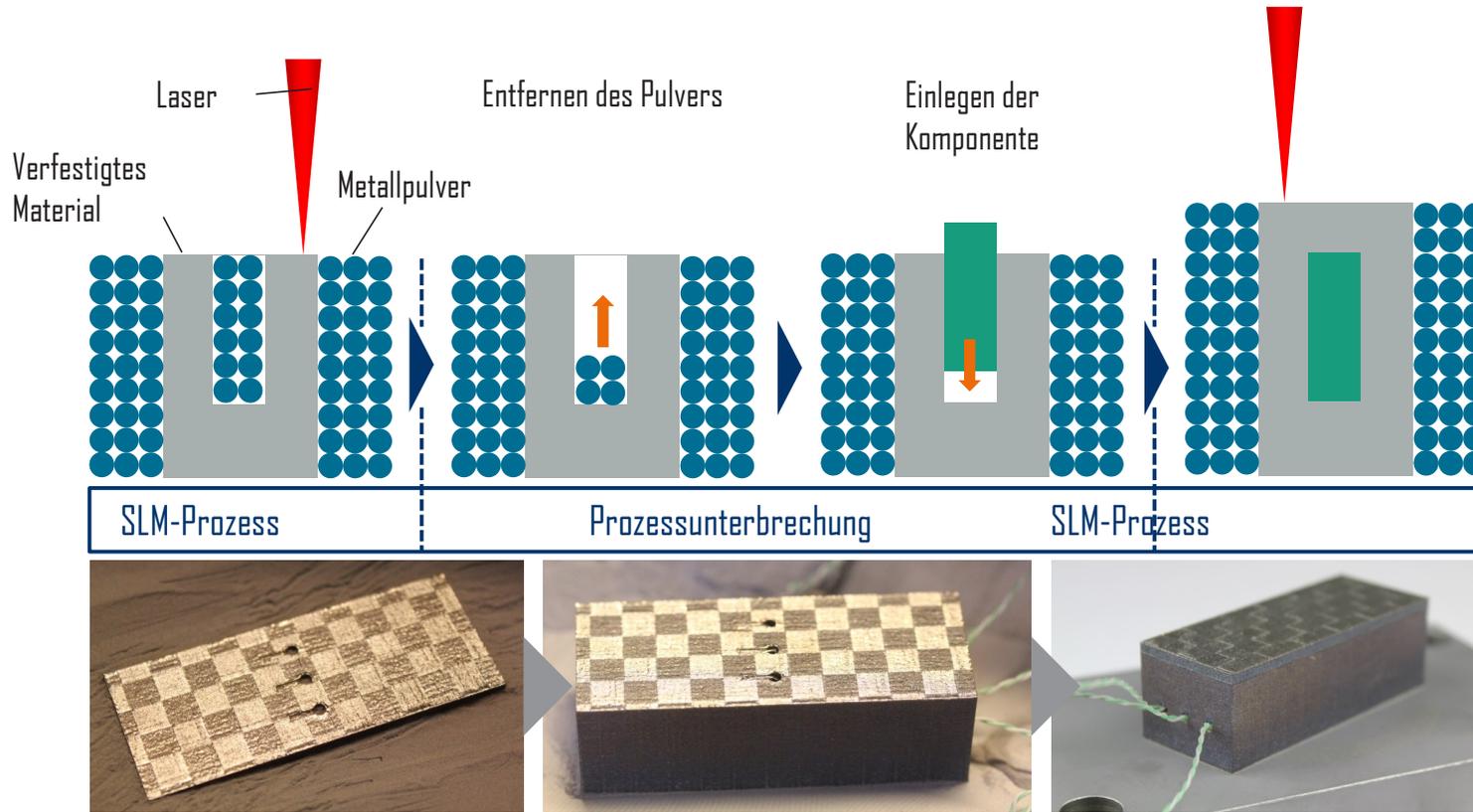
...für Polymere Stand der Technik



...für Metalle im Pulverbettverfahren aufwendig



Aktuelle Prozesskette zum Einbetten von Sensoren in laserstrahlgeschmolzene Bauteile



Manuelle Prozessschritte

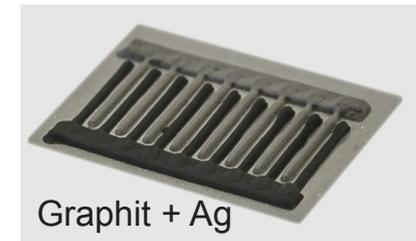
- ⇒ Reproduzierbarkeit
- ⇒ Kosten
- ⇒ Arbeitsschutz
- ⇒ Positioniergenauigkeit

Öffnen der Baukammer

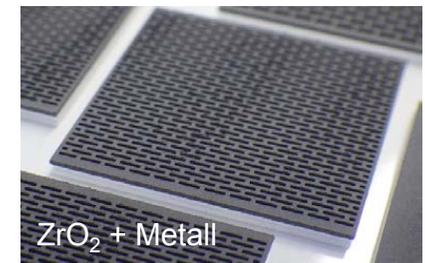
- ⇒ Fertigungszeit
- ⇒ Oxidation

Verfahren zur additiven metallischen Multimaterialfertigung

Laserstrahlschmelzen (lokales Entfernen und Ersetzen von Pulver, schichtweiser Materialwechsel)	Pulverwiederverwendung aufwendig Zeitaufwendig nur für schweißbare Materialien
Laserauftragschweißen	Geometriefreiheit begrenzt nur für schweißbare Materialien
Kaltgasspritzen	Geometrievielfalt begrenzt, hoher Nachbearbeitungsaufwand (im Prozess)
Digitale Druckverfahren	
Aerosoljet-/ Inkjet-Druck	Sehr geringe Produktivität, für Oberflächen mit geringer Rauheit, Sintern notwendig
Dispenser-Druck	Hoher Nachbearbeitungsaufwand, Sintern notwendig
Siebdruck	Geometrische Komplexität aufwendig, Sintern notwendig



Bildquelle: Fraunhofer IWS

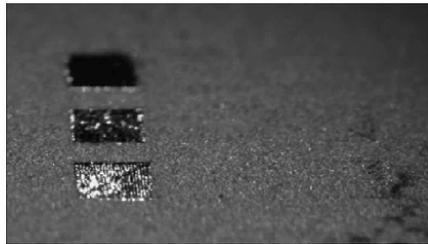
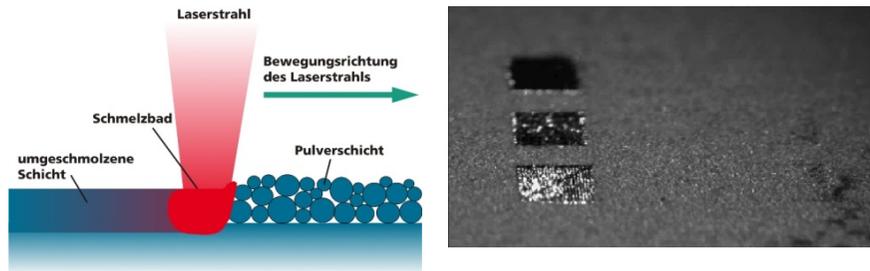


Bildquelle: T. Studnitzky, DDMC 2016

Konzept zur additiven metallischen Multimaterialfertigung

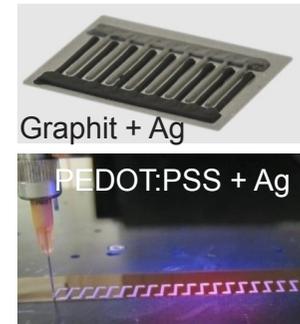
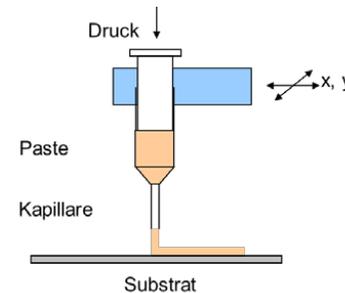
Laserstrahlschmelzen

- Komplettes lokales Aufschmelzen von Metallpulver
- Materialdichte entspricht 99.5...100 % der Festkörperdichte



Dispenserdruck

- robustes Verfahren, große Auswahl an Pasten
- Linienbreiten >100 µm, Schichthöhe < 500 µm

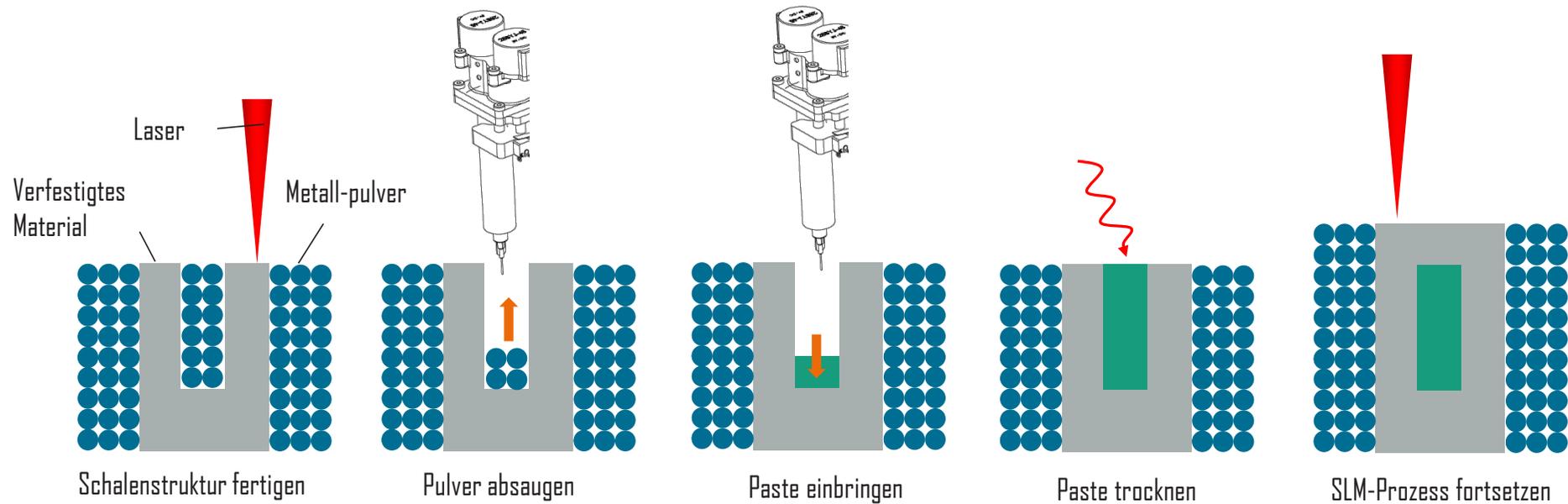


Bildquelle: Fraunhofer IWS

Kombination der Vorteile beider Verfahren

- Lokales Zuführen des zweiten Materials
- Wiederverwendung des Pulvermaterials
- Große Breite an kombinierbaren Materialien

Konzept: Laserstrahlschmelz-Prozess mit integriertem Pastendispenser



Vorteile

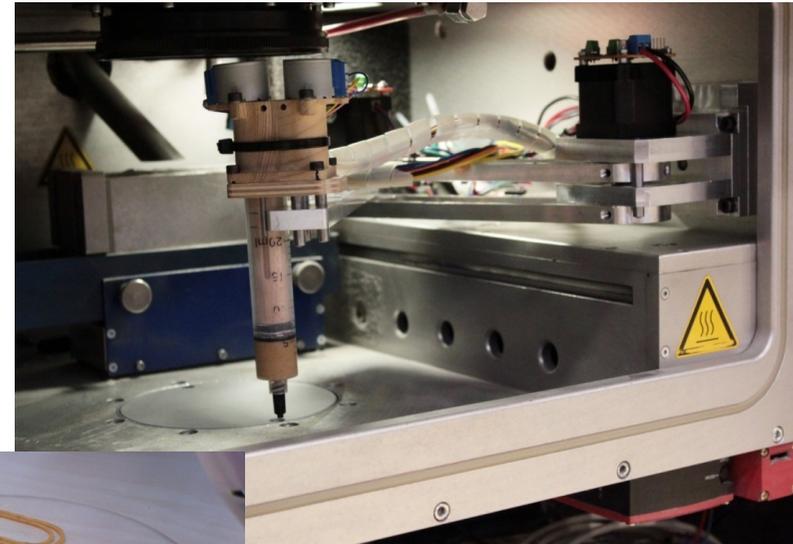
- Automatisierter Prozess
- Kein Öffnen der Baukammer im Prozess notwendig

Herausforderungen

- Integration Hardware in Baukammer
- Positionierung und Ausheizen des zweiten Materials

Erste experimentelle Umsetzung - Systemtechnik

- Integration von Bewegungssystem und Dispenserdüse in Bauraum einer Realizer SLM 100
- Kompaktes Bewegungssystem, das nicht mit dem Laserstrahlschmelzprozess wechselwirkt
- Ausgelegt für 2 Pastendispenser und 1 Düse zur Pulverentfernung
- Separate Steuerung zur schnellen Bahnplanung



Erste experimentelle Umsetzung - Material

Ausgangsmaterial

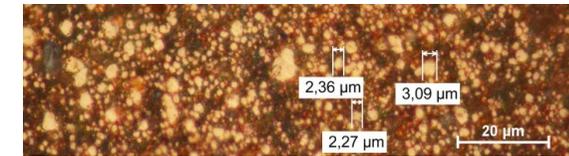
- Mittels Laserstrahlschmelzen gefertigte Schalenstruktur aus Stahl
- Cu-Siebdruckpaste, schichtweise aufgetragen und getrocknet in inerter Atmosphäre

Ergebnisse

- Dichtes Kupfermaterial in Stahl abgeschieden

Randbedingungen

- Für dichtes Material ist Schichtdicke beim Trocknen limitiert
- Energiequelle zum Trocknen: Laser, Baukammerheizung etc.
- Für Verarbeitung von Kupfer ist inerte Atmosphäre notwendig (Oxidationsneigung)



Cu-Siebdruckpaste: Partikel in Matrix



Dicke der Cu-Schicht: 250 µm



Dicke der Cu-Schicht: 750 µm

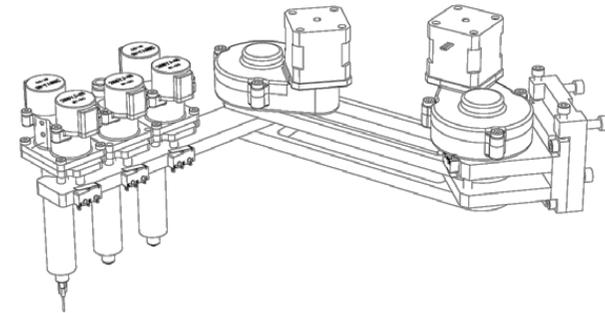
Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Kombinationsverfahren aus Laserstrahlschmelzen und Dispenserdruck prinzipiell demonstriert
- Multimaterialverarbeitung nachgewiesen, dichtes Material erzeugt

Ausblick

- Vollständige Integration in Laserstrahlschmelzprozess
- Aufbau und Charakterisierung von Probekörpern
- Test weiterer Materialien



Vielen Dank!

Dr. Ines Dani
Fraunhofer IWU
Reichenhainer Str. 88
09126 Chemnitz, Germany

Phone +49 371 5397-1311
E-Mail ines.dani@iwu.fraunhofer.de

www.iwu.fraunhofer.de



Vakuumgießen von Kunststoffen - das ergänzende Verfahren

Günter Ganß

Ingenieurbüro für Kunststofftechnik

Kurzvita Günter Ganß

Günter Ganß, Diplom-Ingenieur für Maschinenbau und Fachingenieur für KGL-Technik, erlernte bereits parallel zu seiner schulischen Ausbildung den Beruf des Werkzeugmachers mit dem Schwerpunkt Formenbau für die Kunststoffindustrie. Erste berufliche Erfahrungen sammelte er als Entwicklungsingenieur auf dem Fachgebiet Elektrotechnik/Elektronik. Im Jahr 1991 gründete er das Unternehmen Günter Ganß Kunststofftechnik und gehört damit zu den Pionieren der Anwendung additiver Verfahren und Folgetechnologien im Bereich Muster, Modell- und Prototypenbau. Günter Ganß führte das Unternehmen als geschäftsführender Inhaber zu einem leistungsstarken und anerkannten Fachbetrieb mit europaweiter Ausstrahlung. Ein Hauptbetätigungsfeld war und ist dabei die Vakuumgießtechnik für hochpräzise und funktionsfähige Bauteile und Baugruppen. Seit 2008 ist er Geschäftsführer des Ingenieurbüros für Kunststofftechnik Suhl und freiberuflich tätig mit dem Schwerpunkt Projektbetreuung/Produktentwicklung mittels additiver Fertigung/3D-Druck und Folgeverfahren. Darüber hinaus engagiert sich Günter Ganß in fachbezogenen Vereinigungen besonders für die Nachwuchsförderung und in zahlreichen ehrenamtlichen Tätigkeiten Thüringens.



Kurzfassung

Vakuumgießen von Kunststoffen – das ergänzende Verfahren

Das bereits auf dem Markt befindliche Verfahren des Vakuumgießens erhielt Anfang der 1990er Jahre mit dem Etablieren der generativen Fertigungsverfahren eine völlig neue Bedeutung. Das Bereitstellen von einsatzfähigen Kunststoffformteilen und Modellen in nur 24 Stunden war seinerzeit eine revolutionäre Aussage. Den zumeist im Stereolithografieverfahren hergestellten Modellen fehlte es an vielen entscheidenden Eigenschaften, die aber von der anwendenden Industrie zwingend gefordert wurden. Wenn aber nun das additiv gefertigte Urmodell präzise so aufbereitet wurde, dass es dem späteren Muster oder Serienteil entsprach, konnte dieses Urmodell kostengünstig über Silikonwerkzeuge reproduziert werden. Möglich wurde dies durch die Entwicklung duroplastischer PUR-Harze, die derzeit fast alle im Serienfall geforderten Eigenschaften simulieren können, die verwendeten präzise abbildenden RTV Silikonprodukte für das Werkzeug und die Anlagentechnik mit SPS-Steuerung für das Vakuumgießen selbst incl. peripherer Geräte. Durch Innovation und Qualität des Verfahrens können die zur Zeit noch bestehenden Mängel der additiven Fertigung überwunden werden. Zudem überzeugt Vakuumgießen durch Schnelligkeit und kostengünstige Umsetzung bei Neuentwicklungen im Vergleich zum konventionellen bzw. Prototypenwerkzeugbau. Neuentwickelte Gießharze erreichen eine völlige Übereinstimmung mit der EU-Verordnung REACH2017. Anhand zahlreicher Praxisbeispiele werden die Forderungen der Endkunden dargestellt und Lösungswege aufgezeichnet. Vielleicht erkennen Sie dabei Ihre eigenen Aufgabenstellungen und finden somit Lösungsansätze für Ihre Projekte!

Vakuumgießen von Kunststoffen – das ergänzende Verfahren

4. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung Mittweida, 17. Mai 2017

Dipl.-Ing. Günter Ganß
Ingenieurbüro für Kunststofftechnik Suhl
Am Lahnauer Platz 14
98716 Geraberg
Tel: 03677/869351
Mobil: 0175 8064658
Mail: g.ganss@online.de
www.prototypenbuero-ganss.de

ANFORDERUNGSKRITERIEN

Komplizierte technische Details

Materialverbund

Verstärkte Materialien

Glasklar

Elastisch

UV-beständig

Flammwidrig nach UL 94

Variable Farbgebung nach RAL oder Muster



Hochtemperaturbeständig

FDA-Zulassung

Designtreue

Schlagzähigkeit

Exzellente Oberfläche

Biegefestigkeit

RoHS-Konformität

Geringer Schwund

Feinste Konturen und strukturierte Oberflächen

Bild: Ganß Prototyping

QUALITÄTSMERKMALE FÜR FORMTEILE

Anforderungskriterium	Relevante Qualitätsmerkmale
Gestalterische Forderung	Größe, Maßstab, Gewicht, Dichte, Sichtkanten und Oberflächenstrukturen, Farben/Transparenz, Haptik, Geruch
Geometrische Forderungen	Bauteilgröße und Komplexität, Längen- und Winkelmaße, Maßtoleranzen, Form- und Lageabweichungen, Schrumpfungs- und Schwindungsverhalten, minimale Strukturen, Wände, Schlitze und Schichtdicken
Verarbeitungstechnische Forderung	Zerspanbarkeit, Umformbarkeit, Fügbarkeit, Oberflächenveredelung (Lackieren, Beschichten, Politur)
Festigkeitsforderung	Zug- Druck- Biege- und Torsionsfestigkeit, statische und dynamische Zeitstandfestigkeiten, Schlagfestigkeiten, Härte, Reibungskoeffizient, Abrieb
Thermische Forderungen	Gebrauchstemperaturbereiche, Formbeständigkeit in Wärme, Erweichungstemperaturen, spezif. Wärme, Wärmeleitfähigkeit, thermischer Längenausdehnungskoeffizient
Elektrische Forderungen	Durchschlagfestigkeit, Oberflächen- und spez. Durchgangswiderstand, dielektrische Eigenschaftswerte, Kriechstromfestigkeit
Chemische Forderungen	Brennverhalten, Toxizität, Medienbeständigkeit, Wasseraufnahme, Lebensmittelechtheit, biologische Verträglichkeit, Lichtstabilität, Lichtdurchlässigkeit
Wirtschaftliche Forderungen	Stückzahlen/Losgrößen, Fertigungszeiten/Lieferzeiten, Fertigungskosten, Zuverlässigkeit, Abfall und Entsorgungskosten

PROZESSKETTEN

Indirekte Prozesse



Direkte Prozesse

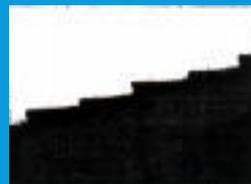


ADDITIVE FERTIGUNG - BAUSTUFEN

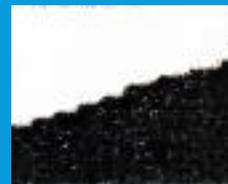
- Je kleiner die Baustufen, desto größer die Genauigkeit
- Je größer die Genauigkeit, desto weniger Handfinish



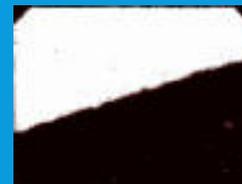
0,5



0,1



0,05



0,02

VERFAHRENSTECHNIK: VAKUUMGIEßEN

Das Abformverfahren in der Prototypen-/Kleinserienfertigung
Basis: Urmodelle in der Qualität der zu fertigenden Teile

Vorteile

- Schnell (1-3 Arbeitstage)
- Präzise
- Kostengünstig

Randbedingungen

- Entwicklung hochbelastbarer, reißfester RTV-Silikonkautschuke
- Entwicklung und Modifizierung spezieller PUR-Gießharze für die Vakuumtechnik
- Mikroprozessorgesteuerte Anlagentechnik
- Vakuumverfahren

VERFAHRENSABLAUF

Erster Tag



Abbildung:
In Anlehnung SLM Solutions GmbH

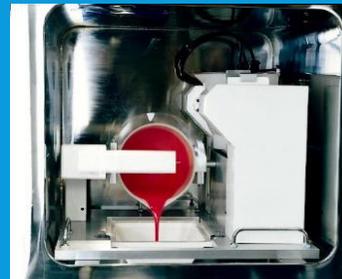
VERFAHRENSABLAUF

Erster Tag — Über Nacht — Zweiter Tag →



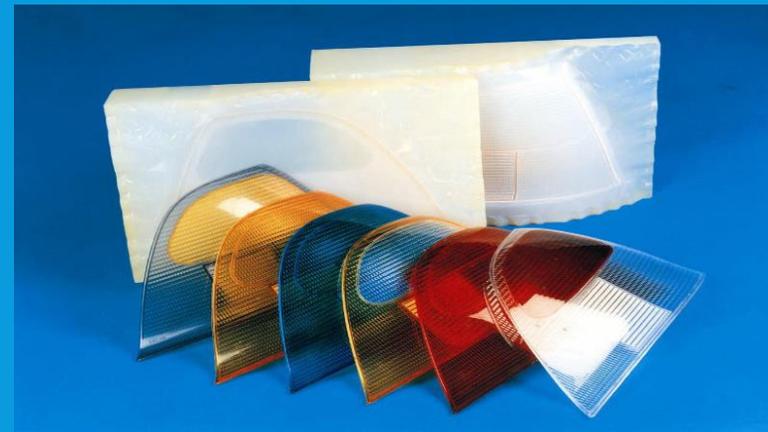
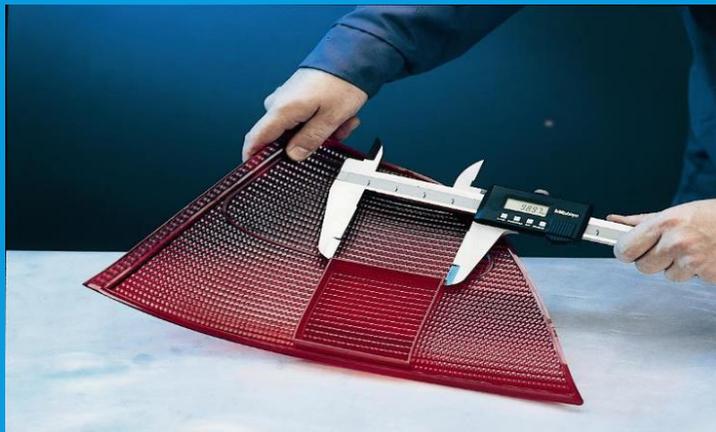
VERFAHRENSABLAUF

Zweiter Tag



VERFAHRENSABLAUF

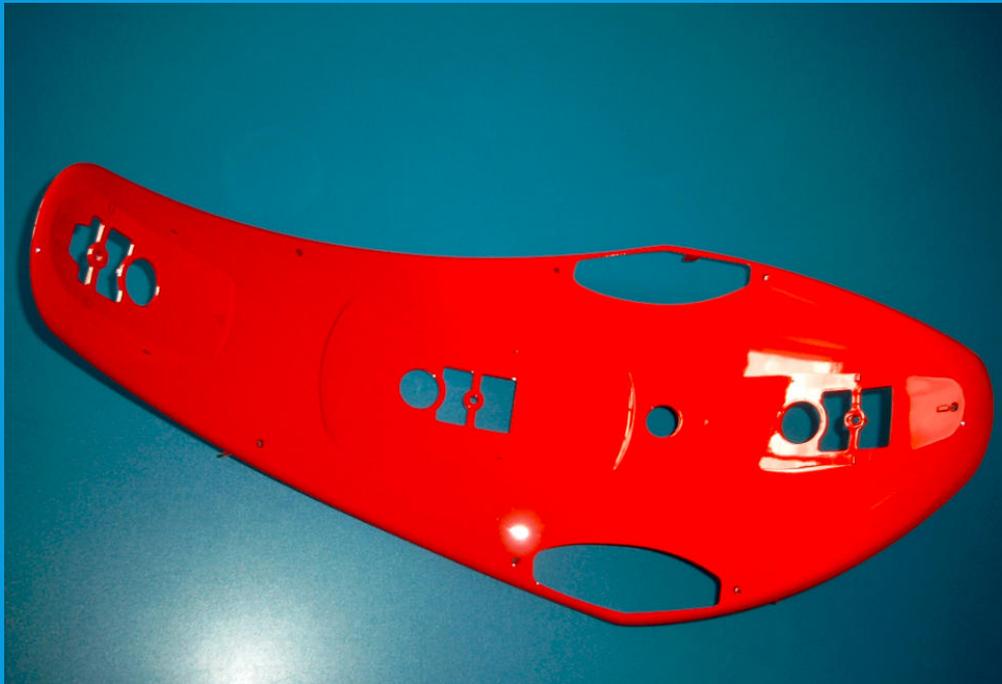
Zweiter Tag



WAS KANN VAKUUMGIEßTECHNIK?

- Echte Funktionsmuster
- Erste Teile innerhalb von 6-48 Stunden (abhängig von Kompliziertheit des Teiles)
- Vielfältige Kunststoffeigenschaften - vollwertige Simulationen der Eigenschaften von Thermoplasten (Schlagzähigkeit, UV-Beständigkeit, Flammwidrigkeit, Temperaturbeständigkeit, Elastomeigenschaften, Lackierbarkeit usw.)
- Hoher Qualitätsstandard durch moderne Anlagentechnik
- Exzellentes Oberflächenfinish
- Variable Farbgebung nach RAL
- Geringes Schwundmaß
- Einlegeteile
- Kontaktelemente sind möglich
- Glas- und Kohlefasernverstärkung
- Werkstoffkombinationen (hart, weich)
- Sonderformen: Polyamidguss
- Wachsguss für Feingussteile: Wachsauerschmelzverfahren

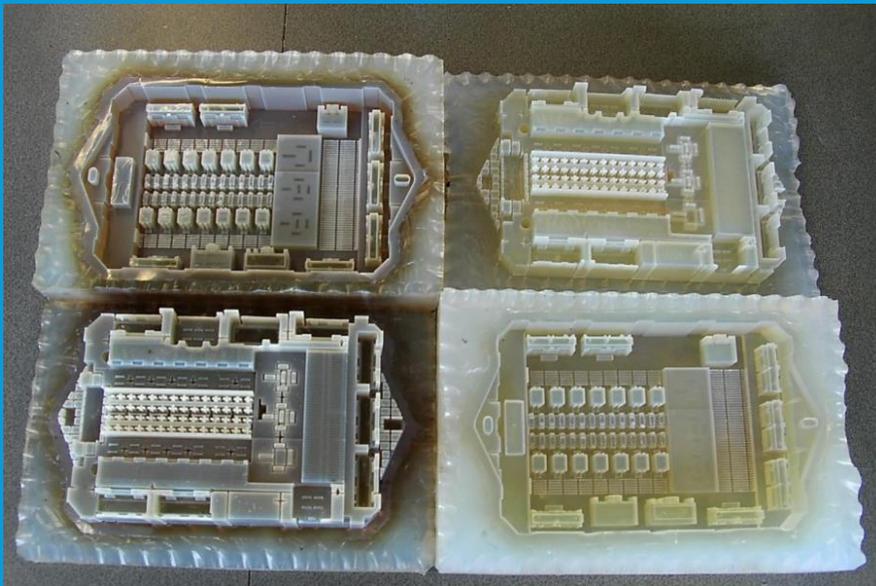
DAS URMODELL



- Genaues Abbild des zu fertigenden Teiles
- Additiv gefertigt
- Subtraktiv gefertigt
- Hybridmodell

Bild: Ganß Prototyping

DIE MATERIALIEN - GIEßWERKZEUG



Silikonwerkzeug
Elektronikgehäuse, vielfach geschlitzt, 2-tlg.

- RTV-Silikone
- Additionsvernetzend
- Präzise abbildend
- Füll-/Verstärkungsstoffe
- Hilfsstoffe
- Einlegeteile

Bilder: Ganß Prototyping

DIE MATERIALIEN - FORMTEILE

Technisches Gehäuse



Vaku-
gießteile

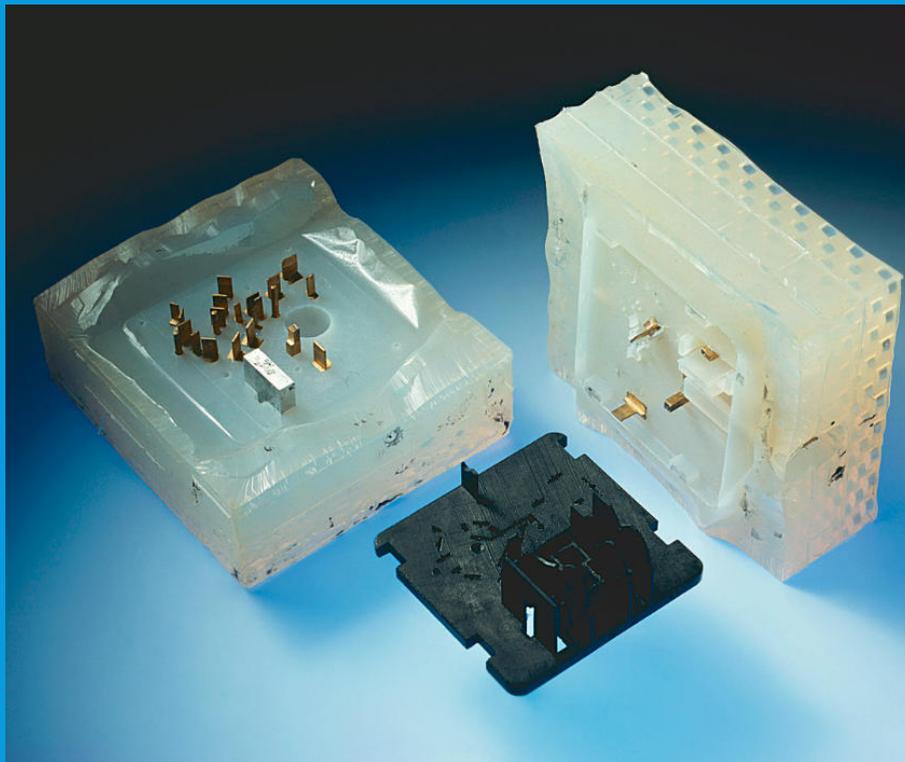
- PUR-Gießharze
- EP-Gießharze
- Silikon
- Wachs
- Füll-/ Hilfsstoffe

Bilder: Ganß Prototyping

DIE ANLAGENTECHNIK



VAKUUMGIEßEN - KOSTENRAHMEN

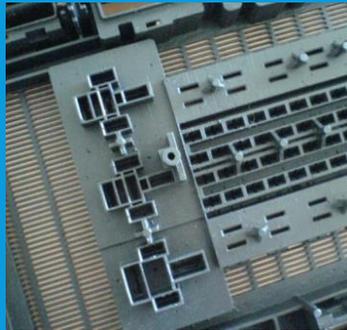


Stark abhängig von Größe und
Kompliziertheit der Formteile

- Formenpreis 100,- bis 3000,- €
- Teilepreis 5,- bis 250,- €
- Stückzahlen 1 bis 300 Stück

Bild: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Silikonwerkzeug
und PUR-Gießteil

Bilder: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



High-Speed-Kamera für Sportübertragungen



Bilder: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Bilder: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



STL-Modell mit
Einsätzen



Wachsling



Silikonform

Lüfterrad
Vorstufen für
Metall-
feinguss

Bilder: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Hochtemperaturbeständige (210°C) Teile

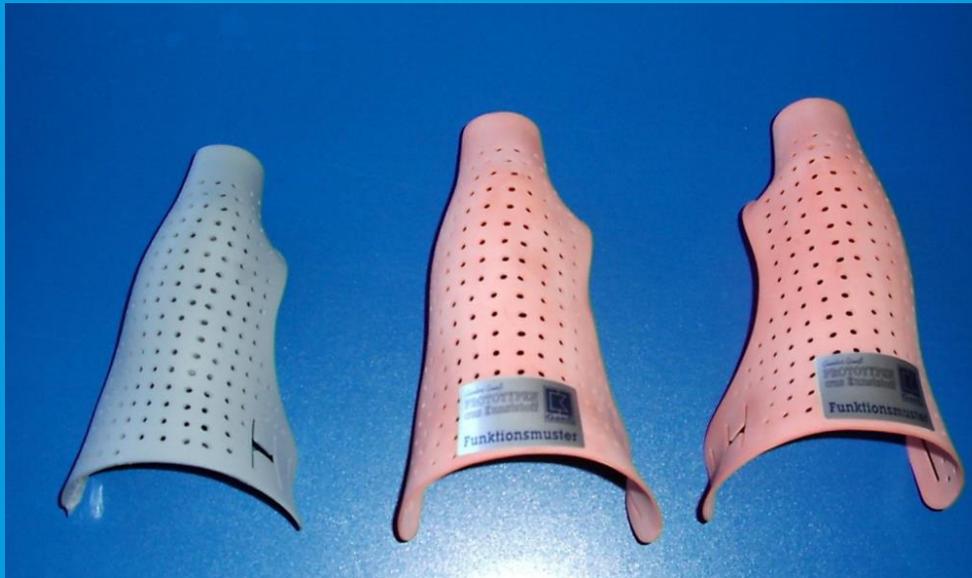


Elektrotechnik/
Elektronik



Bilder: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Orthesen

Bild: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE

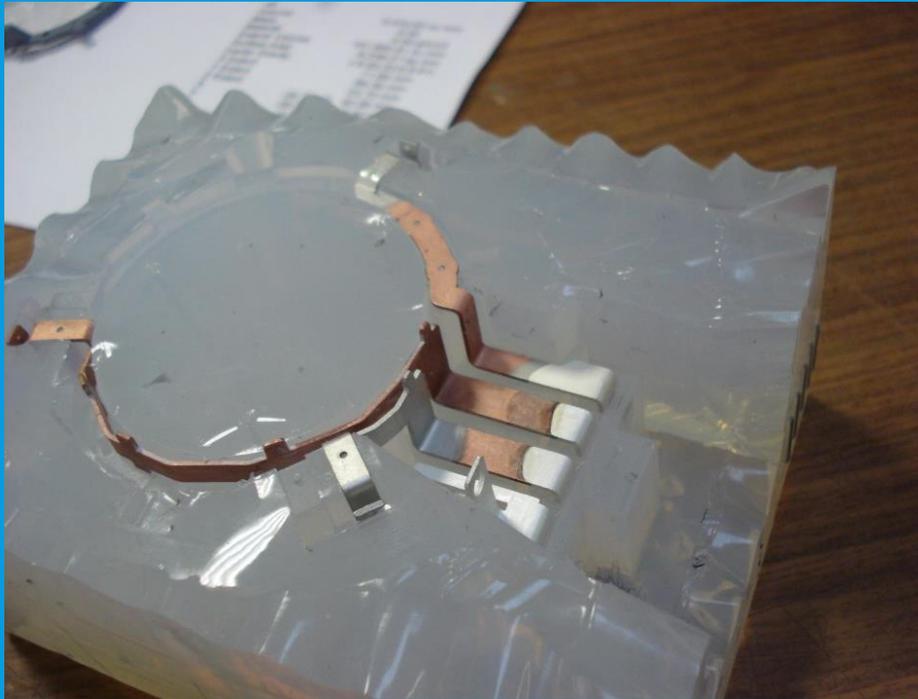


Membrandichtungen
0,2 mm dick



Bilder: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Kontakte als
Einlegeteile

Bild: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Urmodelle mit
Formkasten

Bild: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Gehäuseteile
Medizintechnik

Bild: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Automotive-Industrie

Bild: Ganß Prototyping

REFERENZPROJEKTE



Kosmetikindustrie

Bild: Ganß Prototyping

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

Dipl.-Ing. Günter Ganß
Ingenieurbüro für Kunststofftechnik Suhl
Am Lahnauer Platz 14
98716 Geraberg
Tel: 03677/869351
Mobil: 0175 8064658
Mail: g.ganss@online.de
www.prototypenbuero-ganss.de

Sektion 2

BIOMEDIZINISCHE APPLIKATIONEN

Untersuchungen zum 3D-Druck von porösen Calciumphosphat-basierten Hybrid-Scaffolds

Matthias Schnabelrauch

INNOVENT e.V. Jena

Kurzfassung

Untersuchungen zum 3D-Druck von porösen Calciumphosphat-basierten Hybrid-Scaffolds

Matthias Schnabelrauch¹, Sebastian Vogt, Gabriele Grimm¹, Thorsten Laube¹, Alaadien Khalyfa², Wolfgang Meyer², Annett Rechtenbach³, Peter Litschko⁴, Gerlind Schneider⁵, Sibylle Voigt⁵, Katja Otto⁵, Dirk Linde⁵, Antje Quade⁶, J. Barbara Nebe⁷, Claudia Bergemann⁷, Henrike Rebl⁷, Hermann Seitz⁸, Matthias Cornelsen⁸, Volker Weissmann⁹

¹INNOVENT e. V., Jena, ²Beckmann-Institut für Technologieentwicklung e. V., Chemnitz, ³Ernst-Abbe-Hochschule Jena, ⁴3di GmbH Jena, ⁵Universitätsklinikum Jena, ⁶Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. Greifswald, ⁷Universitätsmedizin Rostock, ⁸Universität Rostock, Institut für Polymer-technologien e. V., Wismar

Calciumphosphate werden auf Grund ihrer stofflichen und strukturellen Ähnlichkeit mit der mineralischen Phase des humanen Knochens und ihrer osteokonduktiven Eigenschaften seit langem als Implantatmaterialien im Hartgewebereich eingesetzt. Während diese Materialien in der Vergangenheit zumeist als Granulate, aushärtbare Zemente oder vorgefertigte Formkörper mit einfacher Geometrie in der Klinik verfügbar waren, sind in zunehmendem Maße auch patientenspezifische Implantate mit individuell angepasster Form und Strukturierung in der Entwicklung. Unter diesem Gesichtspunkt stellen wir unsere eigenen Arbeiten zur Entwicklung von Pulver-Binder-Systemen vor, die in einem herkömmlichen 3D-Druckverfahren zu stabilen dreidimensionalen Formkörpern mit vorgegebener Geometrie verarbeitbar sind. Die dabei zum Einsatz kommenden Pulver-Binder-Systeme beinhalten Pulver auf der Basis von reaktivem Tetracalciumphosphat und entsprechenden Mischungen mit weiteren Füllstoffen sowie Systeme auf der Basis von Tri-Calciumphosphat-Pulvern, die mit unterschiedlichen Binderflüssigkeiten verdrückt werden. Als wesentlicher Verfahrensschritt werden dabei unterschiedliche Nachbehandlungsverfahren der gedruckten Formkörper getestet und auf ihren Einfluss hinsichtlich der Applikationseigenschaften evaluiert.

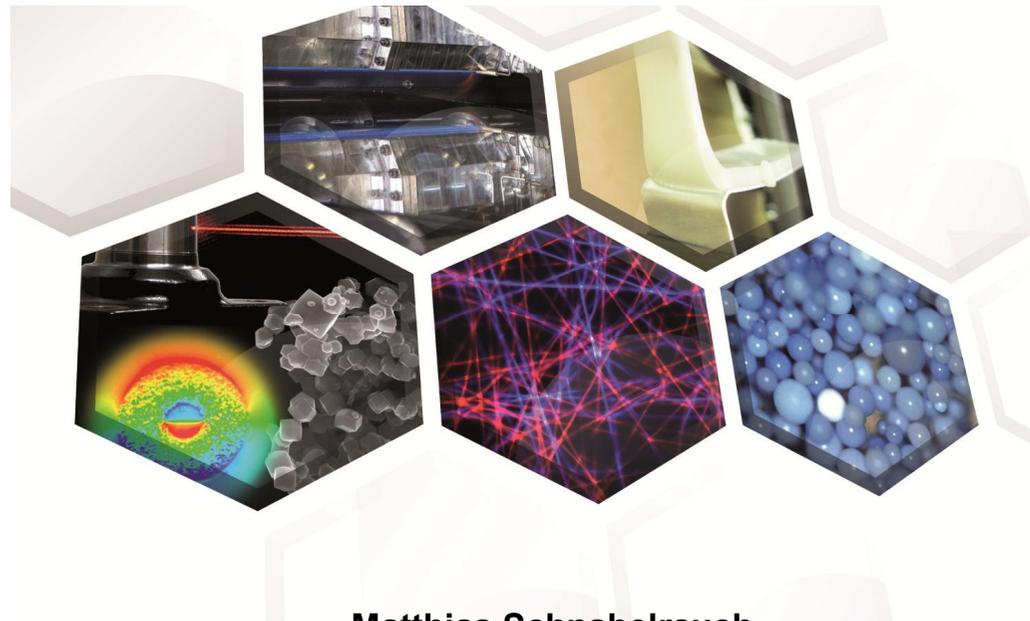
Ein Vorteil der durch Pulver-Binder-Druck herstellbaren Objekte ist ihre interkonnektierend poröse Struktur, die das Einwachsen von Zellen in die Strukturen prinzipiell ermöglicht und damit für eine optimale Integration im umgebenden Gewebe sorgen kann. Hier werden eigene Arbeiten zur Durchdringung 3D-gedruckter Strukturen durch Knochenzellen in Abhängigkeit von den Dimensionen und der Zusammensetzung der gedruckten Strukturen vorgestellt.

INNOVENT e. V.

· Industrieforschungseinrichtung

· Gründung 1994

UNTERSUCHUNGEN ZUM 3D-DRUCK VON CALCIUMPHOSPHAT-BASIERTEN HYBRIDSCAFFOLDS



Matthias Schnabelrauch

INNOVENT e. V., Forschungsbereich Biomaterialien, D-07745 Jena, Germany

Grenz- und Oberflächentechnik

· Biomaterialien

· Magnetische und optische Systeme

· Analytik

KOAUTOREN UND DANKSAGUNG



Dr. Sebastian Vogt,
Gabriele Grimm,
Dr. Thorsten Laube



Prof. Barbara Nebe,
Dr. Claudia Bergemann
Dr. Henrike Rebl



DI Alaadien Khalyfa,
Dr. Wolfgang Meyer



Prof. Hermann Seitz,
DI Matthias Cornelsen



Dr. Annett
Rechtenbach



OÄ Dr. Gerlind
Schneider,
DB Sibylle Voigt,
MSc Katja Otto,
DB Dirk Linde



DI Peter Litschko



Dr. Volker Weissmann



Dr. Antje Quade



REKONSTRUKTION VON KNOCHENDEFEKTEN

GOLDSTANDARD

Autogenes Knochenmaterial

NACHTEILE

- Menge und Verfügbarkeit von autogenem Knochenmaterial begrenzt
- zwei Eingriffe erforderlich
- signifikantes Risiko des Auftretens von Komplikationen an der Donorstelle (Infektionen, Frakturgefahr, Schmerzen)
- unvorhersehbare Resorptionserscheinungen



EINSATZ VORGEFERTIGTER HARTGEWEBEIMPLANTATE

- Anpassung an Knochendefekte durch mechanische Bearbeitung (schwierig bei porösen keramischen Werkstoffen) oder Modellieren während der Operation (Zeitfaktor, limitierte Aushärtezeit)
- Gerichtete Porenstruktur und Porendurchmesser im Implantat schwer zu erzielen

MÖGLICHER LÖSUNGSWEG

Herstellung patientenspezifischer Implantate komplexer Geometrie

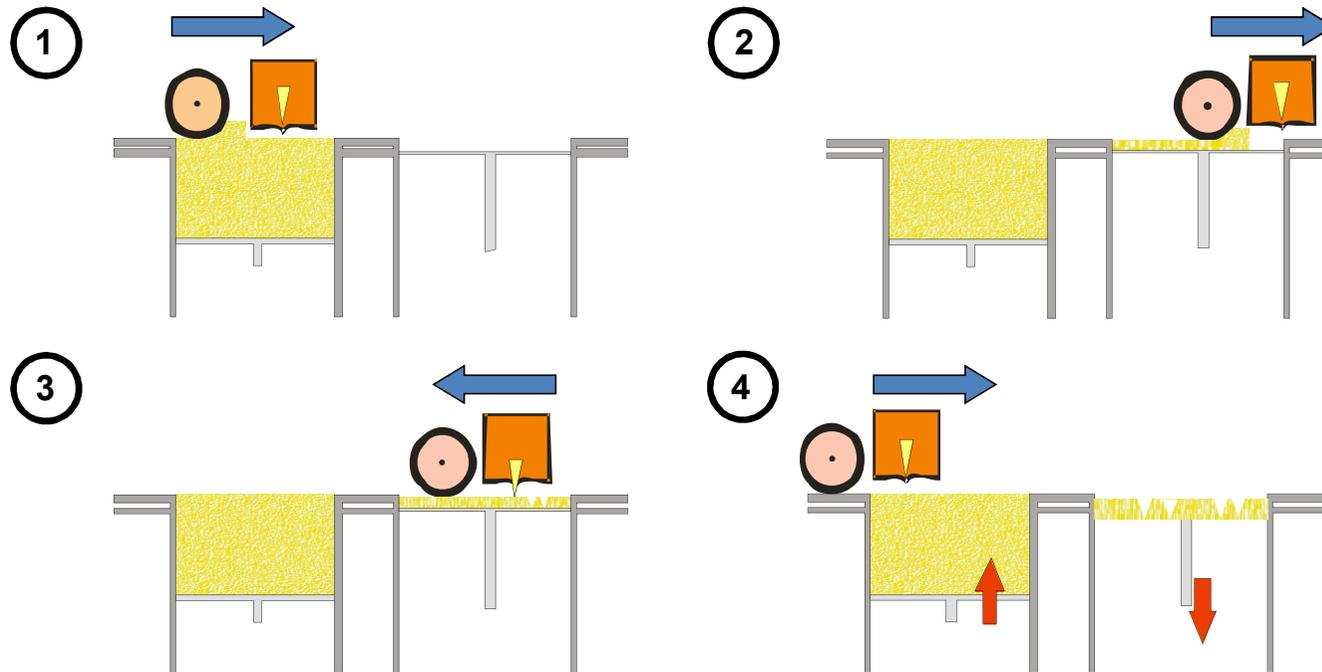


ADDITIVE MANUFACTURING
(3D-PRINTING)

4



PULVER-BASIERTER 3D-DRUCK



INNOVENT e. V.

M. Cima et al. (MIT), 1989, US 5340656

5



MATERIALIEN FÜR DEN 3D-DRUCK VON KERAMIKEN

- Unterschiedliche Materialsysteme (Metalle, Keramiken, Polymere, Komposite)
- Allgemeine Materialanforderungen:
 - Gleichmäßige Pulverschichten (enge Partikelgrößenverteilung, **ideale Partikelgrößen im Bereich von 15–35 µm**)
 - Schnelle Aushärtereaktion zwischen Binderflüssigkeit und Pulverpartikeln (**maximal 1 – 2 min**);
 - Aushärtung kann initiiert werden durch Quellung einer polymeren Partikelbeschichtung oder eine chemische Reaktion zwischen Binderflüssigkeit und Partikel.



REAKTIVE ZEMENT SYSTEME FÜR DEN INKJET-DRUCK

PULVER	BINDER	NACHBEHANDLUNG	ENDPRODUKT
$\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ¹⁾	10% H_3PO_4	-	Nicht analysiert (wahrscheinlich Brushit)
$\alpha/\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ²⁾	5–30% H_3PO_4	Nachhärtung (3 × 30 s in 20% H_3PO_4)	Brushit mit Resten von $\alpha/\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
$\alpha/\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ²⁾	5–30% H_3PO_4	1100-1300 °C	Calciumpyrophosphat (> 350 °C) CPP/TCP-Glasphase > 1280°C
Hydroxylapatit (HA) ³⁾	Wasser- basierend	1300 °C, 1-5 h	HA
$\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$ / ⁴⁾ $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	25% Zitronen- säure	a) Sintern (1400 °C, 6 h) b) Infiltration mit Meth- acrylat und Aushärtung	HA + $\beta\text{-TCP}$ (+ CaO)
6 Na_2O , 12 K_2O , 5 MgO , ⁵⁾ 20 CaO , 4 P_2O_5 , 53 SiO_2	Wasser- Glycerin (7:1)	625-1100 °C	Bioglas (kristallin > 750°C)
$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$ ⁶⁾ (+ gelatinized starch)	Wasser- basierend	80°C in 1 M Na_2HPO_4 , 4–24 h	Ca-defizient HA

¹⁾A. Butscher et al. *Acta Biomater.* 2012, 8, 373, ²⁾U. Gbureck et al. *J. Mater. Sci. Mater. Med* 2008, 19: 1559, ³⁾J. Suwanprateeb et al. *Mater. Sci. Eng.* 2010, C 30: 610; ⁴⁾A. Khalyfa et al. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2007, 18: 909; ⁵⁾R. Meszaros et al. *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol.* 2011, A 52: 111; ⁶⁾J. Suwanprateeb et al. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2010, 21: 419

INNOVENT e. V.

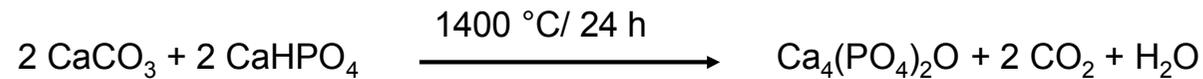
E. Vorndran et al. *MRS Bulletin* 2015, 40: 127

7



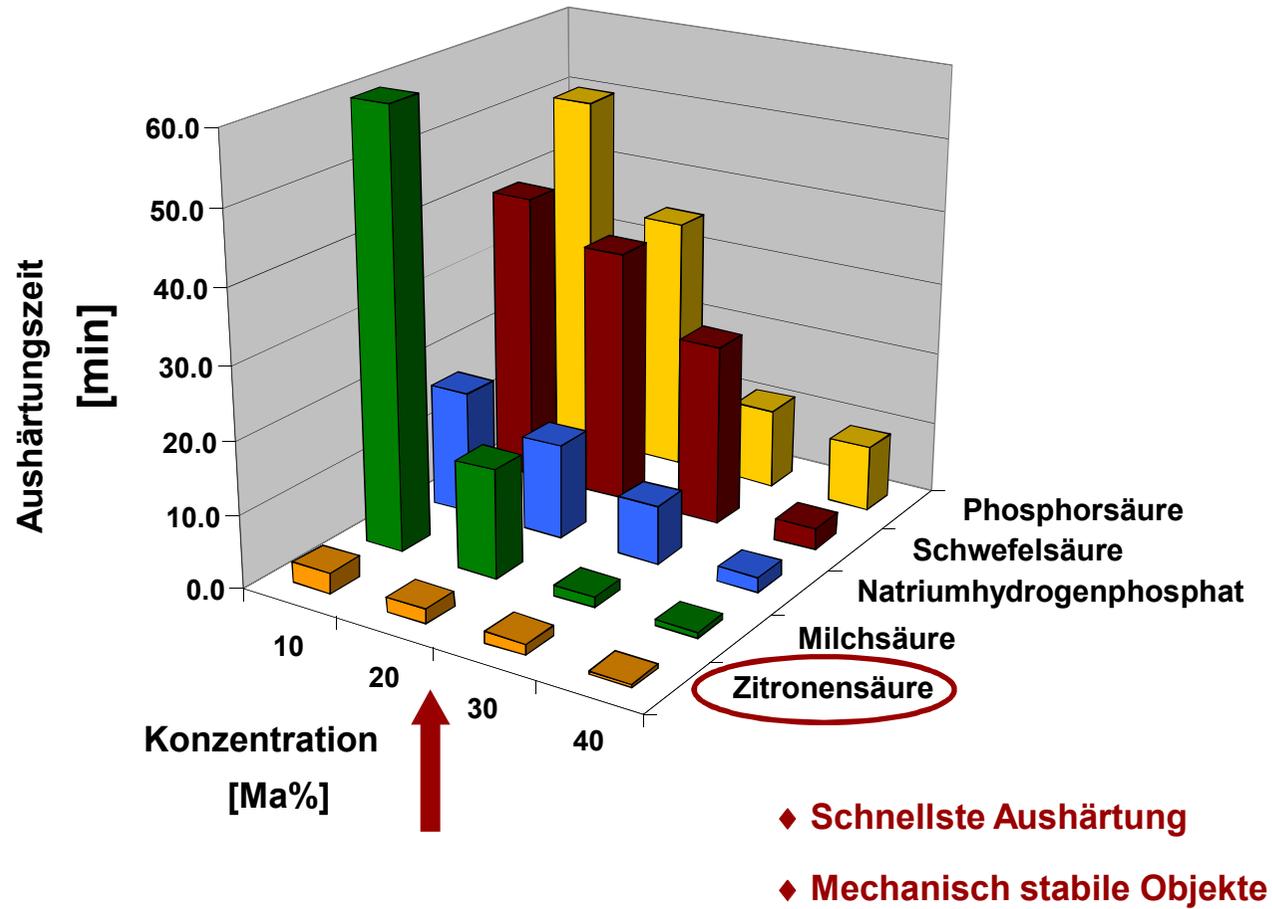
SYNTHESE VON TETRACALCIUMPHOSPHAT

- Tetracalciumphosphat ist reaktive Komponente zahlreicher anorganischer Knochenzemente
- Aushärtung kann durch Säuren katalysiert werden
- Synthesis nach Brown und Chow (*Cements Research Progress*, 1987, 352):



- Ausbeute: 98-99 %
- Zusammensetzung:
 - Calcium: ber. 43,8 Ma%, gef. 43,0 Ma%
 - Phosphate: ber. 51,8 Ma%, gef. 52,2 Ma%

AUSHÄRTUNG VON TETRACALCIUMPHOSPHAT





TETRACALCIUMPHOSPHAT-FÜLLER MISCHUNGEN

- Substitution von Tetracalciumphosphat (TP) durch biokompatible und resorbierbare Füllstoffe unter Erhalt der Druckfähigkeit

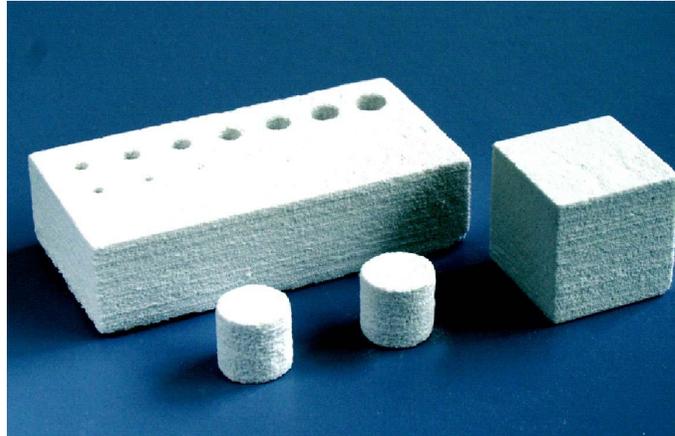
Füllstoff/TP - Verhältnis [Ma% / Ma%]		80/20	70/30	60/40	40/60	20/80
β-TCP/TTCP	Aushärtung	+	+	+	+	+
	Formstabilität	+	+	+	+	+
HA/TTCP	Aushärtung	-	-	+	+	+
	Formstabilität	-	-	+	+	+
CS/TTCP	Aushärtung	+	+	+	+	+
	Formstabilität	+	+	+	+	+

(+) Aushärtung; Stabilität ausgehärteter Proben (-) keine Aushärtung, gehärtete Proben nicht stabil

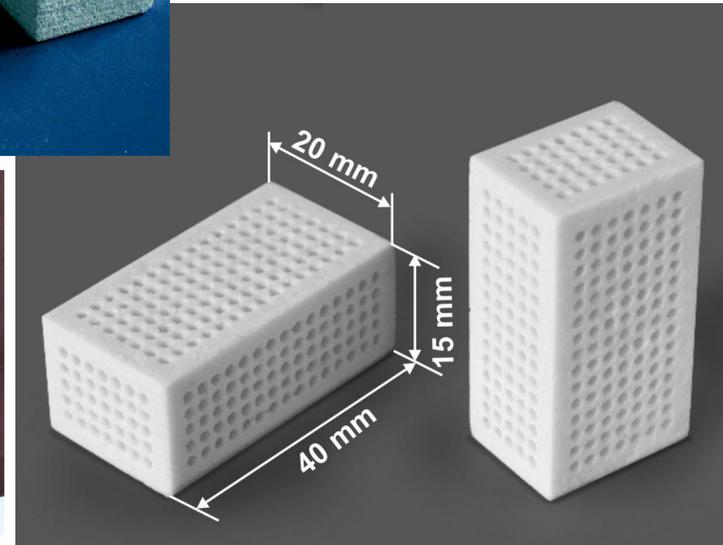
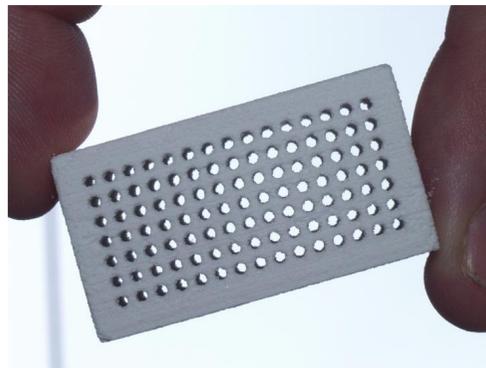
TTCP: Tetracalciumphosphat HA: Hydroxyapatit TCP: β-Tricalciumphosphat

CS: Calciumsulfate-dihydrate

DRUCKEN VON REGULÄREN CaP-BASIERTEN STRUKTUREN



- Minimaler Kanaldurchmesser: 0.5 mm
- Minimaler Kanalabstand: 0.5 mm



INNOVENT e. V.

A. Khalyfa et al. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2007, 18: 909

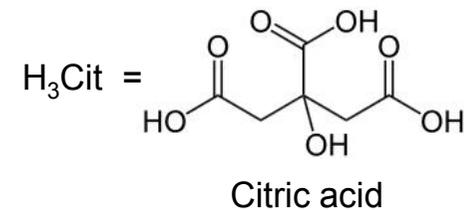
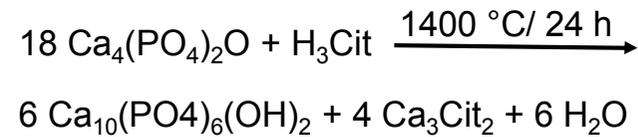
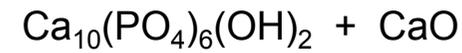
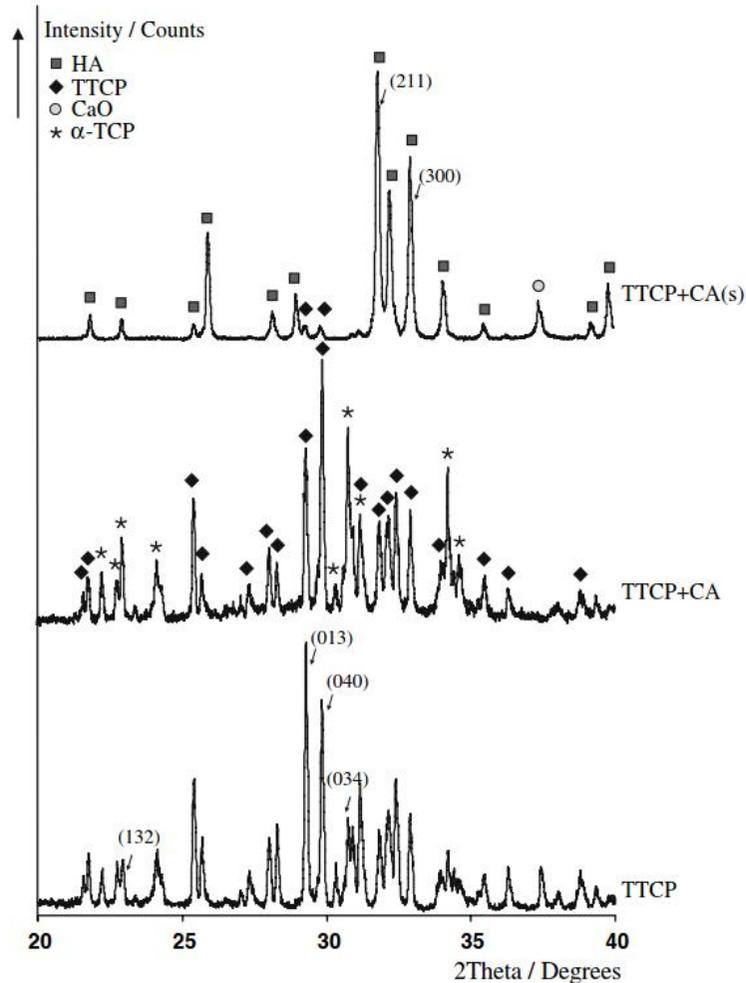
11

DRUCKEN VON KOMPLEXEN STRUKTUREN





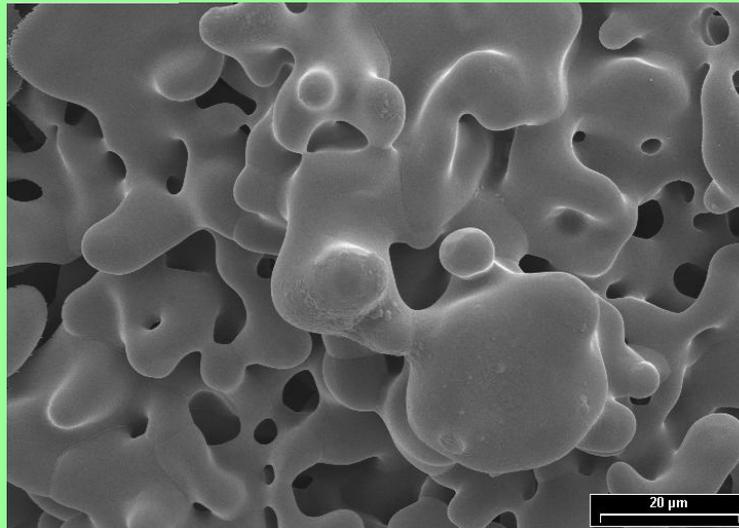
ZUSAMMENSETZUNG GEDRUCKTER UND GESINTETER PROBEN



NACHBEHANDLUNG VON CaP-GEDRUCKTEN PROBEN

ZIEL

- Erhöhung der Druckfestigkeit
- Verbesserung der Abriebfestigkeit



- REM einer gedruckten und gesinterten Probe

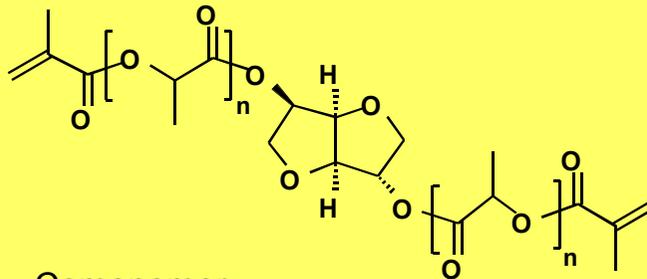
SINTERN

- Sintern bei Temperaturen von 1200-1400 °C
- Problem der Schrumpfung (~ 15 %)
- Neutralisation mit verdünnter Phosphorsäure

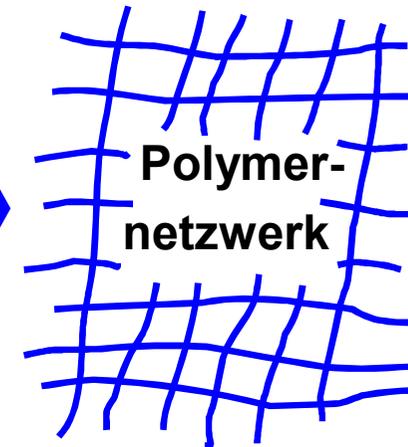
INFILTRATION/BESCHICHTUNG CaP-GEDRUCKTER PROBEN

- Oligolactid-Makromer

Dianhydro-D-glucitol-bis-[(oligo-L-lactyl)-methacrylat]



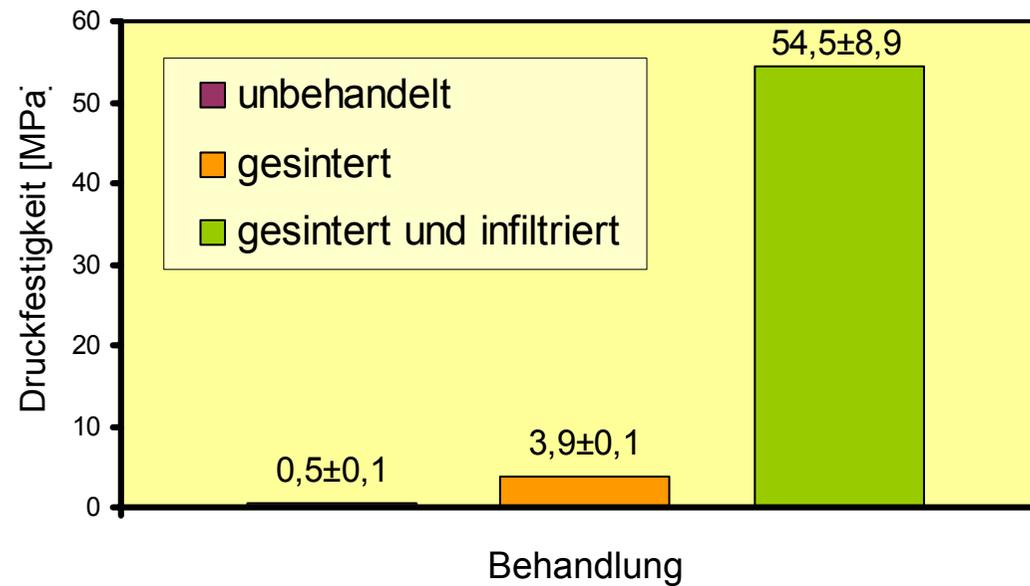
- Comonomer
Methacrylsäure-2-hydroxyethylester
- Initiator
Dibenzoylperoxid



INFILTRATION

- Verwendung eines flüssigen, radikalisch aushärtbaren Makromers
- Infiltration ohne Verschluss der Makroporen
- Polymerisation bei 110°C/1 h

DRUCKFESTIGKEIT NACHBEHANDELTEN PROBEN



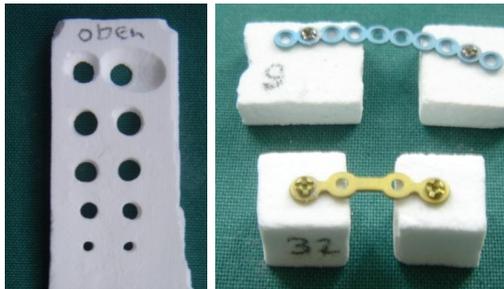
- Sinterung: 1400 °C/ 6h, Aufheizrate: 200K/h



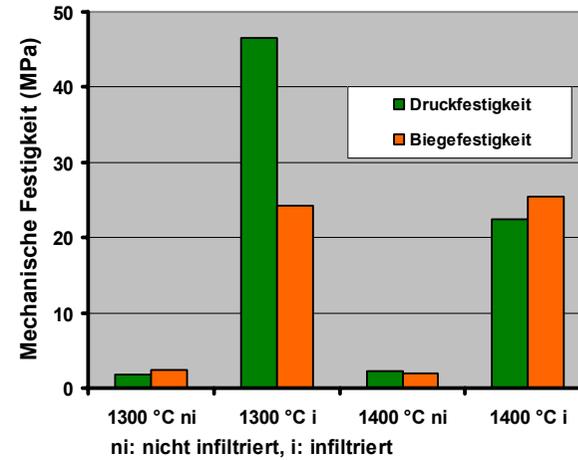
3D-INKJET PRINTING OF β -TRICALCIUM PHOSPHATE

➤ Komponenten

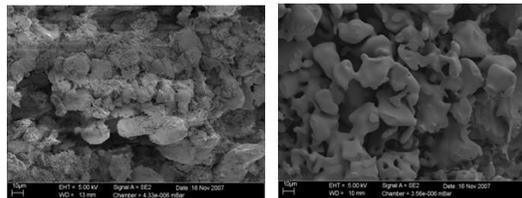
- Pulver: β -Tricalciumphosphat (Partikelgröße < 100 μm)
- Binder: 25 Ma% wäss. Weinsäure



➤ Mechanische Festigkeit



➤ REM

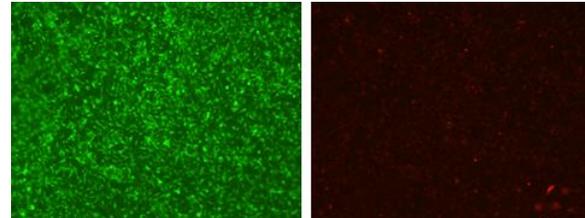


Nicht gesintert

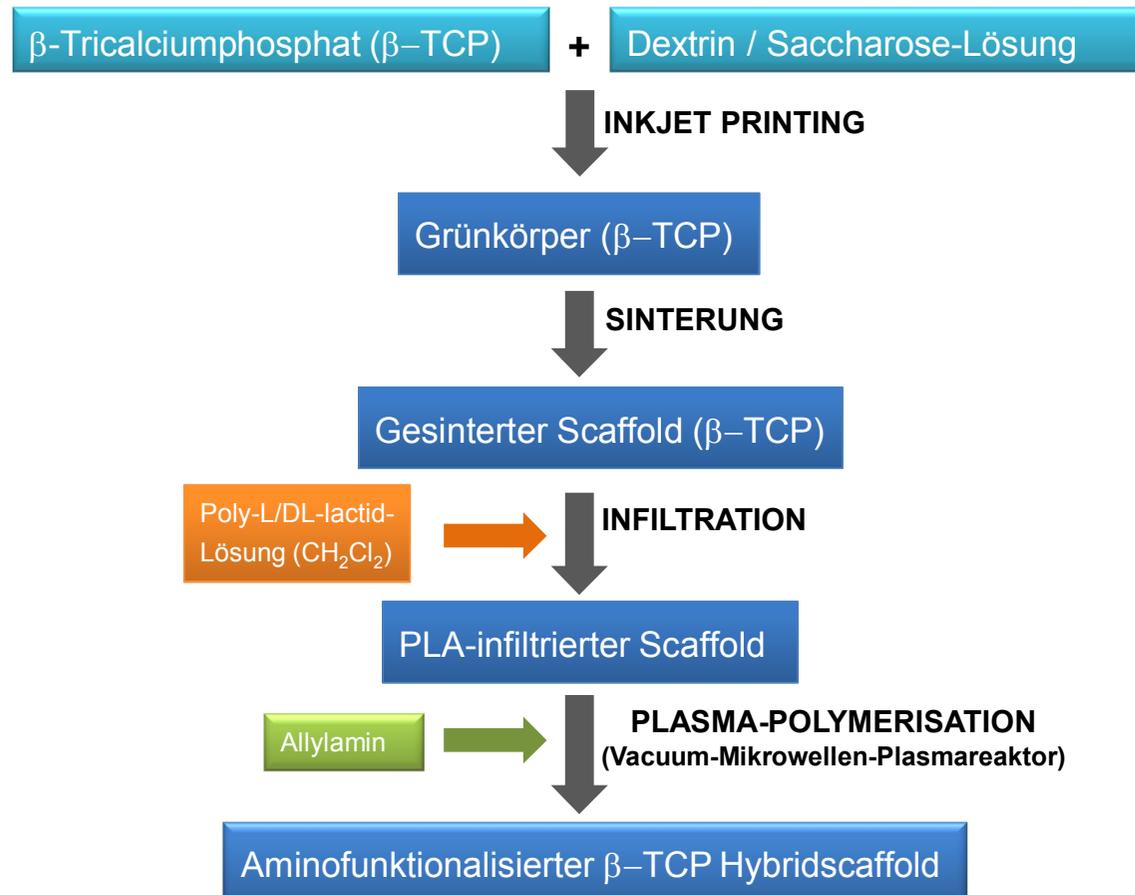
Gesintert
(1300 °C, 3 h)

➤ In vitro-Cytocompatibilität

- Tot/lebend-Färbung (FDA/GelRed)



OBERFLÄCHEN-FUNKTIONALISIERTE β -TCP-HYBRIDSCAFFOLDS

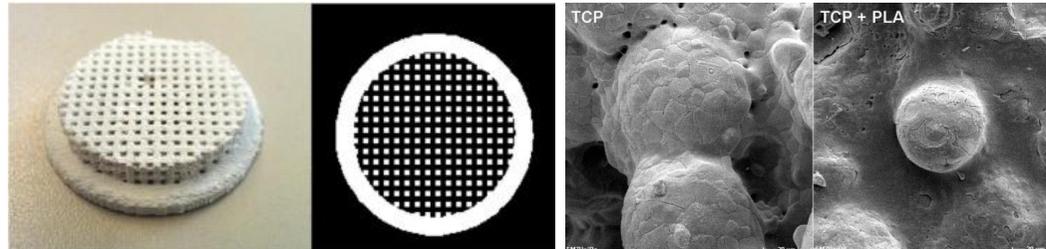


SCAFFOLD-CHARAKTERISIERUNG - GEDRUCKTES 3D-MODELL

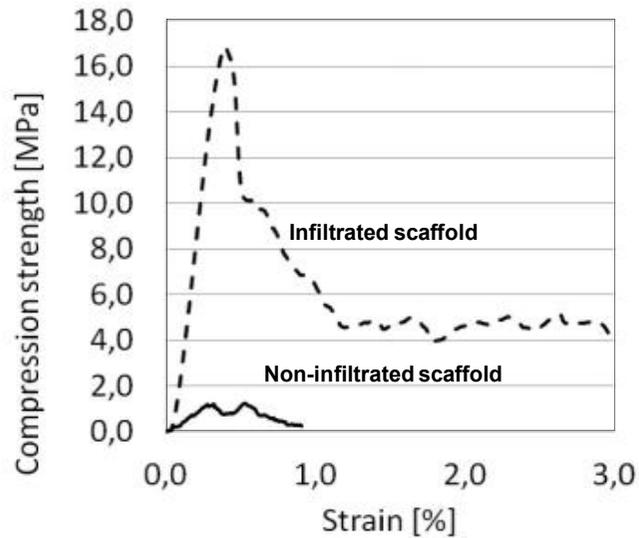


➤ Scaffolds

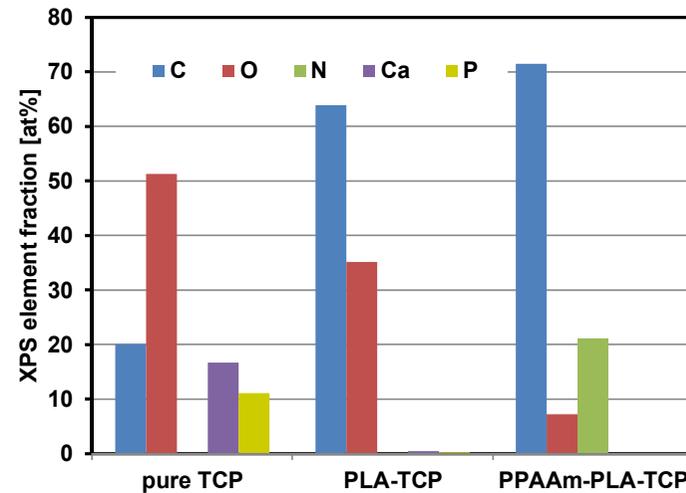
- quadratische Poren (500 µm Durchmesser)
- Interkonnektierend



• Druckfestigkeit



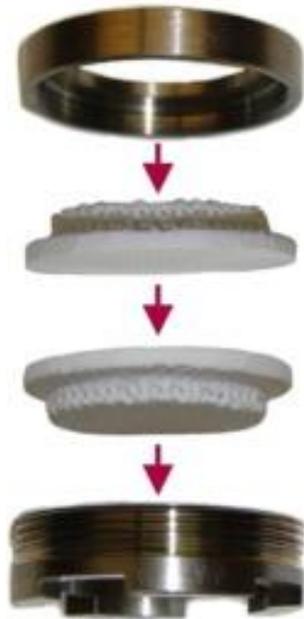
• XPS Analyse



3D-MODEL ZUR NICHTDESTRUKTIVEN ANALYSE VON ZELLEN



1. Fixieren



2. Besiedlung und Perfusionskultur

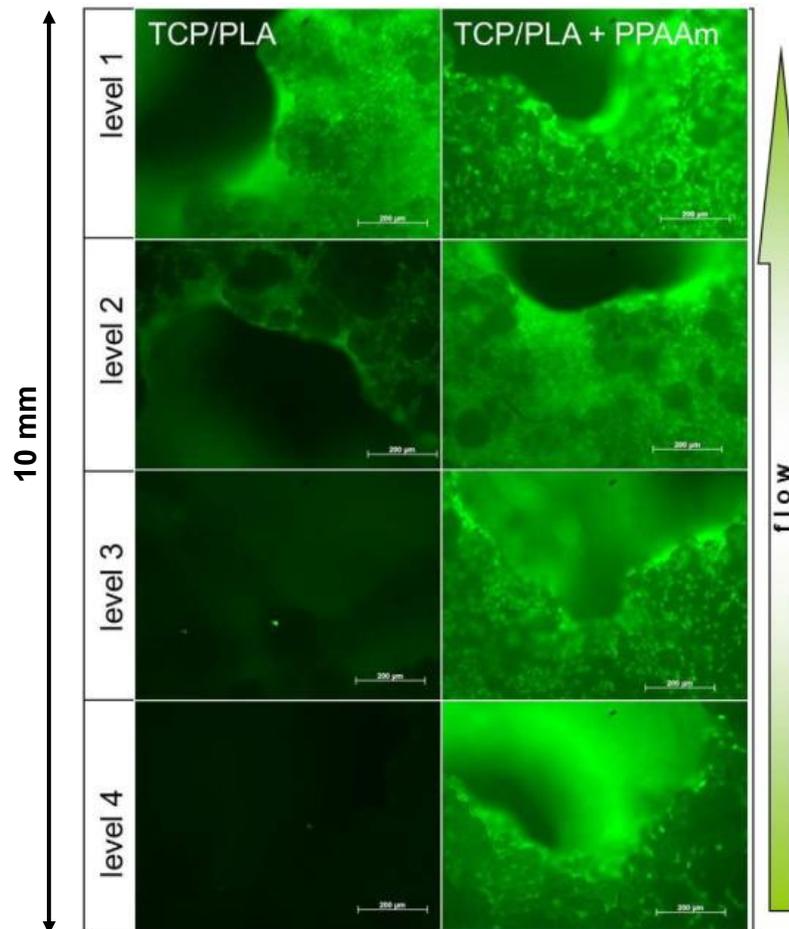


3. Demontieren und Analyse



Scaffold dimensions: 28 x 5 mm

ZELLBESIEDLUNG DER HYBRIDSCAFFOLDS



PROZEDUR

- Kultivierung von MG-63 Osteoblasten-Zellen im Perfusionsreaktor für 14 d (Besiedlung von Level 1).
- Analyse der Zellzahl und Zellvitalität durch Tot/lebend-Färbung und Fluoreszenzmikroskopie

ERGEBNISSE

- Auf TCP/PLA Scaffolds ohne PPAAm-Behandlung proliferieren Zellen hauptsächlich auf Level 1
- Zellbesiedlung auf Hybridscaffold ist deutlich verbessert durch PPAAm-Beschichtung (Zellen migrieren auf Level 2 bis 4 während Kultivierungsdauer von 14 d.



ZUSAMMENFASSUNG

- Pulver-Binder-3D Druck ist ein geeignetes Verfahren zur Herstellung Patienten-spezifischer Implantat- und Scaffoldstrukturen aus kermischen Materialien
- Verschiedene medizinisch relevante Pulver-Binder-Systeme sind gegenwärtig verfügbar
- Ein allgemeines Problem besteht in den oft geringen mechanischen Festigkeiten porösen oder filigraner 3D-gedruckter Objekte
- Für die meisten Anwendungen ist daher eine Nachbehandlung der Grünkörper durch Sinterung, Polymerinfiltration oder Beschichtung sinnvoll bzw. erforderlich
- Auf CaP-basierende Implantate zeichnen sich in der Regel durch eine hohe Zellverträglichkeit und teilweise Resorbierbarkeit aus.
- Das Einwachsen von Zellen in poröse, gedruckte Strukturen ist möglich, bedarf aber einer zusätzlichen Stimulierung



Forschungsbereich Biomaterialien

Dr. Matthias Schnabelrauch

INNOVENT e. V.

Prüssingstrasse 27B

D-07745 Jena

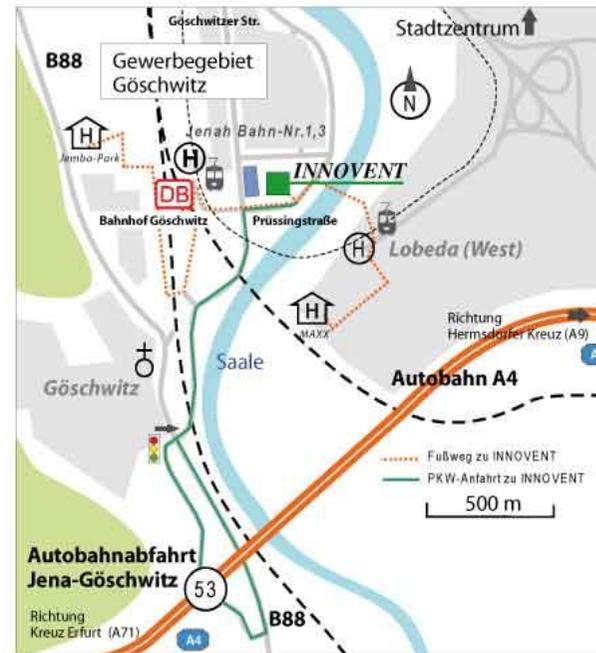
Deutschland

Phone: +49 3641 282512

Fax: +49 3641 282530

E-Mail: ms@innovent-jena.de

Web: www.innovent-jena.de



Herausforderungen und Ansätze für die Verarbeitung von Hydrogelen mit generativen Verfahren

Johannes Rost

Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.

Kurzvita Johannes Rost

- 2016-heute Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungs- und Transferzentrum e.V. an der HTWK Leipzig
- 2014-2016 Programmierung und MSR für Sondermaschinen bei PTL GmbH, Leipzig
- 2011-2013 Projektingenieur Hydraulik für Sondermaschinen bei PTL GmbH, Leipzig
- 2011 Abschluss Master-Studium „Maschinenbau, Profillinie Mechatronik“ an der HTWK Leipzig
- 2009 Abschluss Bachelor-Studium „Maschinenbau“ an der HTWK Leipzig

Abstract Vortrag „Herausforderungen und Ansätze für die Verarbeitung von Hydrogelen mit generativen Verfahren“ zum 4. Mitteldeutschen Forum „3D-Druck in der Anwendung“

Johannes Rost¹, Tobias Flath², Caroline Kohn-Polster³, Jan Krieghoff³, Michael C. Hacker³, Fritz Peter Schulze²

Mit der Entwicklung der Rapid Prototyping Technologie sind Ingenieure in der Lage, Gegenstände mit fast beliebiger geometrischer Form aus vielen verschiedenen Werkstoffen zu fertigen, um in kurzer Zeit Anschauungsmodelle, konkrete Serienteile oder Ersatzteile herstellen zu können. Diese Herstellungstechnologien finden auch in der Implantologie, Regenerativen Medizin und im Tissue Engineering Einsatz, um Gewebe (tissue) herzustellen und damit die Heilung und Regeneration von Schädigungen am Körper zu initiieren und zu unterstützen.

Dem „Eurotransplant Annual Report 2015“ der europäischen Vermittlungsstelle für Organspenden ist zu entnehmen, dass es für Herz, Lunge, Leber, Nieren, Bauchspeicheldrüse aktuell einen Überschuss an Patienten auf der Warteliste gegenüber entsprechend verfügbaren passenden Spenderorganen gibt [1]. Eine weitere Motivation ist der Einsatz von künstlich hergestelltem Gewebe für die Untersuchung der Wirkung von Medikamenten und allgemein Werkstoffen/Umwelteinflüssen auf organisches Gewebe bei Kontakt [2].

Im aktuellen Forschungsprojekt „Multikanalröhrchen zur peripheren Nervenregeneration“ wird in Zusammenarbeit mit der Firma axis GmbH und der Pharmazeutischen Technologie der Universität Leipzig eine Möglichkeit untersucht, die Regeneration nach Nervenschäden durch ein speziell gestaltetes Hydrogel-Implantat zu verbessern. Die Motivation dahinter sind die über 200.000 Operationen an Nervendefekten allein in den USA [3], die jährlich durchgeführt werden und nur teilweise Heilungserfolge vorweisen [4].

Im Tissue Engineering gibt es die folgenden Funktions-Anforderungen an das Material, aus dem das Gewebe gefertigt wird [5]:

- Bioabbaubar, in gleicher Weise wie Zellwachstum
- Frei von zellschädigenden Stoffen
- Kein Hervorrufen von Immunreaktionen
- Zellhaftung und –wachstum fördernd
- Mechanische Beschaffenheit wie das zu ersetzende Gewebe
- Austausch von chemischen Boten-, Nähr- und Abfallstoffen

¹ Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V. an der HTWK Leipzig, 04277 Leipzig

² HTWK Leipzig, Fakultät Maschinen- und Energietechnik, Postfach 30 11 66, 04251 Leipzig

Email: peter.schulze@htwk-leipzig.de

³ Institut für Pharmazie, Pharmazeutische Technologie, Universität Leipzig, 04317 Leipzig

Sektion 2 Biomedizinische Applikationen

Hydrogele können diese Anforderungen erfüllen [5, 6], lassen sich jedoch nicht sofort ohne weiteres mit herkömmlichen Verfahren in eine definierte geometrische Form bringen [5]. Dabei sind nach [7] die in Abbildung 1 dargestellten Zusammenhänge zwischen Verarbeitungsparametern und daraus resultierenden geometrischen und biologischen Eigenschaften bei Hydrogelen zu beachten.

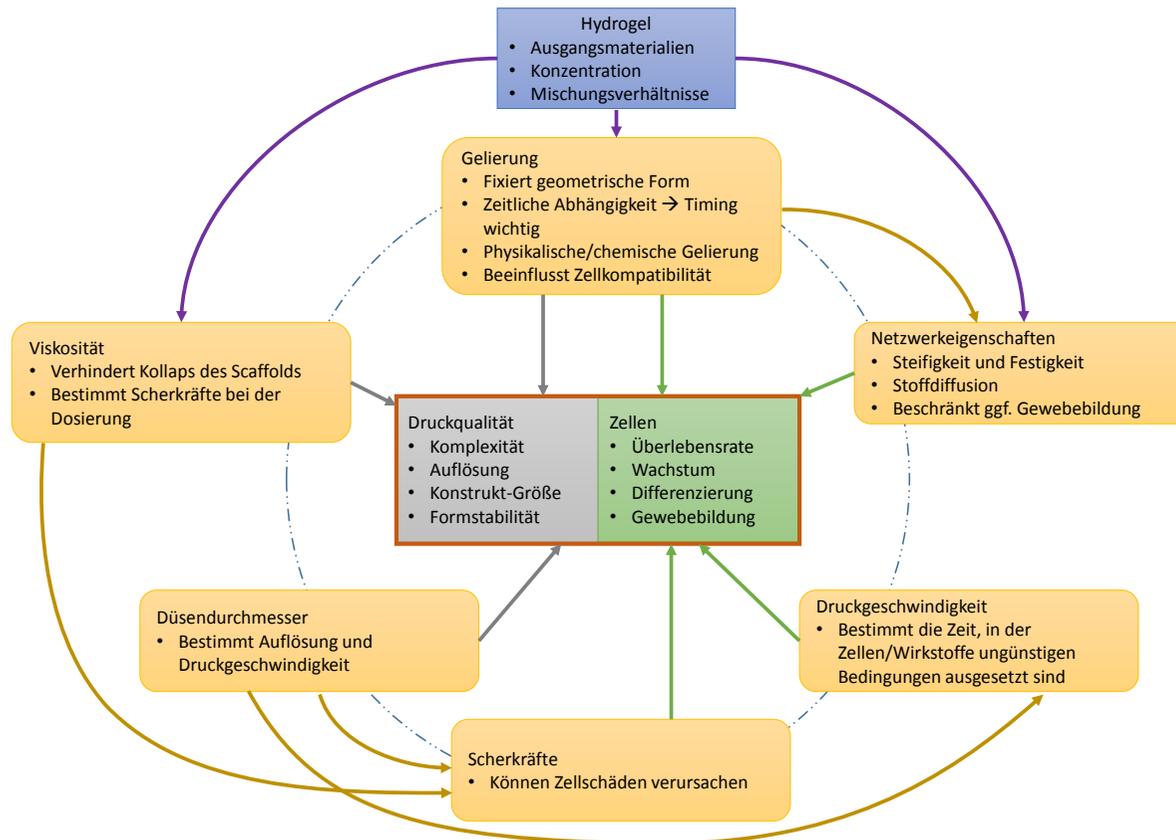


Abbildung 1: Zusammenhänge zwischen Hydrogel-Zusammensetzung und Verarbeitungsparametern und deren Einfluss auf Scaffold-Eigenschaften, nach [7]

Daraus resultierend stehen die Anwender bei der Wahl und Weiterentwicklung von Verarbeitungsverfahren für Hydrogele vor besonderen Herausforderungen. Aufgrund der vielfältigen Eigenschaften und Ausprägungen von Hydrogelen existiert ein breites Spektrum an Verfahren zur Herstellung von 3D-Gewebestrukturen. Sie lassen sich wie folgt kategorisieren [5, 7]:

- Extrusionsbasiert
- Tröpfchenbasiert
- Laserbasiert

In Abbildung 2 bis Abbildung 4 sind schematisch einige ausgewählte Verfahren und Lösungen zur Herstellung von 3D- Hydrogel-Scaffolds aus der Recherche zum Stand der Technik aufgeführt.

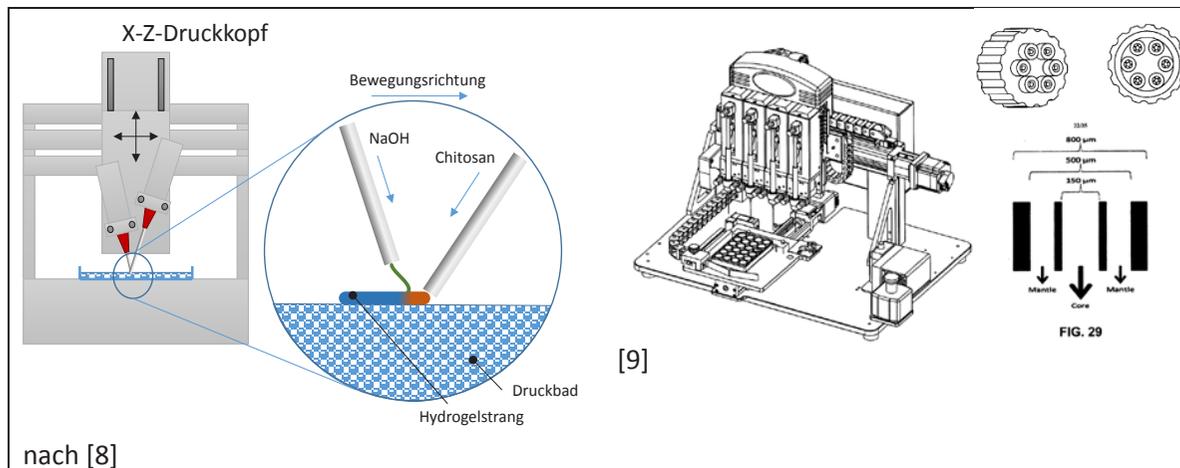


Abbildung 2: Extrusionsbasierte generative Verfahren zur Verarbeitung von Hydrogel, schematische Darstellung

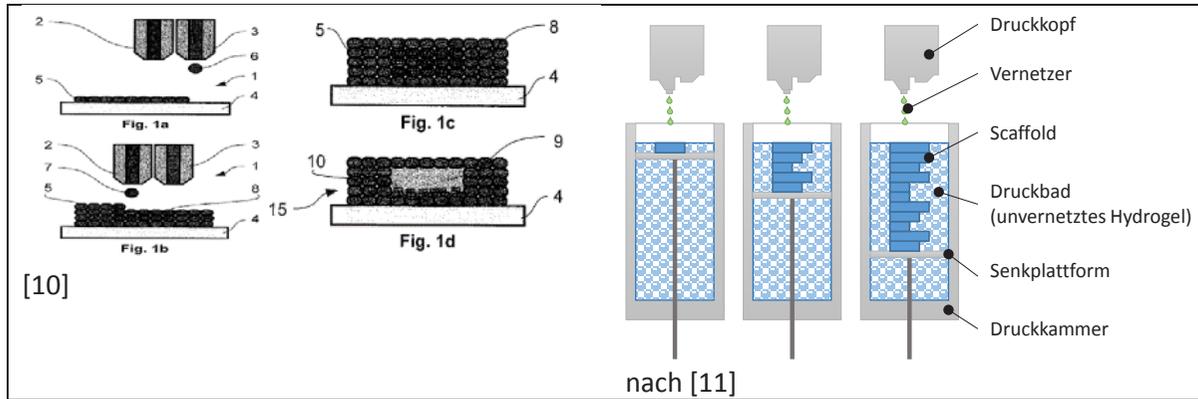


Abbildung 3: Tröpfchenbasierte generative Verfahren zur Verarbeitung von Hydrogel, schematische Darstellung

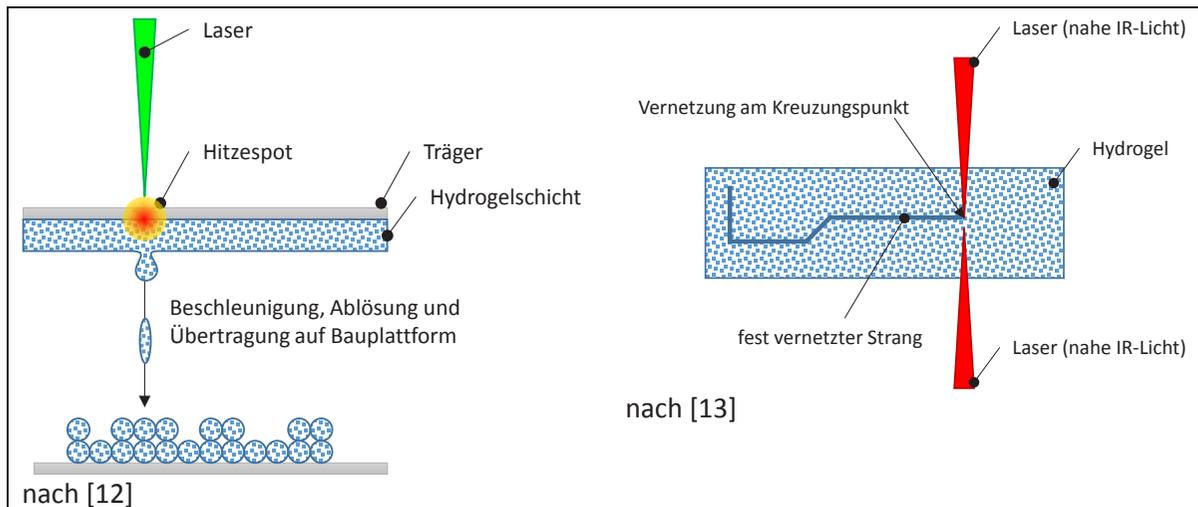


Abbildung 4: Laserbasierte generative Verfahren zur Verarbeitung von Hydrogel, schematische Darstellung

Die große Anzahl an Forschungsarbeiten und der damit zusammenhängende Bedarf an möglichst universellen Verarbeitungsgeräten hat zur Entwicklung einiger kommerzieller Maschinen geführt, z.B.:

- BioScaffolder, Firma SYS+ENG (CH)
- BioAssemblyBot, Firma Advanced Solutions (USA)
- 3D Bioplotter, Firma EnvisionTEC (GER)
- Autodrop Compact, Firma Microdrop Technologies (GER)

Für das Forschungsprojekt im Forschungs- und Transferzentrum e.V. an der HTWK Leipzig wurde ein extrusionsbasiertes Verfahren für die Verarbeitung des speziellen Hydrogels des Kooperationspartners Pharmazeutische Technologie (Uni Leipzig) ausgewählt. Nach Anpassung der Eigenschaften, Zusammensetzung und Verarbeitungsparameter ist eine Scaffold-Herstellung möglich. Für den Einsatz als Implantat werden verschiedene Geometrien und Strukturen entwickelt, deren Eignung mit dem ausgewählten Material im Rahmen des Forschungsprojektes noch untersucht und bewertet wird.

Aufgrund der großen Diversität der Forschungen, die aus den speziellen und sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Hydrogele resultiert, gibt es bisher noch kein Verfahren, mit dem Strukturen im Makro- und Mikro-Bereich in gleichem Maße gut mit einer gemeinsamen Fertigungsstrategie abgebildet werden können. Weiterhin ist die Entwicklung einer normierten Bewertung von Bio-Scaffolds hinsichtlich der geometrischen Gestalt (im Makro- und Mikro-Bereich: u.a. Maßhaltigkeit, gewünschter Grad der Porosität [7]) und der mechanischen Eigenschaften (Zug-/Druck-/Biegebelastung mit geeigneten normierten Probekörpern) offen.

Projektpartner

Das Forschungsprojekt „formplus – Röhrchen / Prozessparametrik und Schrittfolge zur 3D-Druck-Fertigung von Nervenleitschienen“ im Forschungs- und Transferzentrum e.V. an der HTWK Leipzig wird mit folgenden Projektpartnern durchgeführt:

Axiss GmbH

Institut für Pharmazie, Pharmazeutische Technologie, Universität Leipzig

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Literaturverzeichnis

- [1] EUROTRANSPLANT; BRANGER, Peter (Mitarb.); SAMUEL, Undine (Mitarb.) : *Annual Report 2015*. Niederlande, 2015
- [2] DORMEHL, Luke: *Cigarette-puffing robot simulates the effect of smoking on your lungs*. URL <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/cigarette-smoking-robot/>. – Aktualisierungsdatum: 2016-10-31 – Überprüfungsdatum 2017-04-27
- [3] JOHNSON, Blake N. ; LANCASTER, Karen Z. ; ZHEN, Gehua ; HE, Junyun ; GUPTA, Maneesh K. ; KONG, Yong Lin ; ENGEL, Esteban A. ; KRICK, Kellin D. ; JU, Alex ; MENG, Fanben ; ENQUIST, Lynn W. ; JIA, Xiaofeng ; MCALPINE, Michael C.: *3D Printed Anatomical Nerve Regeneration Pathways*. In: *Advanced functional materials* 25 (2015), Nr. 39, S. 6205–6217
- [4] KOHN, C. ; KLEMENS, J. M. ; KASCHOLKE, C. ; MURTHY, N. S. ; KOHN, J. ; BRANDENBURGER, M. ; HACKER, M. C.: *Dual-component collagenous peptide/reactive oligomer hydrogels as potential nerve guidance materials - from characterization to functionalization*. In: *Biomaterials science* 4 (2016), Nr. 11, S. 1605–1621
- [5] BILLIET, Thomas ; VANDENHAUTE, Mieke ; SCHELFHOUT, Jorg ; VAN VLIERBERGHE, Sandra ; DUBRUEL, Peter: *A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering*. In: *Biomaterials* 33 (2012), Nr. 26, S. 6020–6041
- [6] DABABNEH, Amer B. ; OZBOLAT, Ibrahim T.: *Bioprinting Technology : A Current State-of-the-Art Review*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 136 (2014), Nr. 6, S. 61016

- [7] MALDA, Jos ; VISSER, Jetze ; MELCHELS, Ferry P. ; JUNGST, Tomasz ; HENNINK, Wim E. ; DHERT, Wouter J. A. ; GROLL, Jurgen ; HUTMACHER, Dietmar W.: *25th anniversary article: Engineering hydrogels for biofabrication*. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 25 (2013), Nr. 36, S. 5011–5028
- [8] GENG, Li ; FENG, Wei ; HUTMACHER, Dietmar W. ; SAN WONG, Yoke ; TONG LOH, Han ; FUH, Jerry Y.H.: *Direct writing of chitosan scaffolds using a robotic system*. In: *Rapid Prototyping Journal* 11 (2005), Nr. 2, S. 90–97
- [9] DAMLE, SAMIR ; GORGEN, VIVIAN ; JOSHI, VAIDEHI ; LIN, FRANK ; MURPHY, KEITH ; PENTONEY, STEPHEN, JR ; PLATT, CLAY ; PRESNELL, Sharon C. ; RAPOPORT, HARRY SCOTT: *AUTOMATED DEVICES, SYSTEMS, AND METHODS FOR THE FABRICATION OF TISSUE*. DAMLE, SAMIR; JOSHI, VAIDEHI; ORGANOVO INC; PLATT, CLAY; Presnell, Sharon C.; RAPOPORT, HARRY SCOTT. Veröffentlichungsnr. WO002015017579A1
- [10] LUTOLF, Matthias ; NEGRO, Andrea: *A METHOD FOR BUILDING A STRUCTURE CONTAINING LIVING CELLS*. ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (EPFL). Veröffentlichungsnr. WO 2016/091336 A1
- [11] BOLAND, Thomas ; XU, Tao ; DAMON, Brook ; CUI, Xiaofeng: *Application of inkjet printing to tissue engineering*. In: *Biotechnology journal* 1 (2006), Nr. 9, S. 910–917
- [12] KOCH, L. ; GRUENE, M. ; UNGER, C. ; CHICHKOV, B.: *Laser Assisted Cell Printing*. In: *Current Pharmaceutical Biotechnology* 14 (2013), Nr. 1, S. 91–97
- [13] OVSIANIKOV, A. ; MALINAUSKAS, M. ; SCHLIE, S. ; CHICHKOV, B. ; GITTARD, S. ; NARAYAN, R. ; LOBLER, M. ; STERNBERG, K. ; SCHMITZ, K-P ; HAVERICH, A.: *Three-dimensional laser micro- and nano-structuring of acrylated poly(ethylene glycol) materials and evaluation of their cytotoxicity for tissue engineering applications*. In: *Acta biomaterialia* 7 (2011), Nr. 3, S. 967–974

Zwei-Komponenten-Hydrogele mit biologischem Baustein

Michael Hacker

Universität Leipzig

Akademischer Werdegang & Forschungstätigkeit Michael Hacker

09/2007 - heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Universität Leipzig, Institut für Pharmazie, Pharmazeutische Technologie
12/2016	Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. an der Universität Leipzig im Fach Pharmazeutische Technologie (Mentorin: Prof. Dr. M. Schulz-Siegmund) Habilitationsschrift: Functional macromers for biomedical applications.
09/2004 - 08/2007	Postdoctoral Research Associate Rice University, Department of Bioengineering, Houston, TX, USA Mentor: Prof. Dr. Antonios G. Mikos
09/2004	Promotion (summa cum laude) zum Dr. rer. nat. an der Universität Regensburg; Lehrstuhl für Pharmazeutische Technologie (Doktorvater: Prof. Dr. A. Göpferich) Dissertationsschrift: Functional Cell Carriers for Tissue Engineering - Fabrication and Characterization.
03/2000 - 09/2004	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Universität Regensburg, Institut für Pharmazie, Lehrstuhl Pharmazeutische Technologie
02/2000	Apotheker, Föhren-Apotheke Erlangen
12/1999	Approbation zum Apotheker durch die Regierung von Unterfranken
05/1999 - 10/1999	Pharmazeutisches Praktikum, Sebaldus Apotheke Erlangen
11/1998 - 04/1999	Pharmazeutisches Praktikum, Heumann Pharma Feucht, Qualitätskontrolle
10/1998	Zweiter Abschnitt der Pharmazeutischen Prüfung und Abschluss des Studiums der Pharmazie (11/1994-10/1998) an der Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen

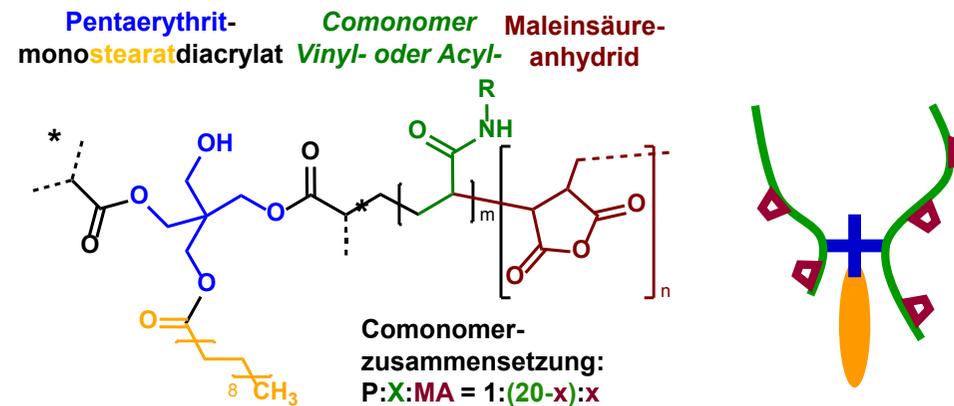


Zwei-Komponenten-Hydrogele mit biologischem Baustein

M.C. Hacker

Institut für Pharmazie, Pharmazeutische Technologie, Leipzig

Hydrogele werden wegen ihrer zytokompatiblen Mikroumgebung mit hohem Wassergehalt und ihren mechanischen und chemischen Eigenschaften vielfältig für die therapeutische Applikation von Proteinen und anderen Wirkstoffen sowie in der regenerativen Medizin angewendet. Dabei ahmen die Hydrogelmaterialien idealerweise die spezifische Umgebung der natürlichen extrazellulären Matrix (EZM) nach.



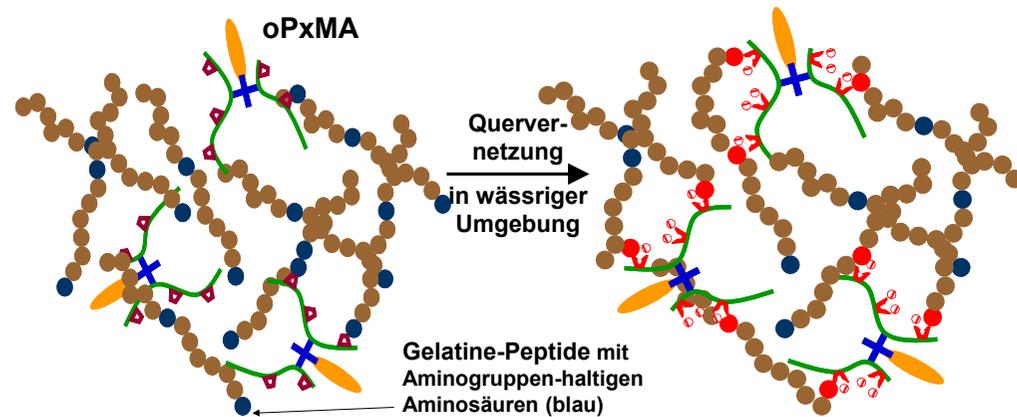


Abbildung: Materialkonzept für Oligomer-vernetzte Gelatine-basierte Zwei-Komponenten-Hydrogele (cGEL); Oben: Struktur und schematische Illustration des oligomeren Vernetzers; Unten: Illustration der cGEL Struktur.

Das Konzept der Materialien strebt die Verwendung von natürlichen Strukturkomponenten der EZM an, um deren intrinsische Interaktion mit Zellen und Abbaubarkeit in die Gelmaterialien zu integrieren. Um ein breites Spektrum an mechanischen Eigenschaften verfügbar zu machen und zusätzliche Funktionalitäten in die Materialien zu integrieren, haben wir eine neue Klasse von Quervernetzer entwickelt, die die Reaktivität von Anhydridgruppen gegenüber Aminogruppen zur Vernetzung der Peptid-/Proteinkomponente nutzen. Die chemische Zusammensetzung der Vernetzer-Oligomere kann durch das molare Verhältnis der Monomerkomponenten bei der Polymerisationsreaktion kontrolliert und die Reaktivität gegenüber makromolekularen Aminen gezeigt werden.¹ Als Strukturkomponente konzentrierten wir uns vor allem auf Partialhydrolysate des Kollagens (Collagel® und verschiedenen Gelatintypen), die wir zu Hydrogelen mit biologisch relevanten Elastizitätsmoduln und guter Zytokompatibilität verarbeiten konnten.² Die Oligomer-vernetzten Gelatinegele (cGEL) stellen beispielsweise eine funktionelle EZM-Nische für Melanozyten dar.³

Durch Variation der Comonomere bei der Synthese der Anhydrid-haltigen Oligomere können Derivate mit zusätzlichen Funktionalitäten hergestellt werden⁵ und wir arbeiten an der Formulierung von injizierbaren Zubereitungen.

Uns ist auch die Verarbeitung der Zwei-Komponenten-Gele durch Dosieren über einen statischen Mischer zu tubulären Strukturen gelungen, die potentiell als Nervenleitschienen genutzt werden können.⁴ Durch partielle Derivatisierung der Anhydridgruppen vor der Nutzung der Oligomere als Vernetzer können niedermolekulare Substanzen (z.B. Wirkstoffe, Fluoreszenzsonden, Peptide) in die Gele eingebunden werden. Solche Modifizierungen haben Effekte auf Stammzellen, die mit den Materialien interagieren. Daraus ergeben sich einfache Strategien zur Anpassung der Materialien an unterschiedliche regenerative Applikationen.

Innerhalb des Netzwerks formplus (BMBF) streben wir zusammen mit dem FTZ der HTWK Leipzig und der axis Dosiertechnik GmbH die generative Fertigung von Multikanalröhrchen aus den Zwei-Komponenten-Hydrogelen an.

Referenzen:

1. Loth T, Hennig R, Kascholke C, Hötzel R, Hacker MC. Reactive and stimuli-responsive maleic anhydride containing macromers - multi-functional cross-linkers and building blocks for hydrogel fabrication. *React. Funct. Polym.* 2013; 11:1480–92.
2. Loth T, Hötzel R, Kascholke C, Anderegg U, Schulz-Siegmund M, Hacker MC. Gelatin-based biomaterial engineering with anhydride-containing oligomeric cross-linkers. *Biomacromolecules* 2014; 6:2104–18.
3. Sulflow K, Schneider M, Loth T, Kascholke C, Schulz-Siegmund M, Hacker MC, et al. Melanocytes from the outer root sheath of human hair and epidermal melanocytes display improved melanotic features in the niche provided by cGEL, oligomer-cross-linked gelatin-based hydrogel. *J. Biomed. Mater. Res. A* 2016 (accepted manuscript).
4. Kohn C, Klemens JM, Kascholke C, Murthy NS, Kohn J, Brandenburger M, et al. Dual-component collagenous peptide/reactive oligomer hydrogels as potential nerve guidance materials - from characterization to functionalization. *Biomater. Sci.* 2016; 11:1605–21.
5. Kascholke C, Loth T, Kohn-Polster C, Moller S, Bellstedt P, Schulz-Siegmund M, et al. Dual-Functional Hydrazide-Reactive and Anhydride-Containing Oligomeric Hydrogel Building Blocks. *Biomacromolecules* 2017; 3:683–94.

Additive Manufacturing meets Biotechnology -
Neue biotechnologische Konzepte durch additive
Fertigungsverfahren

Felix Krujatz

Technische Universität Dresden

Kurzvita Felix Krujatz

Geb. 1985 in Bautzen

Hochschulausbildung:

2005- 2008: TU Braunschweig- Biotechnologie
(Bachelor of Science)

2008- 2010: TU Braunschweig- Biotechnologie
(Master of Science)

Wissenschaftliche Tätigkeit:

2011 - 2017: TU Dresden- Institut für Naturstofftechnik
Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Pflanzen-
und Algenbiotechnologie (Schwerpunkt: Photobiotechnologie)

06/2016: TU Dresden- Promotion zum Dr.-Ing.
Thema: „Entwicklung und Evaluierung neuer Bioreaktorkonzepte
für phototrophe Mikroorganismen“



Abstract

Einleitung – Motivation:

Die Anforderungen an Bioreaktoren und analytische Systeme in der Biotechnologie werden aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Produktionsorganismen (Bakterien, Hefen, Algen, Pflanzenzellen, u.v.m.), deren spezifischer Anforderungen (z.B. Scherempfindlichkeit), unterschiedlichste Messaufgaben und Prozessbedingungen (z.B. Lichteintrag) immer komplexer. Aus diesem Grund sind technische Laborlösungen oftmals individuell an die spezifischen Bedingungen des Bioprozesses angepasst.

Additive Fertigungsverfahren bieten mit ihrer strukturellen Flexibilität einen entscheidenden Freiheitsgrad für die Herstellung individualisierter Systemlösungen für die Biotechnologie.

Vortragsinhalte:

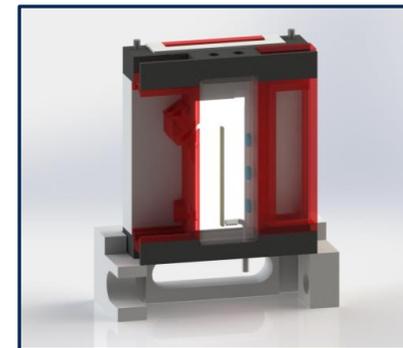
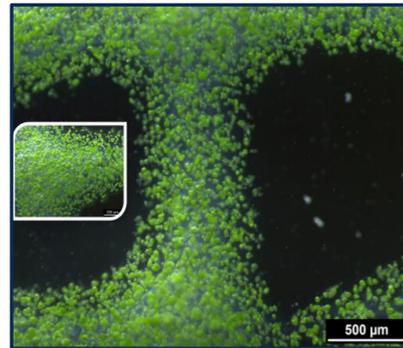
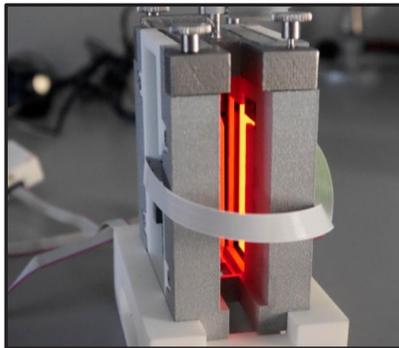
Der Vortrag stellt die wichtigsten biotechnologischen Anwendungsbereiche, die ein hohes Potential für die Nutzung additiver Fertigungsverfahren aufweisen, vor. Dazu gehören der Bereich der Mikrofluidik, das Bioprinting [1,2] und die Fertigung von individualisierten Bioreaktorkomponenten [3].

Für die einzelnen Bereiche sollen die spezifischen Anforderungen der Materialien definiert und ausgewählte Beispiele aus der eigenen Forschung und Entwicklung an der TU Dresden sowie aus der Literatur vorgestellt werden.

Quellen:

- [1] Lode A, Krujatz F, Brüggemeier S, Quade M, Schütz K, Knaack S, Weber J, Bley T, Gelinsky M (2015) Green bioprinting: Fabrication of photosynthetic algae-laden hydrogel scaffolds for biotechnological and medical applications. *Engineering in Life Sciences*, 15, 177-183.
- [2] Krujatz F, Lode A, Brüggemeier S, Schütz K, Kramer J, Bley T, Gelinsky M, Weber J (2015) Green bioprinting: Viability and growth analysis of microalgae immobilized in 3D-plotted hydrogels versus suspension cultures. *Engineering in Life Sciences*, 15, 678-688.
- [3] Krujatz F, Fehse K, Jahnel M, Schurig C, Gommel C, Lindner F, Bley T, Steingroewer J (2016) MicroLED-Photobioreactor: Design and characterization of milliliter-scale Flat-Panel-Airlift-Photobioreactor with optical process monitoring. *Algal Research*, 18, 225-234.

Additive Manufacturing meets Biotechnology – Neue biotechnologische Konzepte durch additive Fertigungsverfahren



4. Mitteldeutsches Forum: 3D-Druck in der Anwendung

Mittweida, den 17.05.2017

3D-Mikrofluidik Systeme für biotechnologische Analysen

- Dolomite´s Fluidic Factory nutzt transparente zyklische Olefine

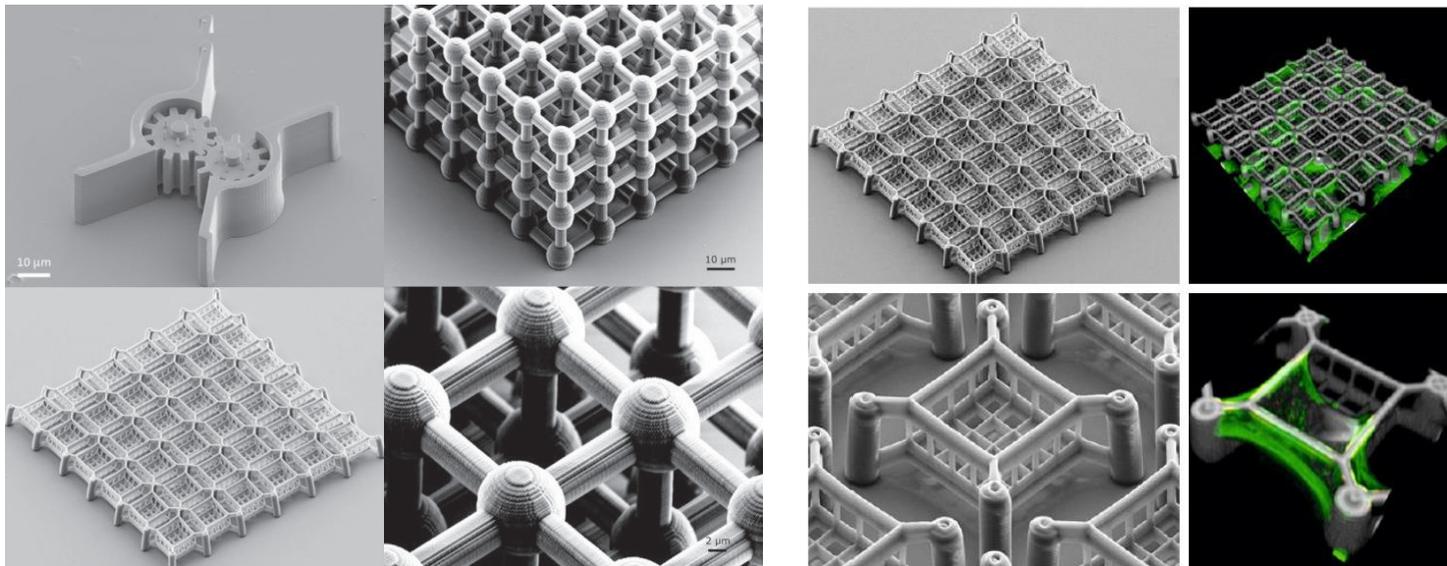


Dolomite-microfluidics.com

- Anwendungen: Organ-on-a-chip, Analytik, Point of care Diagnostik, Drug development, Ausbildung, chemische Synthese biomedizinische Assays

Additive Technologien: 2-Photon-Polymerisation

- Mikro-/Nanostrukturierte Auflösung bis zu 0,2 μm



Nanoscribe.de

Klein et al. (2011) Two-Component Polymer Scaffolds for Controlled Three-Dimensional Cell Culture, *Advanced Materials*. 23(11), 1341-1345.

- Untersuchung topographischer Strukturen auf die Besiedlungseigenschaften

Mittweida, den 17.05.2017

Dr.-Ing. Felix Krujatz

Folie 2/9

3D-Bioprinting von Zellen in definierte Matrixumgebungen (Green Bioprinting)

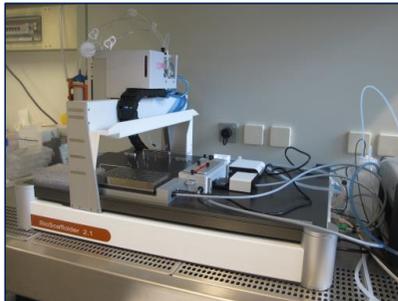


Foto: Sophie Brüggemeier, TFO

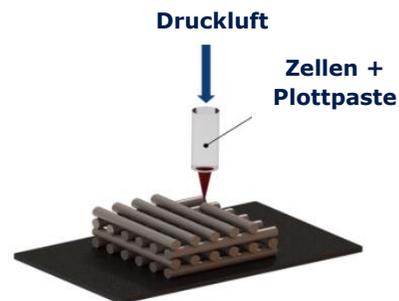
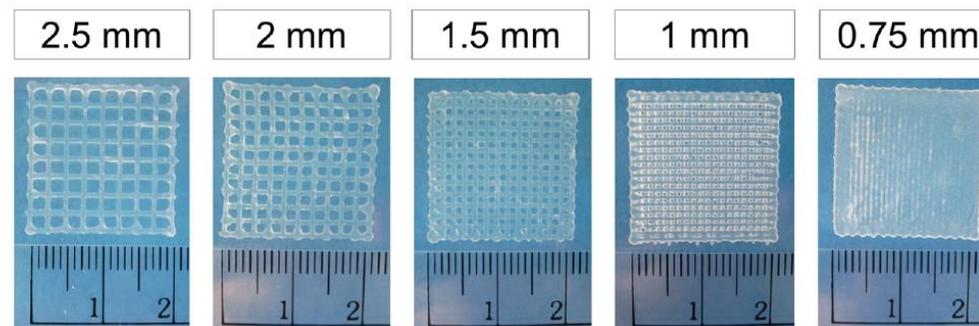


Abbildung: Anja Lode, TFO

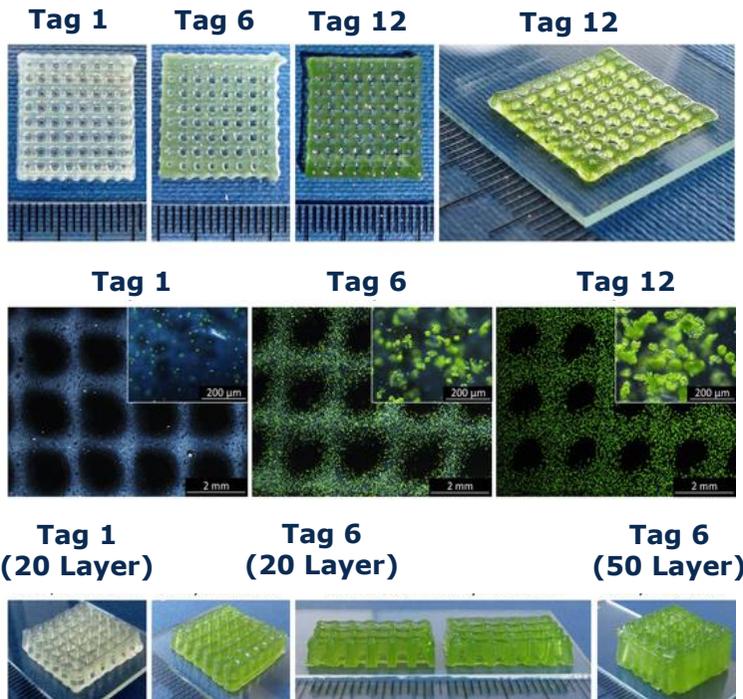


Foto: mdr.de/wissen



Schütz et al. (2015) Three-dimensional plotting of cell-laden alginate/methylcellulose blend: towards biofabrication of tissue engineering constructs with linically relevant dimensions. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. In press

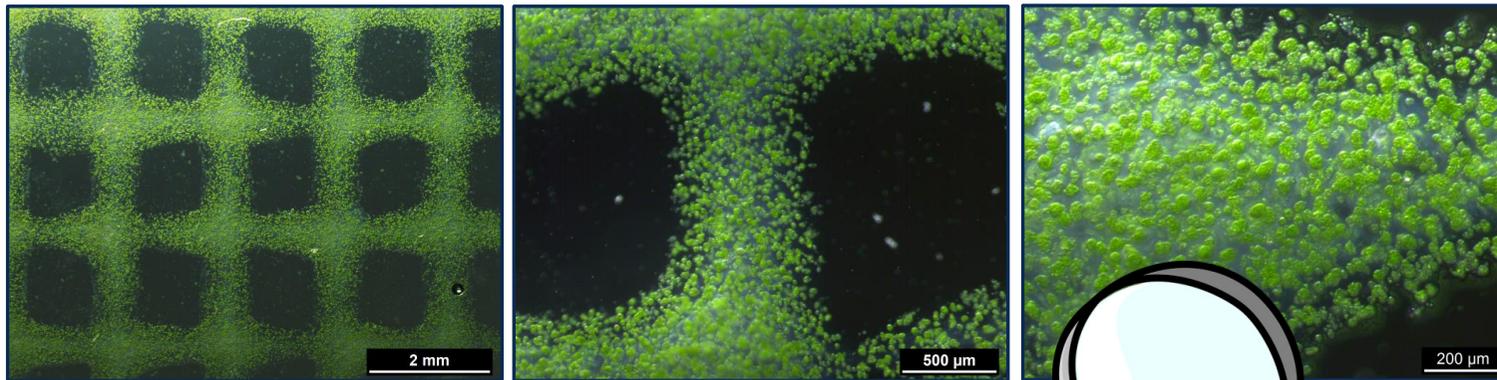
3D-Bioprinting von Zellen in definierte Matrixumgebungen (Green Bioprinting)



Lode A, **Krujatz F** et al.(2015) Green bioprinting: Fabrication of photosynthetic algae-laden hydrogel scaffolds for biotechnological and medical applications. *Engineering in Life Sciences*. 15:177-83.

- Herstellung zellbeladener strukturierter Hydrogele
- 3D-Bioprinting Prozess ermöglicht die homogene Verteilung der Zellen in der Matrixumgebung
- Bildung photosynthetisch aktiver Zellcluster (30 – 40 µm)
- Stabile Wachstumsraten und Viabilität im Bereich von 26 °C – 37 °C

3D-Bioprinting von Zellen in definierte Matrixumgebungen (*Green Bioprinting*)



- Zeit- und orts aufgelöste Analyse zellulärer Parameter (Wachstumsraten, Viabilität, Aggregationsverhalten, ...)
- Kombinationen verschiedener Materialien und/oder Organismen
- Vielfältige Nutzungsmöglichkeiten (Biotech, Medizin, Toxizitätsstudien, Co-Kultivierungen,....)

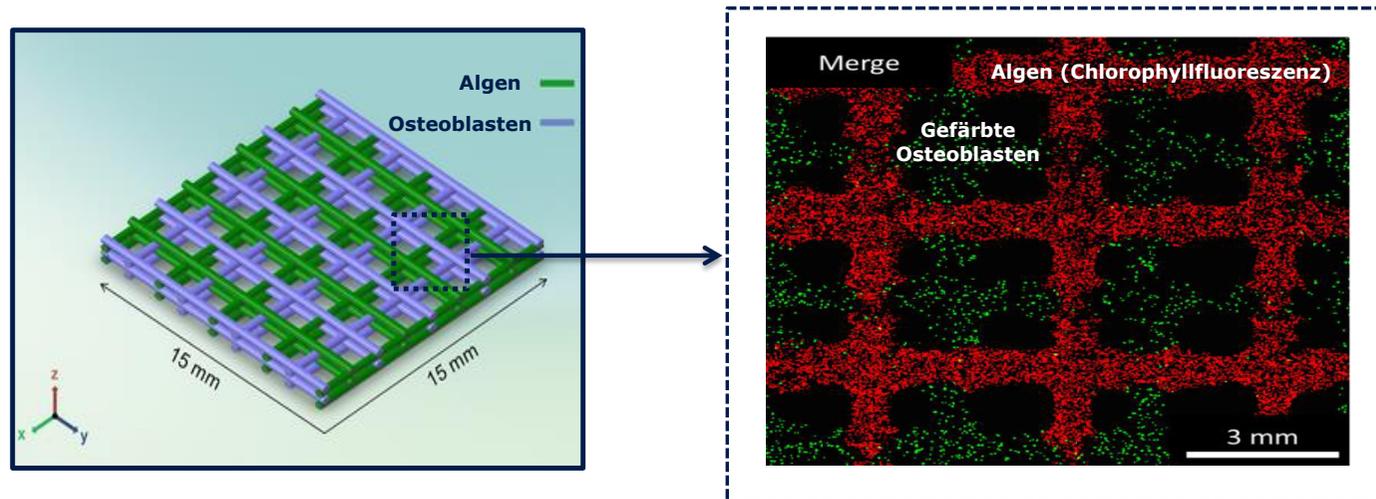
Krujatz F, Lode A, et al. (2015) Green bioprinting: Viability and growth analysis of microalgae immobilized in 3D-plotted hydrogels versus suspension cultures. *Engineering in Life Sciences*. 2015;15:678-688.

Mittweida, den 17.05.2017

Dr.-Ing. Felix Krujatz

Folie 5/9

Multi-cell-Bioprinting: 3D-Bioprinting verschiedener Zelltypen



- Strukturierte Co-Kultur aus Säugerzellen und Algen (rot = Chlorophyllfluoreszenz von *Chlamydomonas reinhardtii* 11-32b , grün = gefärbte Osteoblasten)

Krujatz F, Lode A et al. Green bioprinting: Viability and growth analysis of microalgae immobilized in 3D-plotted hydrogels versus suspension cultures. *Engineering in Life Sciences*. 2015;15:678-688.

Lode A, **Krujatz F** et al. Green bioprinting: Fabrication of photosynthetic algae-laden hydrogel scaffolds for biotechnological and medical applications. *Engineering in Life Sciences*. 2015;15:177-83.

Mittweida, den 17.05.2017

Dr.-Ing. Felix Krujatz

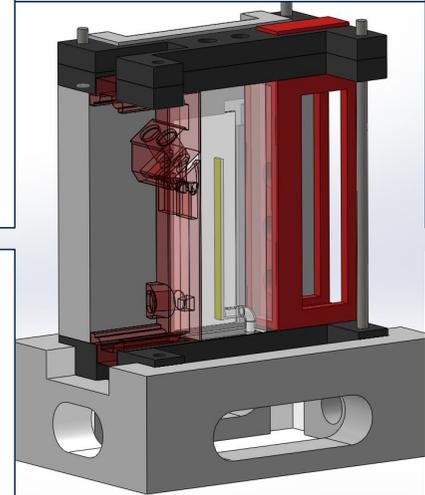
Folie 6/9

3D-Bioreaktordesign: Nutzung additiver Technologien

**3D gedruckte
Reaktorkomponenten**

- Hohe Detailgenauigkeit
- Keine Einschränkung durch die Verwendung von Werkzeugen
- Schnelle Fertigung (1-3 Tage!)

MicrOLED-Bioreaktor



Optische Sensortechnik

- Nicht-invasive Bestimmung der Parameter dO_2 , pH und dCO_2
- Echtzeit-Bestimmung der Zelldichte und Chlorophyll-fluoreszenz

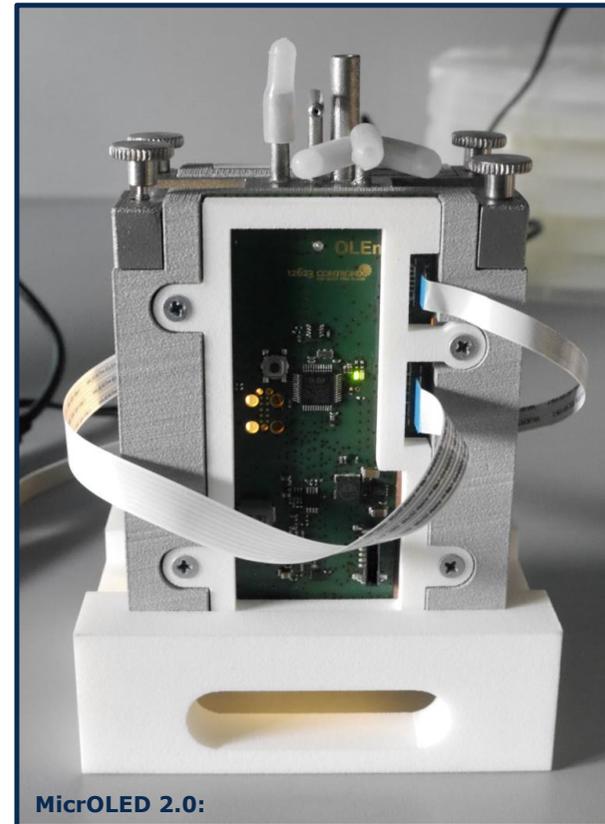
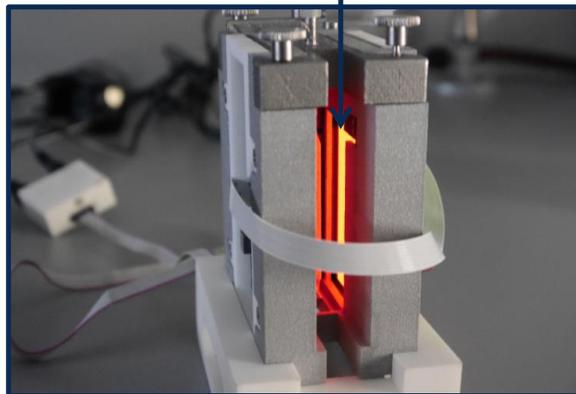
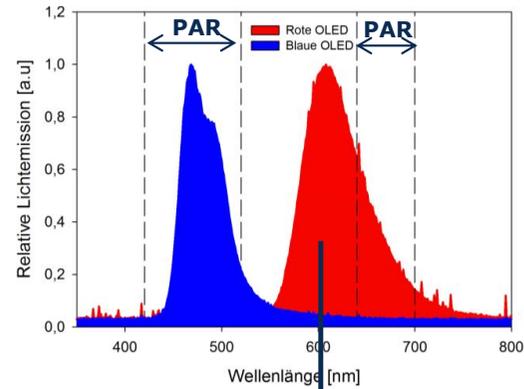
Organische Leuchtdioden

- Geringe Bautiefe (< 2 mm)
- Homogene Lichtverfügbarkeit
- Geringe Wärmeentwicklung
- Möglichkeit der Pulsung und Dimmung
- Einstellbare Spektren

Miniturisiertes Airlift-Reaktor System

- Variation von CO_2 über die Begasung
- Airlift-System ermöglicht eine Übertragbarkeit auf Labor- und Produktionssysteme

MicrOLED 2.0: Nutzung monochromatischer OLEDs



Mittweida, den 17.05.2017

Dr.-Ing. Felix Krujatz

Folie 8/9

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !!



Kontakt: Dr.-Ing. Felix Krujatz
Institut für Naturstofftechnik
Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik
Mail: Felix.Krujatz@tu-dresden.de
Phone: 0049-35146332727

Sektion 3

3D-DRUCK VON METALL

Prozessoptimierung für die generative Fertigung von Mikro-Wärmeübertragern

Martin Erler

Laserinstitut Hochschule Mittweida



Kurzreferat zum Vortrag:

Prozessoptimierung für die generative Fertigung von Mikro-Wärmeübertragern

Martin Erler, Stefan Gronau, Robby Ebert, Horst Exner
Laserinstitut Hochschule Mittweida

Für Wärmeübertrager werden nach aktuellem Stand der Technik Plattenwärmeübertrager und Rohrbündelapparate eingesetzt, welche Kompaktheiten von 500 m^2 Wärmeübertragerfläche pro m^3 erreichen. Die Wärmeübertrager werden in zahlreichen verfahrenstechnischen Anlagen eingesetzt, z. B. Kälteanlagen, Wärmepumpen, Heizungsanlagen und Chemieanlagen. Nach aktuellem Stand der Forschung werden einerseits Miniatur-Wärmeübertrager durch generative Fertigungsverfahren wie dem selektiven Laserstrahlschmelzen gefertigt. Andererseits werden in der Forschung Mikro-Wärmeübertrager mit konventionellen Fertigungstechnologien (Ätzen, Mikrofräsen) hergestellt. Das Ziel ist dabei die Erhöhung der Kompaktheit. Die Fertigung der Mikro-Wärmeübertrager ist jedoch noch sehr kostenintensiv und schlecht reproduzierbar. Außerdem ist das Verhältnis von Wand- zu Kanalvolumen und somit auch die Masse der Bauteile sehr hoch.

Das Laserinstitut Hochschule Mittweida befasst sich bereits seit 2001 mit der generativen Fertigung von Metallbauteilen im Mikrometer-Bereich. Dadurch soll bei der Fertigung des Mikro-Wärmeübertragers die Masse um 70 % reduziert und eine Kompaktheit von bis zu $10.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ erreicht werden. Bereits in einem Vorlaufprojekt mit dem ILK Dresden konnte die generelle geometrische Erzeugbarkeit der erforderlichen Mikrostrukturen nachgewiesen werden. Der erste Demonstrator wies jedoch Defizite in der absoluten Dichtheit auf und die Fertigungszeit war noch relativ hoch.

In einem aktuellen Forschungsprojekt (Technologievorhaben im AGENT-3D: „Funktionale Geometriestrukturen – FunGeoS“) sollen die bestehenden Probleme gelöst und weitere Prozessoptimierungen vorgenommen werden. Zur Absicherung der Realisierbarkeit einer funktionsfähigen Demonstrator-Struktur werden daher zwei Verfahren untersucht: Lasermikrosintern mit kurzgepulster Laserstrahlung und Mikro-SLM mit kontinuierlicher Laserstrahlung. In ersten Untersuchungsergebnissen konnte bereits die Realisierung von dichten Mikrowänden mit Wandstärken unter $100 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden. Des Weiteren wurde das frühere Demonstratorkonzept hinsichtlich Effizienz und Anbindung der Leitungsanschlüsse überarbeitet. Die Reduzierung der Fertigungszeiten soll durch spezielle Belichtungsstrategien und einer On-the-Fly-Bearbeitung verbessert werden. Zukünftig soll für die weitere Reduzierung der Bauzeit beim Mikro-SLM ein Polygonscanner zum Einsatz kommen, womit Scangeschwindigkeiten bis 200 m/s umgesetzt werden sollen. Ein besonderes Problem stellt die Pulverentfernung aus den filigranen Mikrokanälen mit hohen Aspektverhältnissen dar. Hierzu wurden erste Teststrukturen erstellt und mit einem leistungsstarken Ultraschallgerät hinsichtlich der Pulverentfernung untersucht.

Der geplante Demonstrator des Mikro-Wärmeübertragers soll bei erfolgreicher Umsetzung eine Leistung von etwa 5- 10 kW bei einem Übertragungsvolumen von 1 cm^3 übertragen, was eine enorme Steigerung der Leistungsdichte darstellt.



Prozessoptimierung für die generative Fertigung von Mikro-Wärmeübertragern

Martin Erler, Stefan Gronau

Inhalt

- Stand der Technik und Forschung
- Ergebnisse Vorlaufprojekt
- Verwendete Verfahren
- Erste Untersuchungsergebnisse
- Prozessoptimierung
 - neues Konzept
 - Bestrahlungsstrategien
 - Reproduzierbarkeit
- Zusammenfassung
- Ausblick

Stand der Technik und Forschung

Aktuell auf dem Markt verfügbar:

- gelötete Platten- und Rohrbündelwärmeübertrager
- Kompaktheit bis $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$
- bis 500 kW



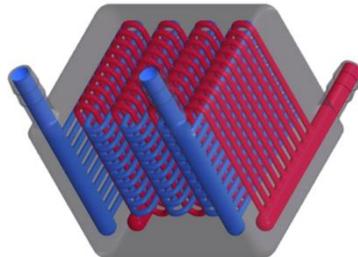
Quelle: Alfa Laval Corporate AB

Aus der Forschung:

Miniatur-Wärmetauscher



Quelle: 3T RPD and Autodesk Within



Quelle: Fraunhofer IWU

Mikro-Wärmeübertrager



Quelle: Fraunhofer ICT-IMM

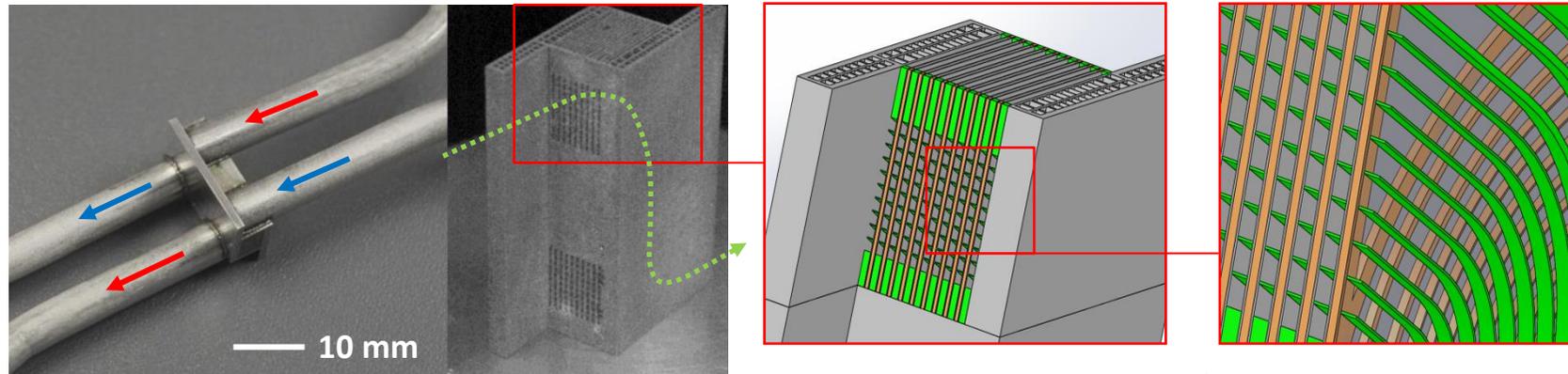


Quelle: KIT-IMVT

- sehr kostenintensiv
- geringe Reproduzierbarkeit
- Wand- zu Kanalvolumen ist hoch

Ergebnisse Vorlaufprojekt

Zusammenarbeit von ILK und LIM GmbH



Edelstahlpulver (316L) mit $d_{90} < 10 \mu\text{m}$, Verfahren: Lasermikrosintern (LMS)
 Mikrowände 60 μm , Kanalbreite 45 μm und 115 μm , Kompaktheit 2.600 m^2/m^3

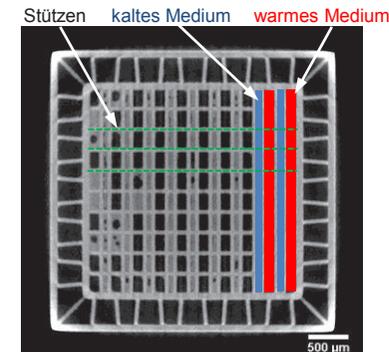
zu lösende Probleme:

- hohe Bauzeit von ca. 17 Std.
- Porosität in den Mikrowänden
- Pulverreste in den Mikrokanälen
- unregelmäßiger Pulveraufzug
- Fehlstellen beim Anschweißen der Rohrleitungen

gesetztes Ziel: dichte Mikrowände < 100 μm , Kompaktheit bis 10.000 m^2/m^3



Querschliffbild



Nano-CT-Aufnahme des inneren Wärmeübertrager-Bereichs mit Pulverresten

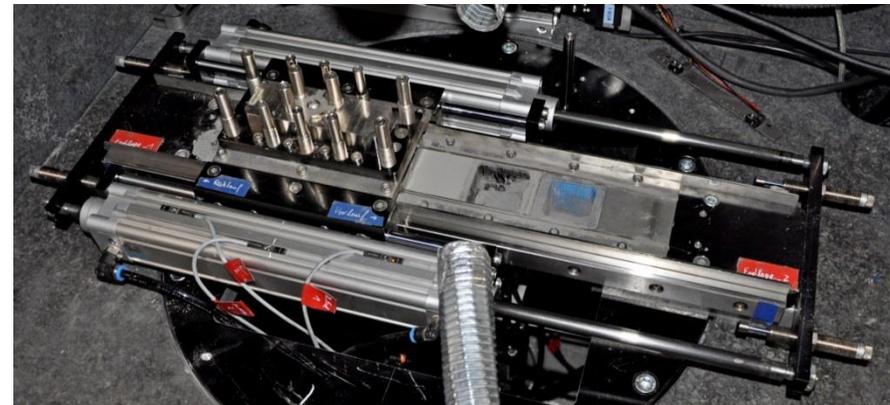
Verfahren (Lasermikrosintern / Mikro-SLM)

Merkmale	Lasermikrosintern (LMS)	Mikro-SLM
Laserleistung	50 W	400 W
Bearbeitungsregime	pw ($\tau = 200 \text{ ns}$)	cw
Fokusbereich	< 30 μm	
PulverkorngroÙe	Edelstahl 316L, $d_{90} < 10 \mu\text{m}$	
BauplattformgröÙe	$\varnothing 25 \text{ mm}$	$\square 40 \text{ mm}$
Bearbeitungsstrategie	klassische Abarbeitung	On-the-Fly-Bearbeitung mittels AOM
Bearbeitungsumgebung	Luft	

Lasermikrosintern (LMS)

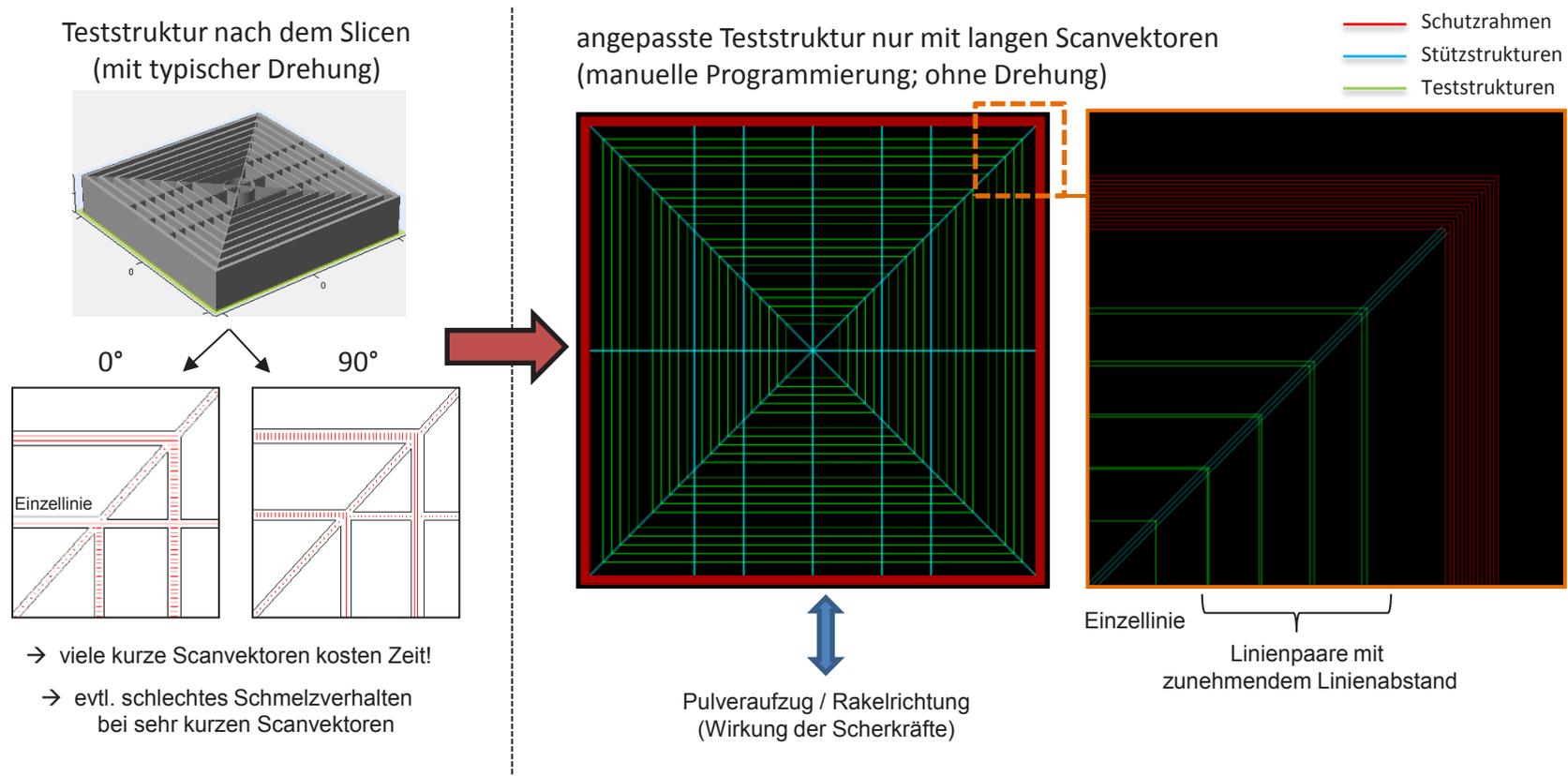


Mikro-SLM

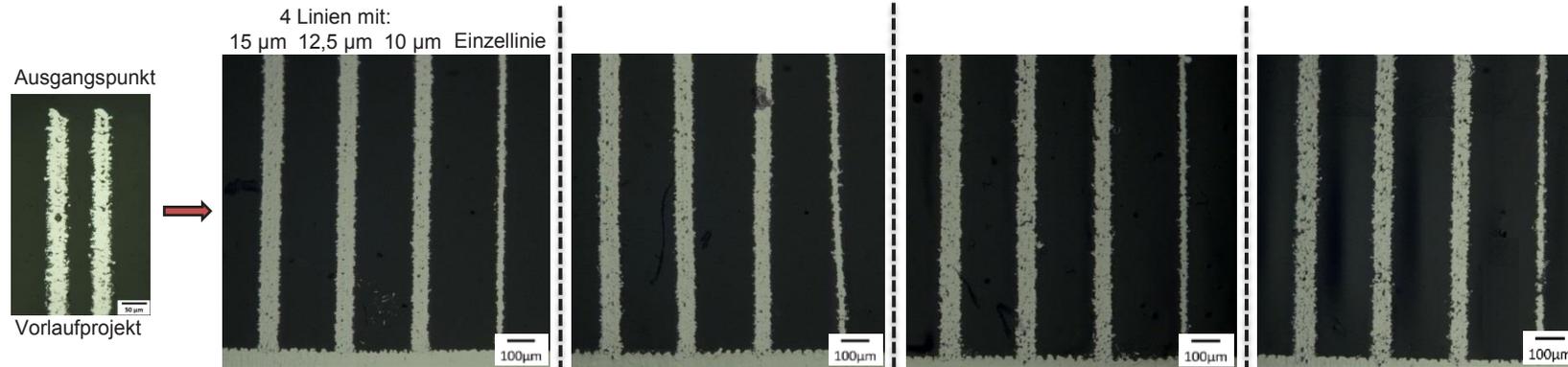


Erste Untersuchungsergebnisse

Aufbau der Teststruktur von Mikrowänden mit unters. Wandstärken:



Erste Untersuchungsergebnisse (LMS)



Schichtdicke	3 µm	5 µm	7,5 µm	10 µm
Speed, Frequenz	2 m/s, 1000 kHz			
Pulsabstand	2 µm			
Fluenz	2,1 J/cm²	3,5 J/cm ²		
Wandstärke	40 µm (bei Einzellinie)			

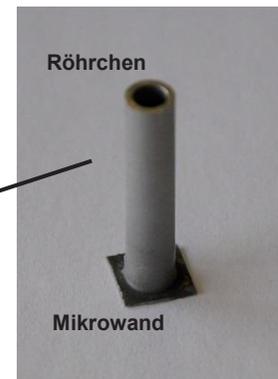
Edelstahl 316L ($d_{90} < 10 \mu\text{m}$)

- deutliche Reduzierung der Porenanzahl und -größe
- gesetztes Ziel von Wandstärken $< 100 \mu\text{m}$ erreicht \rightarrow für Demonstrator mehrere Linien nebeneinander \rightarrow mehr Sicherheit
- Linienabstand bis $15 \mu\text{m}$ ohne weitere Fehlstellen
- Schichtdicke nur bis $3 \mu\text{m}$, sonst Zunahme der Porenanzahl und -größe
- keine Unterschiede zwischen Wänden, die längs und quer zur Rakelrichtung aufgebaut wurden

Erste Untersuchungsergebnisse (LMS)

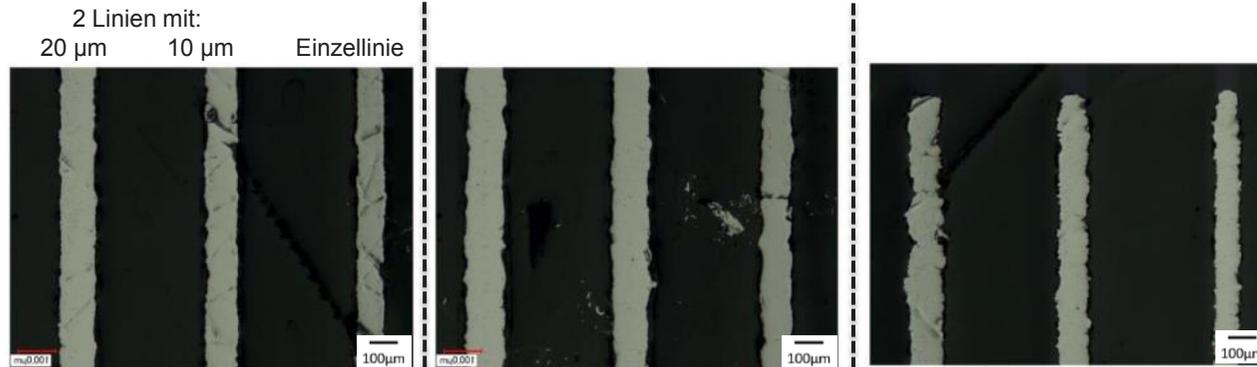
Prüfung der Gasdichtheit:

- Aufbau von Mikrowänden bis 80 μm bei geeignetem Prozessparameter
 - Ankleben der Mikrowände auf Röhrchen mit \varnothing 6 mm
- erste Drucktests bis 5 bar (hinreichend) waren erfolgreich



zusammengesetzte Querschliffbilder einer 80 μm dünnen Mikrowand mit einer Höhe von ca. 10 mm, gleichmäßige Verteilung der Mikroporen →

Erste Untersuchungsergebnisse (Mikro-SLM)

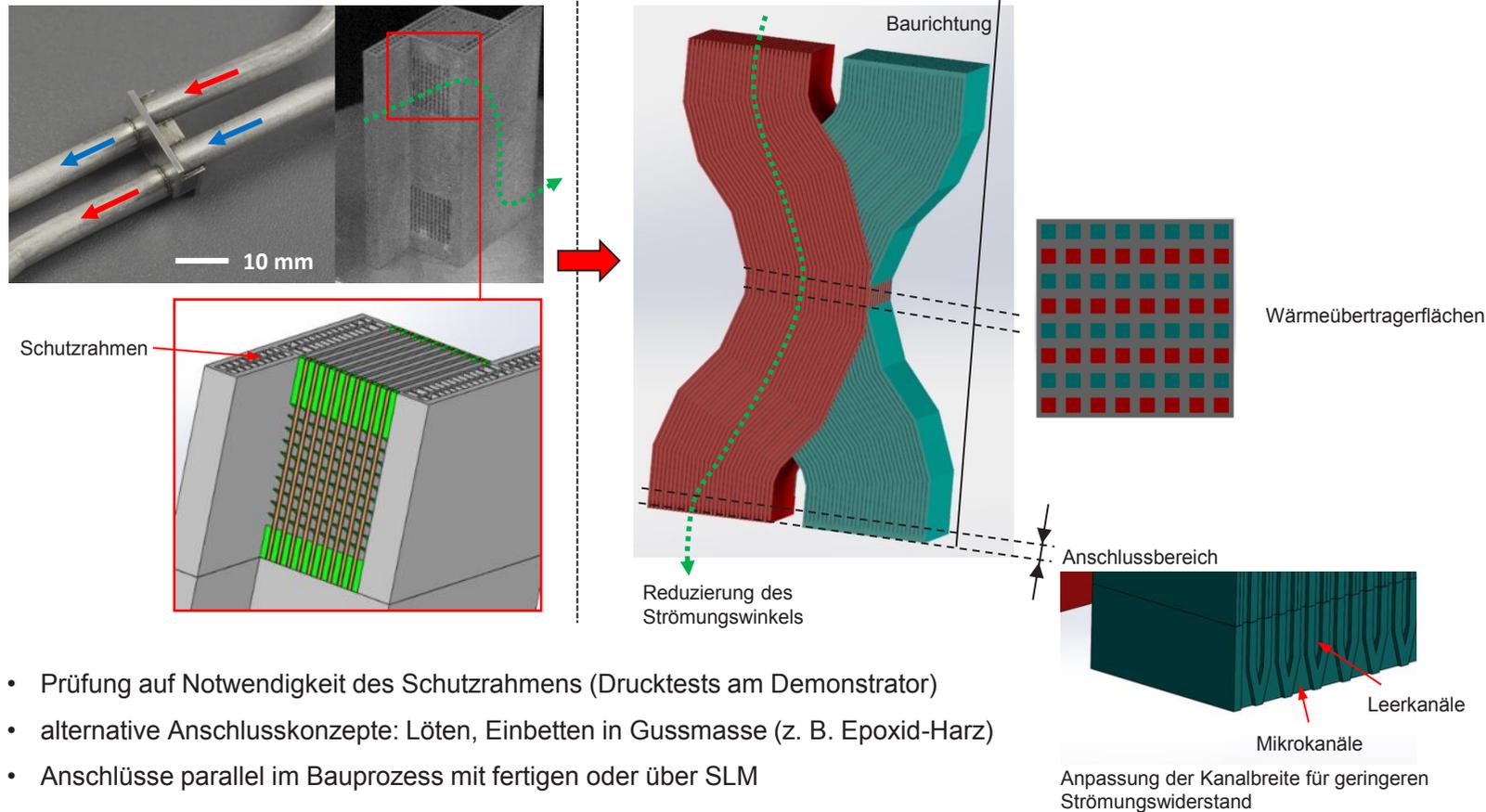


Leistung	50 W	60 W	80 W
Speed	6 m/s	8 m/s	10 m/s
Streckenenergie	0,08 J/cm		
Wandstärke	80 μm (bei Einzellinie)		

Edelstahl 316L ($d_{90} < 10 \mu\text{m}$)

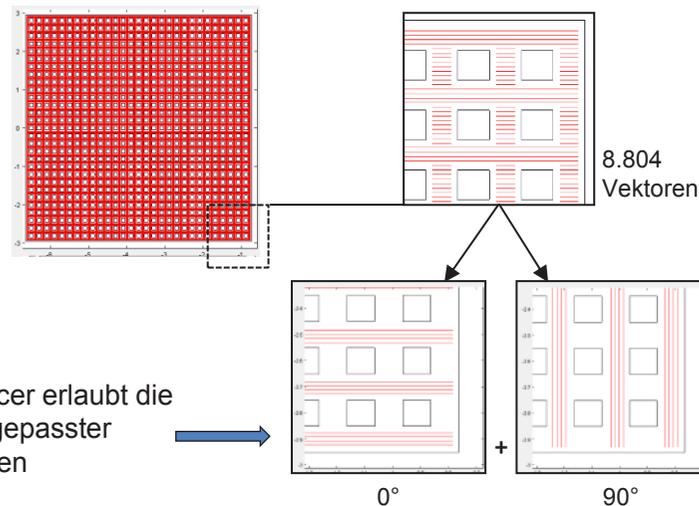
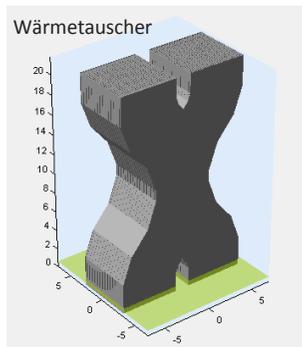
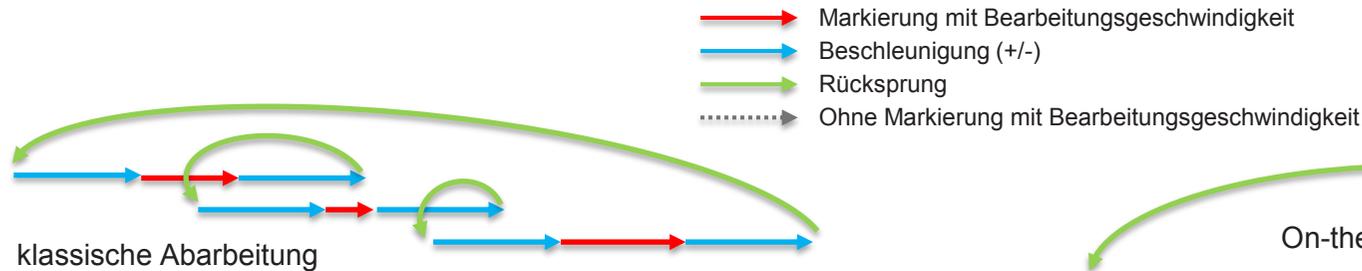
- gesetztes Ziel von Wandstärken $< 100 \mu\text{m}$ erreicht
- nahezu porenfrei dank cw-Bearbeitung
- relativ hohe Schichtdicke von $10 \mu\text{m}$ (beim LMS $3 \mu\text{m}$) → spart aber enorm Bauzeit
- Linienabstand bis $20 \mu\text{m}$ ohne Fehlstellen
- Ablenkgeschwindigkeit bis 10 m/s erreicht (beim LMS max. 2 m/s)
- keine Unterschiede zwischen Wänden, die längs und quer zur Rakelrichtung aufgebaut wurden

Prozessoptimierung (neues Konzept)



- Prüfung auf Notwendigkeit des Schutzrahmens (Drucktests am Demonstrator)
- alternative Anschlusskonzepte: Löten, Einbetten in Gussmasse (z. B. Epoxid-Harz)
- Anschlüsse parallel im Bauprozess mit fertigen oder über SLM

Prozessoptimierung (Bestrahlungsstrategie)



Bestrahlungszeit pro Schicht			
Speed (v)	t _{klassisch} (LMS)	t _{on-the-fly} (Mikro-SLM)	t _{0°,90°}
2 m/s	10 s	4 s	0,8 s
5 m/s	(15 s)	2,5 s	0,6 s
10 m/s	(29 s)	2,5 s	0,8 s

Bestrahlungszeit für beide Verfahren fast gleich

- (instituts-)eigener Slicer erlaubt die Programmierung angepasster Bestrahlungsstrategien

→ Doppelbestrahlung in den Kreuzungspunkten stellt kein Problem dar

Prozessoptimierung (Reproduzierbarkeit)

Problem: unregelmäßige Pulverschichten → Bauteilfehler

Lösung: in-situ Prozessbeobachtung mittels Kamera

Aktuell: nur Bilddokumentation zur Nachkontrolle und Fehlerbeurteilung

Ziel: Prozessregelung und -überwachung

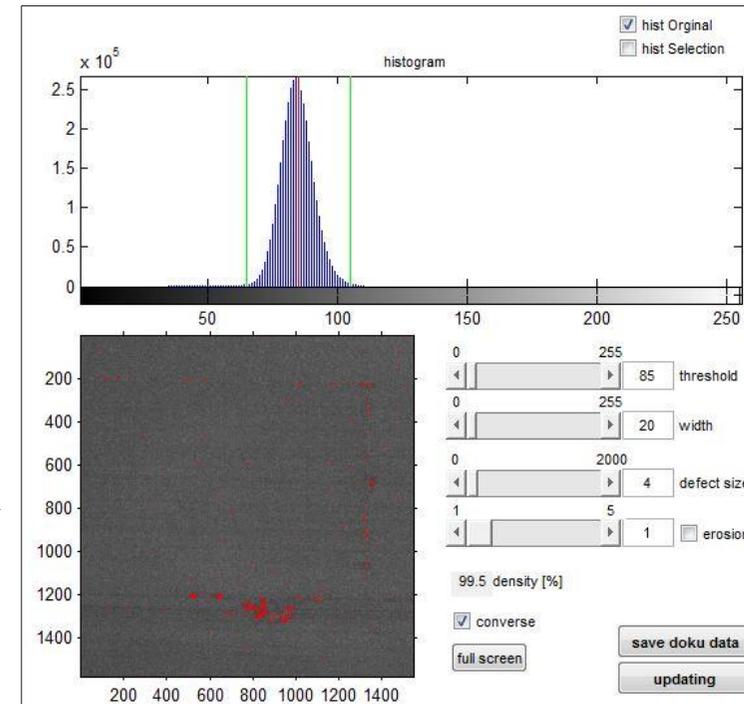
guter Pulveraufzug



fehlerhafter Pulveraufzug



Auswertung / Fehlererkennung

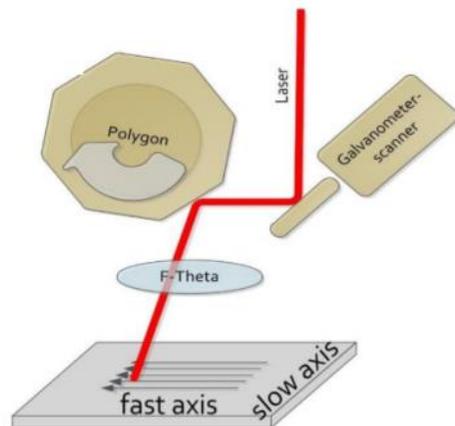


Zusammenfassung

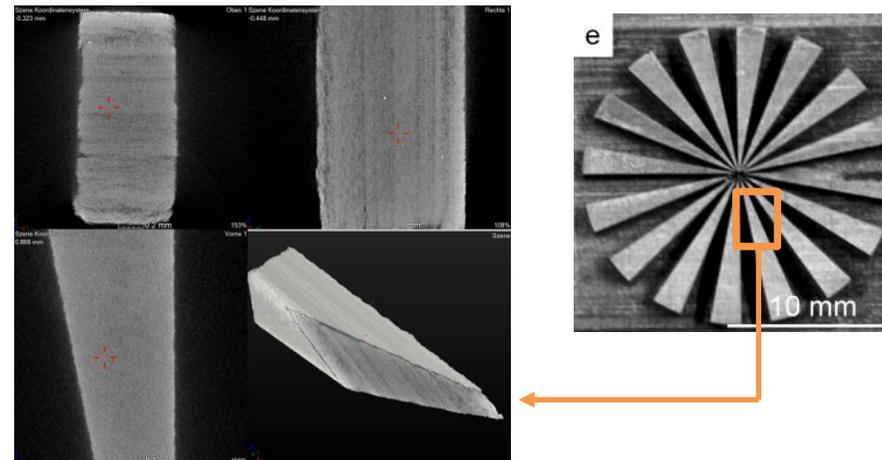
- Analyse des ersten Mikro-WUe-Demonstrators (Vorlaufprojekt) hinsichtlich möglicher Fehlerquellen und Verbesserungspotenzials
- Erstellung einer angepassten Teststruktur zur Ermittlung realisierbarer Wandstärken hinsichtlich Gasdichtheit und Reproduzierbarkeit
- Findung geeigneter Prozessparameter für beide Verfahren mit Wandstärken unter 100 μm und Nachweis der Gasdichtheit bis 5 bar beim LMS
- Erstellung eines neuen Demonstratorkonzeptes für hohe Kompaktheit und geringere Druckverluste
- softwaretechnische Umsetzung einer schnellen Bestrahlungsstrategie
- Einbindung einer Kamera zur Fehlererkennung nach dem Pulveraufzug

Ausblick

- Untersuchungen zum Druckverlust in Bezug auf das neue Konzept
- Untersuchungen zur Pulverentfernung in filigranen Mikrokanälen mit hohen Aspektverhältnissen
- generative Fertigung eines ersten Demonstrators mit vorläufig 100 µm Wand- und Kanalbreite
- weitere Prozessoptimierungen
- Versuche mit Polygonspiegelscanner zur weiteren Reduzierung der Bauzeit (Mikro-SLM → **Hochrate-Mikro-SLM**)



Prinzip des Polygonspiegelscanners
Ablenkgeschwindigkeiten bis 1.000 m/s



Prozessparameter Aufbau:
400 W, 200 m/s, 3 µm Schichtdicke, 316L mit Partikelgröße $d_{90} < 10 \mu\text{m}$

Martin Erler, M. Sc.

14

„Prozessoptimierung für die generative Fertigung von Mikro-Wärmeübertragern“

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!



Martin Erler, M. Sc.

15

Simulationsgestützte Automatisierung der additiven Fertigungskette

Nils Keller

Additive Works GmbH

Beruflicher Werdegang Nils Keller

Nils Keller, geboren am 23.02.1986 in Bremen, studierte an der Universität Bremen Physik und schloss im Jahr 2011 das Studium mit dem Master of Science ab. Dabei wurden Bachelor- und Masterarbeit im Bereich der nichtlinearen Dynamik im Institut für theoretische Physik angefertigt. Nach Abschluss des Studiums begann Herr Keller direkt die Promotion bei Prof. Dr. Vasily Ploskhin im Bereich der computergestützten Materialwissenschaft und makroskopischen Simulation innerhalb der Airbus Stiftungsprofessur für Integrative Simulation und Engineering von Materialien und Prozessen (ISEMP). Seit Beginn seiner Tätigkeit leitete Herr Keller dort die Gruppe „Additive Layer Manufacturing and Joining“, in der zahlreiche Projekte unter der Leitung von Herrn Keller akquiriert und durchgeführt wurden. Der Schwerpunkt der eigenen wissenschaftlichen Arbeit liegt in der makroskopischen Prozesssimulation additiver Fertigungsprozesse. Ende 2015 gründete er gemeinsam mit drei Kollegen aus dem Lehrstuhl heraus die Additive Works GmbH, ein Software-Unternehmen, welches sich mit der Weiterentwicklung und Nutzung von Numerik und Simulationen zur Verbesserung von additiven Herstellungsprozessen befasst und über das EXIST-Forschungstransfer Programm gefördert wurde.



Kurzfassung

Simulationsgestützte Automatisierung der additiven Fertigungskette

Additive Fertigungsprozesse oder 3D-Druck Verfahren gehören zu stark automatisierten Möglichkeiten zur Herstellung von Werkstücken anhand eines Computermodells (CAD) und finden bereits Einsatz in den unterschiedlichsten Branchen. Insbesondere die metallischen Verfahren, wie das pulverbettbasierte Laserschmelzen, gewinnen zunehmend an Bedeutung in der Industrie. Dennoch gibt es zahlreiche Aufgaben vor und nach dem Fertigungsprozess, die mit zeitaufwendigen manuellen Arbeiten verbunden sind: die Auswahl der Orientierung des Bauteils in der Baukammer und das Hinzufügen von zusätzlichen Stützkonstruktionen, die im Nachhinein wieder entfernt werden müssen, sind dabei zwei extrem einflussreiche Randbedingungen, die für jede Geometrie neu entwickelt werden müssen. Die Auswahl der entsprechenden Parameter ist derzeit noch stark vom jeweiligen Know-How abhängig, sodass auch Prozessergebnis und -qualität stark variieren kann.

Durch die FEM-Simulation des Bauprozesses und der numerischen Analyse und Auswertung verschiedener Kriterien können bereits vor dem Start des Fertigungsprozesses ideale Randbedingungen für den Prozess und die folgende Nacharbeit abgeleitet werden. Mit Hilfe der Amphyon-Software können solche Ergebnisse sehr schnell über Grafikkarten parallelisierte Algorithmen ermittelt werden und bei Festlegung von applikationsspezifischen Anforderungen voll automatisiert generiert und zur Vorbereitung der Prozessdaten genutzt werden. Hierbei soll in Zukunft insbesondere auch die Erstellung von optimierten Stützstrukturen mit einbezogen werden, wobei der Materialverbrauch bei steigender Maßhaltigkeit reduziert werden kann. Erst durch eine solche Berücksichtigung der physikalischen Prozesseinflüsse und der Integration entsprechender Werkzeuge in die Prozesskette kann das Potential und der hohe Automatisierungsgrad des 3D-Drucks bei Laserschmelzverfahren voll ausgeschöpft werden.



Simulationsgestützte Automatisierung der additiven Fertigungskette

4. Mitteldeutsches Forum am 17.05.2017
3D-Druck in der Anwendung
Hochschule Mittweida

Nils Keller
Additive Works GmbH

Gefördert durch:



Additive Works GmbH

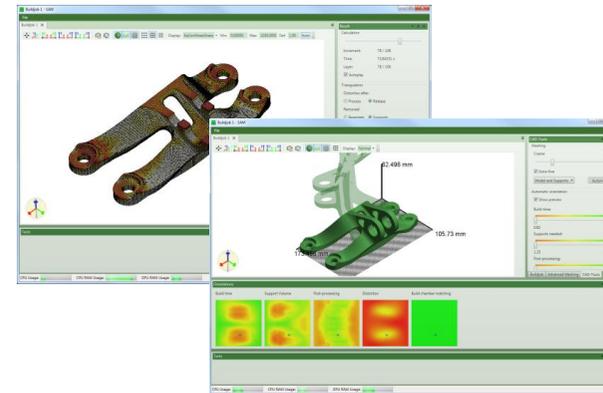
- Durch „EXIST – Forschungstransfer“ gefördert
- Dezember 2015 gegründet
- Vision: „AM (LBM) als One-Click Verfahren“
- Software-Produkt seit April 2016:

Vorteile durch Amphyon:

- Schnelle Bewegung von Geometrie
- Erhöhte Maßhaltigkeit
- Bessere Oberflächenqualität
- Höhere Prozessstabilität

Bessere Bauteilqualität **und** Kostenerstarnis in der Prozessvorbereitung, im Prozess selbst und bei der Nachbearbeitung

Amphyon



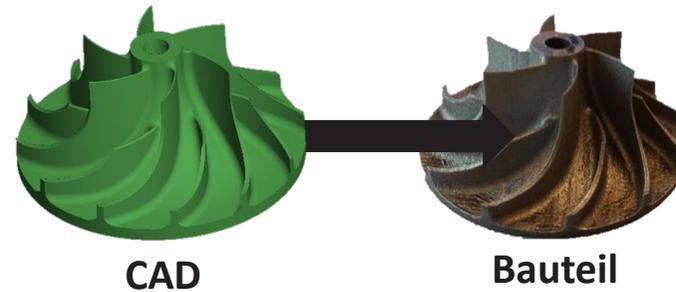
additiveworks

Additive Manufacturing

3D Druck-Verfahren als neue Herstellungstechnologien:

- Stereolithografie
- Fused Deposition Modeling
- **Laserschmelzen (LBM, SLM, DLMS, ...)**
- Elektronstrahlschmelzen (EBM)

Hochautomatisierter Prozess



Quellen: Fraunhofer ILT, APWorks, Airbus



Prozessvorbereitung

Konstruktion

- Prüfung der Geometrie („fertigungsgerechtes Design“)
- Platzierung und Orientierung des Bauteils in der Baukammer
- Hinzufügen und Anpassung von zusätzlichen Stützstellen
- Auswahl von Prozessparameter wie Scanstrategie

↓ Prozess



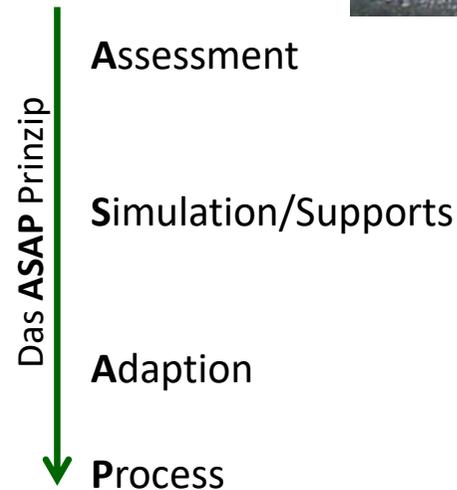
Einfluss der Prozessvorbereitung

- Verzug
- Eigenspannungen
- Risse
- Recoater interference

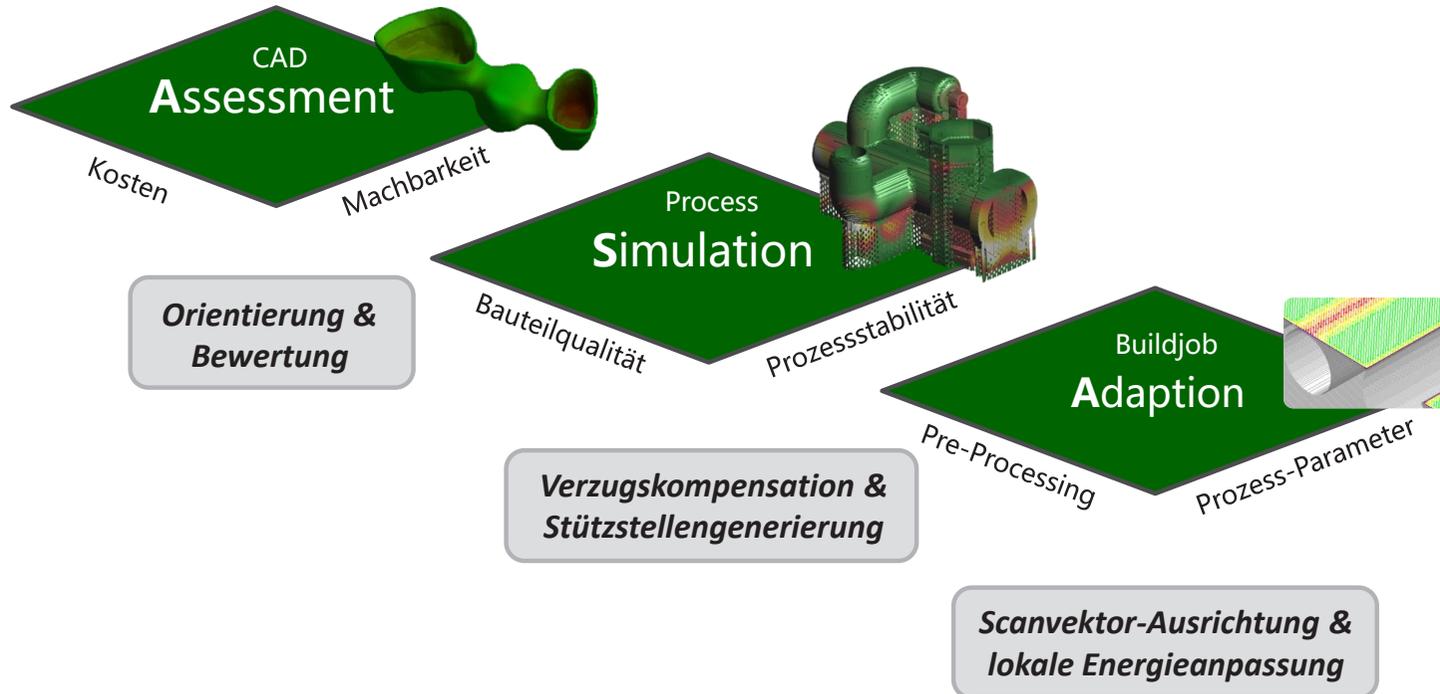


Automatisierbare Prozessvorbereitung:

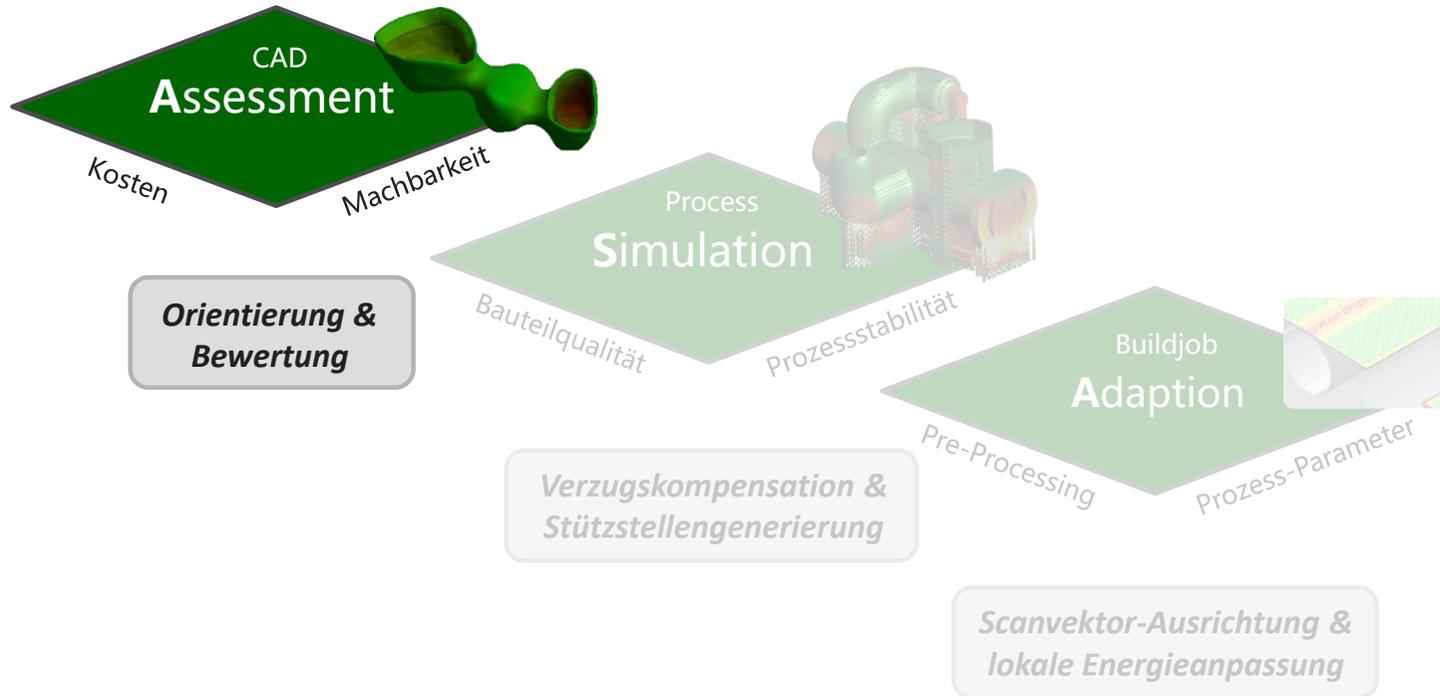
1. Ermittlung der optimalen Orientierung im Bauraum
2. Prozesssimulation zur Vorhersage der Prozessstabilität und Verzug
3. Erstellung von optimierten Stützstrukturen
4. Optimierung der Belichtung



Das ASAP-Prinzip



Das ASAP-Prinzip

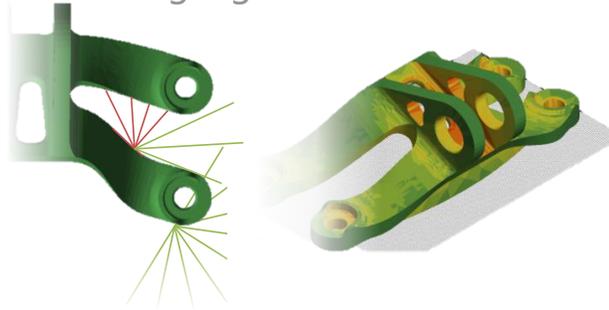


Bauteil-Orientierung

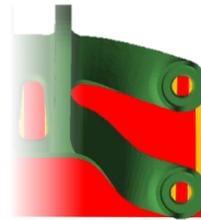
8

Bewertung aller Aufbaurichtungen

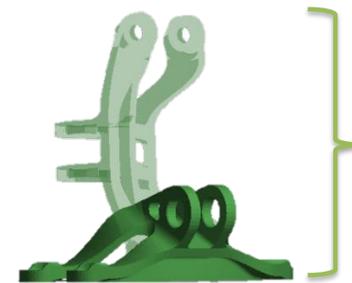
Zugänglichkeit



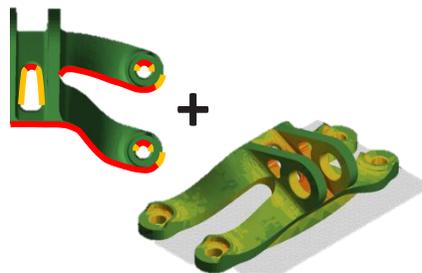
Stützstellenvolumen



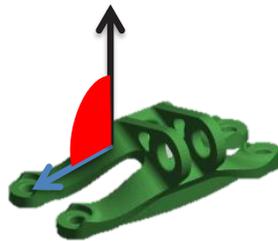
Bauzeit



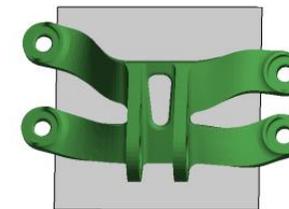
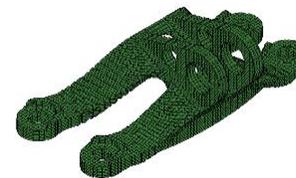
Nachbearbeitungsaufwand



Funktionsflächen



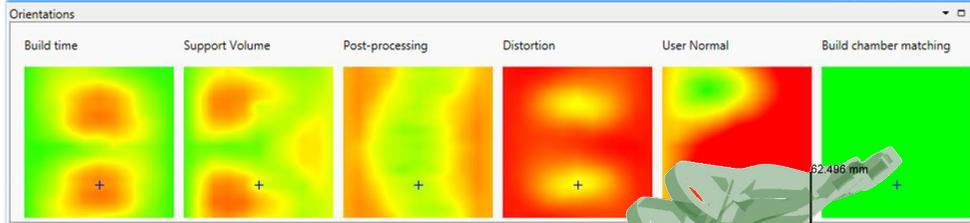
Verzugstendenzen



Bauraum



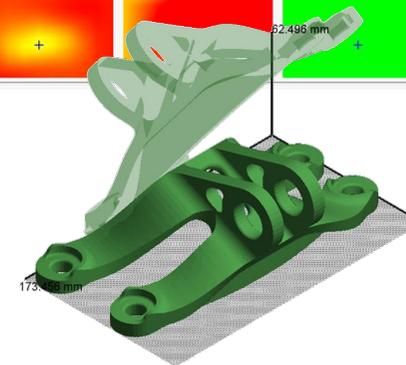
Analyse aller Aufbaurichtungen



Volle Individualisierung der CAD-Analyse



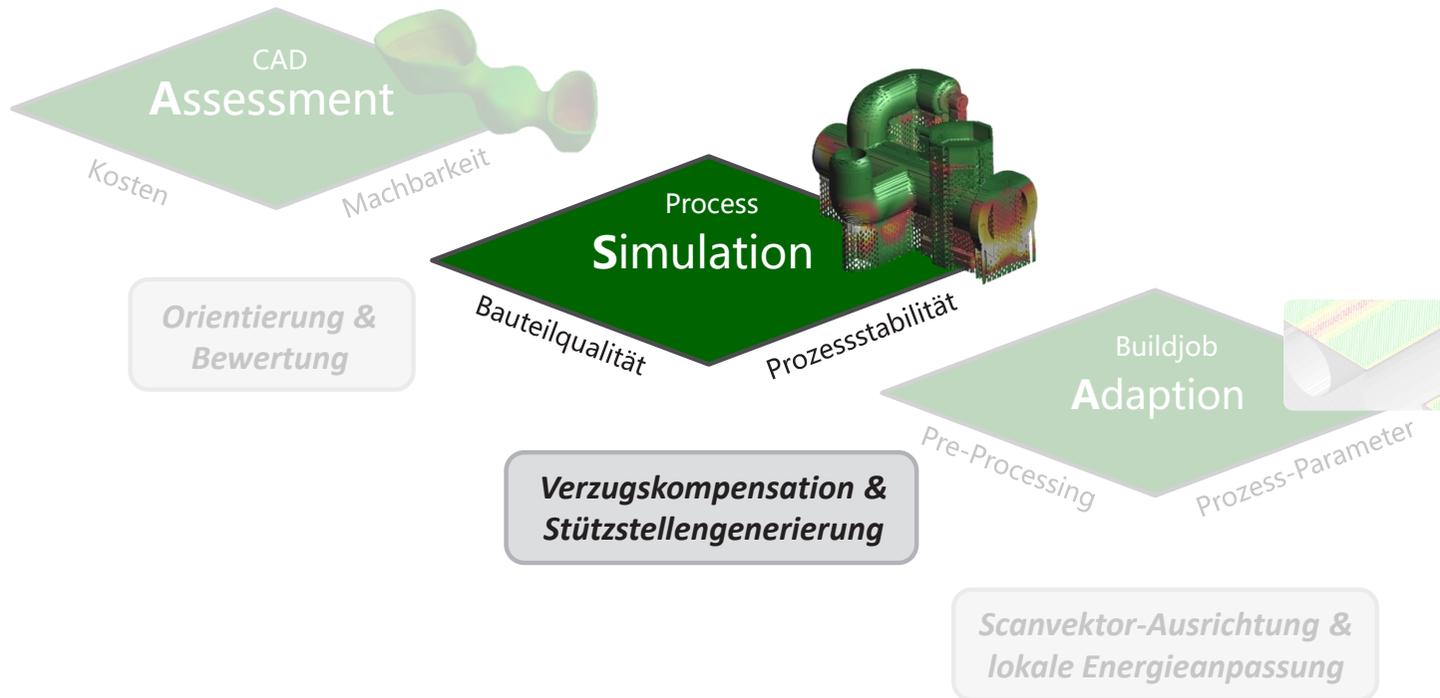
**Optimale Orientierung
+
Bewertung**



Kann bei festgesetzten Kriterien automatisiert in die Prozessvorbereitung integriert werden

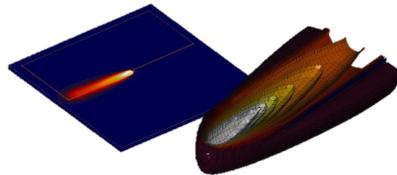


Das ASAP-Prinzip



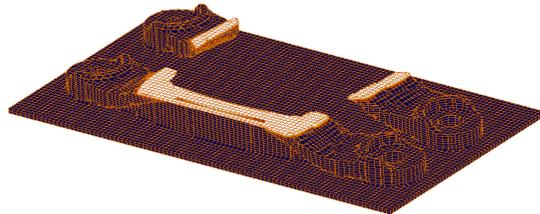
Prozesssimulation

„Full scale“ Simulation



Problem: kilometerlange Schweißnähte

Schichtweise termo-mechanische Simulation



Problem: ungenau

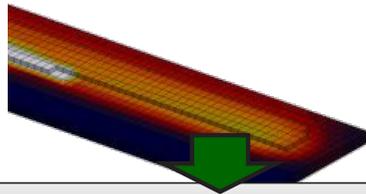
Multi-Skalen Ansatz

A diagram illustrating a multi-scale simulation approach. It shows a large, complex 3D model of a mechanical part (top) and a smaller, more detailed 3D model of a specific section (bottom). A large green arrow points from the smaller model to the larger one, indicating the flow of information or the reduction of the problem to a static mechanical one.

- Kalibrierung der Wärmequelle
- Berechnung der Lasten
- **Reduzierung zu statisch mechanischen Problem**

Kalibrierung der Prozesssimulation

Konventioneller Ansatz
(Mikro-Skalen-Simulation(en))



Randbedingungen(?)

Vorteile:

+ Einflussparameter bekannt

Nachteile:

- Zeitintensiv

- Kompliziert

- Instabil

- Unnötig

Amphyon-Kalibrierung
(Schnelle experimentelle Kalibrierung)



Randbedingungen

+ Einfach zu nutzen

+ Hohe Genauigkeit

+ Stabil

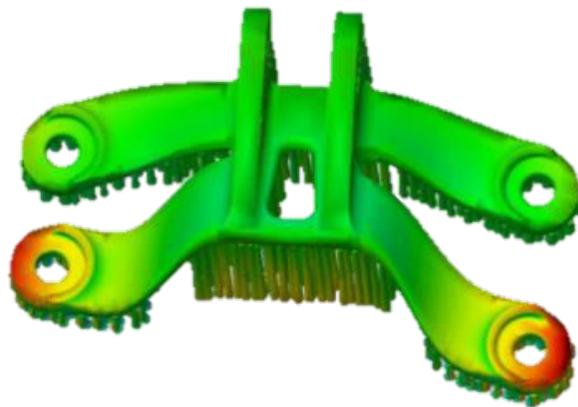
+ "Selbst-validierend"

- Einflussfaktoren unbekannt



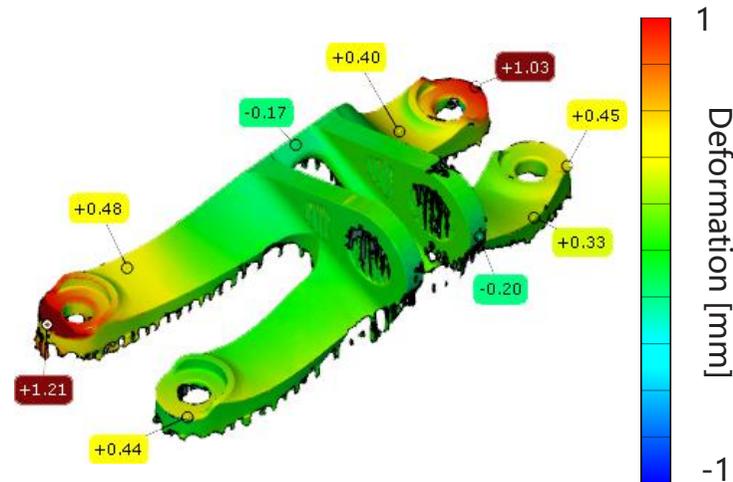
Validierung des Spannungszustands

Durch Simulationsergebnis deformierte Oberfläche und gemessene Oberfläche im Vergleich zum Originalmodell:



Simulierte Geometrieabweichung

(Projektion auf CAD)



Gemessene Geometrieabweichung

(Abtrennung ohne Wärmenachbehandlung)

Verzugskompensation durch Vor-deformation

Vorhersage und Kompensation von bleibenden Verzügen

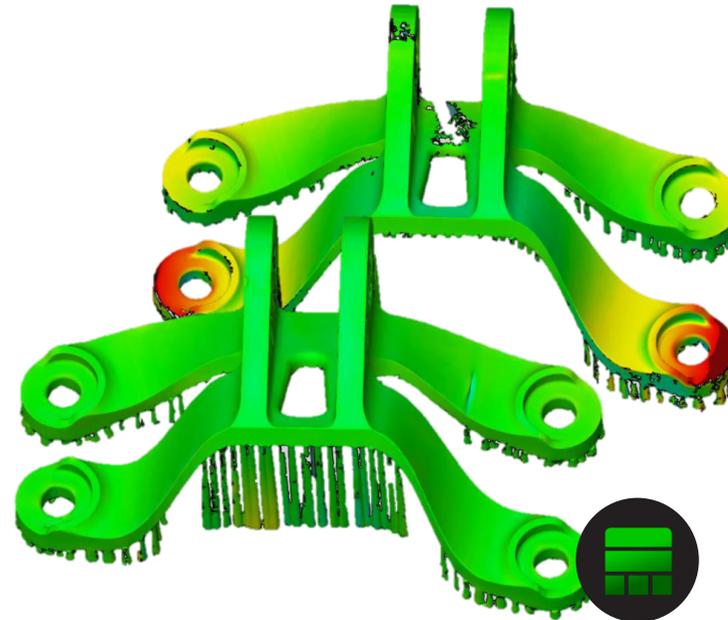
Prozessverzug



Rechendauer: ~ 10min

Endverzug

(Trennung von Bodenplatte direkt nach Prozess)



Stützstellenoptimierung

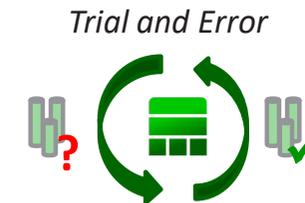
1. Experimentell:

- Manuelle Erstellung der Stützstellen
- Manuelle Verstärkung der Stützen bei hohen Formabweichungen oder Rissen
- Manuelle Reduzierung der Stützen bei stabilem Prozess (Kostensparnis)



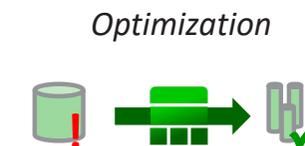
2. Simulativ:

- Manuelle Erstellung der Stützstellen
- Manuelle/Automatische Verstärkung der Stützen bei kritischen Werten
- Manuelle/Automatische Reduzierung der Stützen bei nicht kritischen Werten



3. Optimiert:

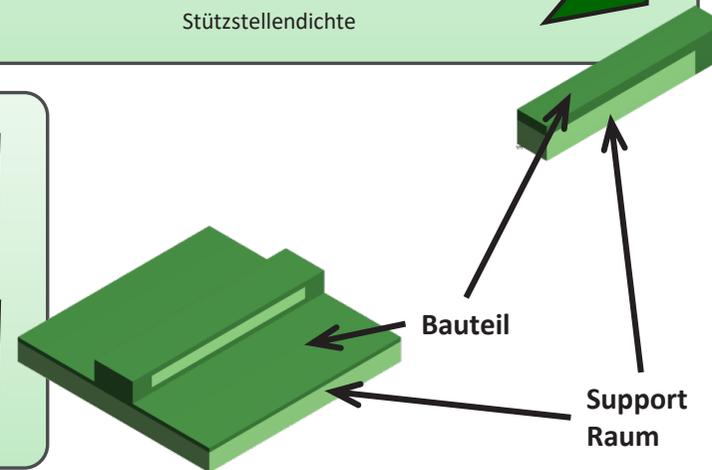
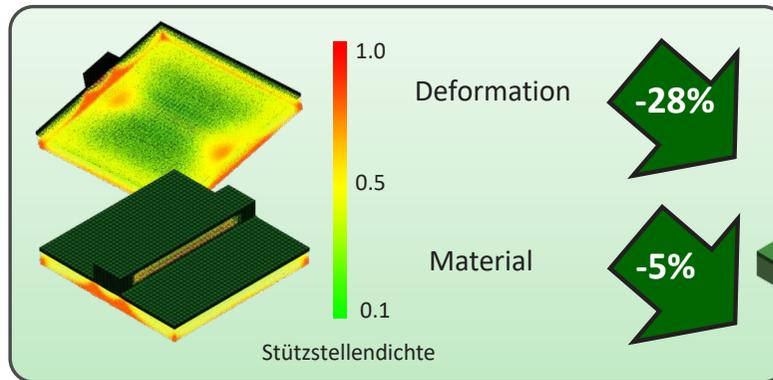
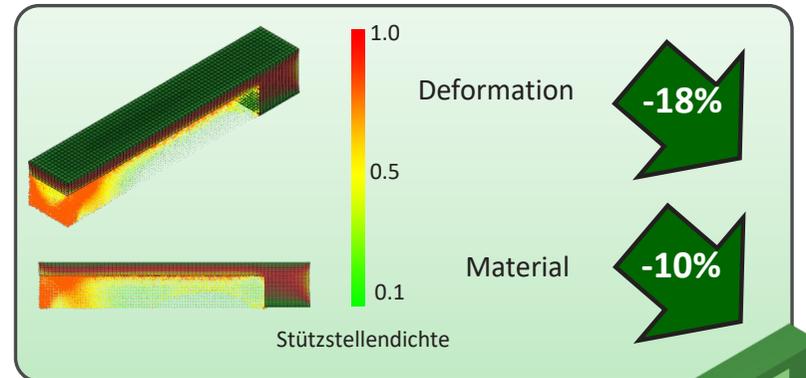
- Optimierung im Stützen ‚Design Space‘ in Hinblick auf Verzug, Spannung, etc. mit Minimierung des Notwendigen Supportvolumens
- Erstellung der Stützen anhand des Optimierungsergebnisses



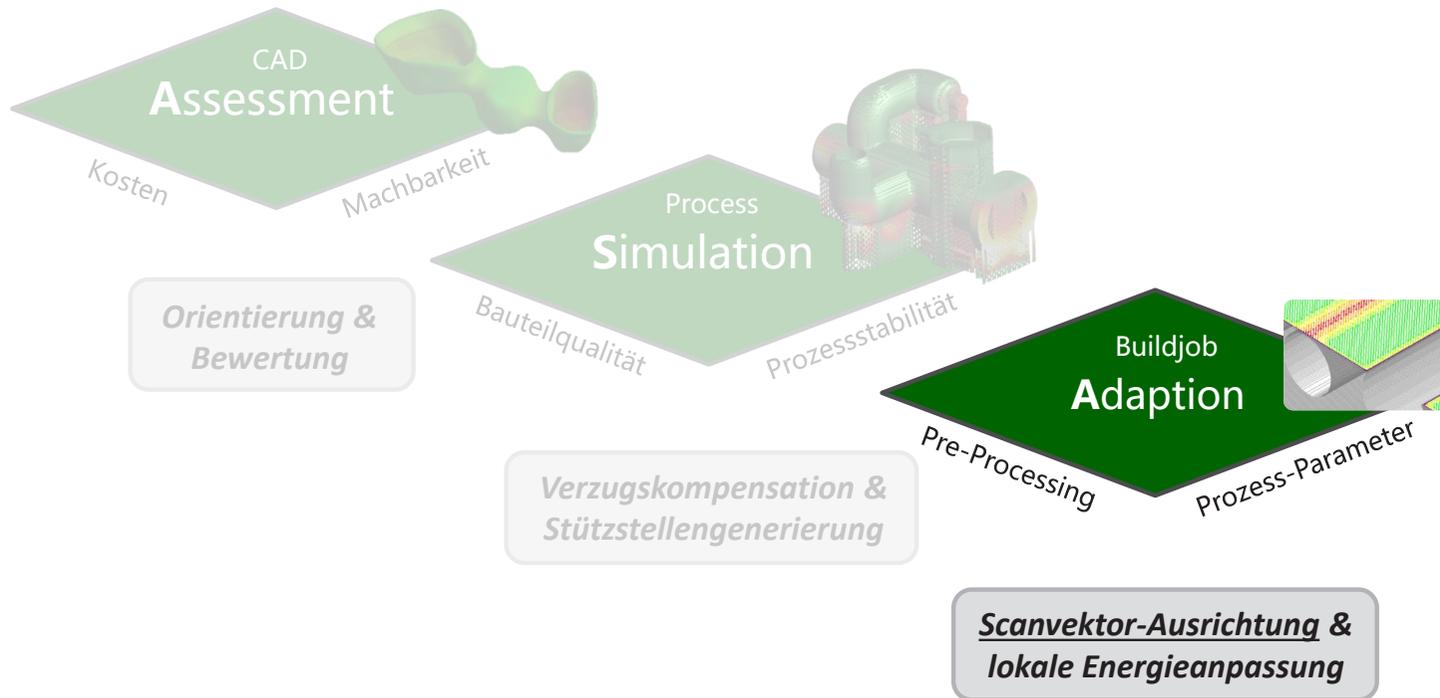
Stützstellenoptimierung

Vorteile:

- Keine manuelle Stützstellenwahl im Vorfeld nötig
- Keine allgemeine Beschränkung auf bestimmte Geometrien
- Applikationsspezifische Optimierungskriterien



Das ASAP-Prinzip

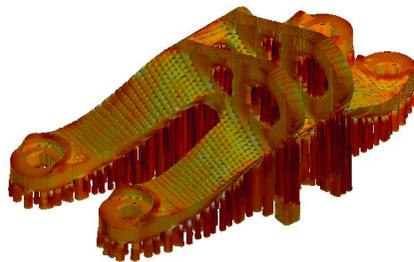


Spannungsminimierende Scanstrategie

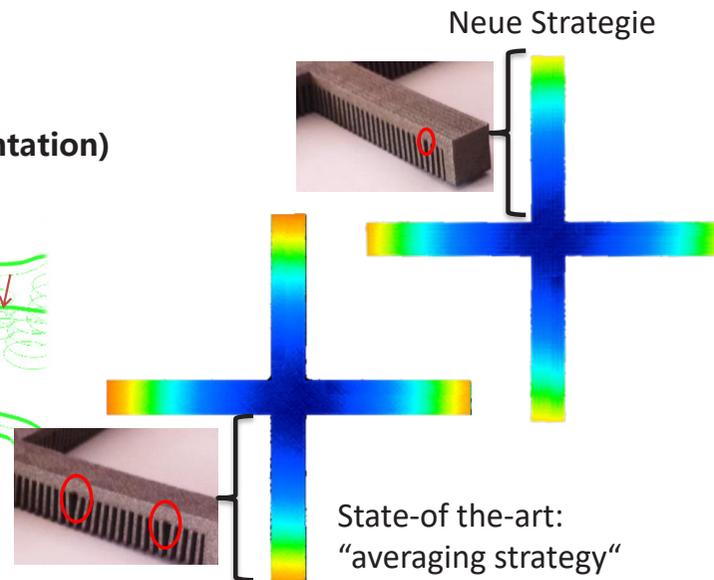
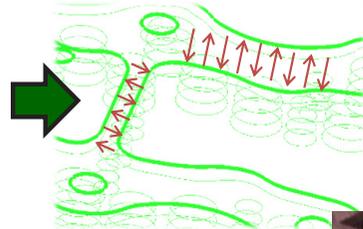
Nutzung der Berechnungsergebnisse: **Scanvektoren-Ausrichtung orthogonal zur Hauptspannungsrichtung**

- Reduzierung von Spannungen und plastischer Verformung während des Prozesses
- Verminderung des Verzugs
- Steigerung der Prozessstabilität

Mechanische FEA



Rehatching (orientation)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

19

Kontakt

Nils Keller

Dr. rer. nat.
Geschäftsführer / CEO
Additive Works GmbH
Leher Heerstr. 173B
28357 Bremen

Tel.: +49-(0)421-331001-21
E-Mail: keller@additive.works

Office

Additive Works GmbH
BITZ
Fahrenheitstr. 1
28359 Bremen

Tel.: +49-(0)421-331001-20
E-Mail: info@additive.works



Gefördert durch:



Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen

Philipp Klimant

Technische Universität Chemnitz

Beruflicher Werdegang Philipp Klimant

Philipp Klimant studierte Elektrotechnik/Automatisierungstechnik an der Hochschule Mittweida. In der Zeit arbeitete er anderthalb Jahre bei der Siemens AG in der Entwicklung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) und zudem absolvierte er ein halbjähriges Praktikum bei Veeco Instruments in Santa Barbara, Kalifornien.

Seit September 2007 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse an der Technischen Universität Chemnitz. Dort leitet er seit 2011 die Abteilung Prozessinformatik und Virtuelle Produktentwicklung. Seit Februar 2016 ist er zudem mit dem Aufbau einer Forschergruppe am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU beauftragt.

Von April 2013 bis März 2015 leitete er zudem die Zentrale Koordinierungsstelle des Chemnitzer Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD) der TU Chemnitz und des Fraunhofer IWU. Seit Januar 2017 ist er Standortkoordinator Chemnitz der Sächsischen Allianz für Material- und Ressourceneffiziente Technologien (AMARETO), einem Verbundprojekt zwischen der TU Dresden, TU Bergakademie Freiberg, TU Chemnitz und dem Fraunhofer IWU.

2013 promovierte er über Virtuelle Inbetriebnahme/Maschinensimulation mittels Virtual Reality. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Automatisierungstechnik, Virtual Reality und Augmented Reality, Maschinen- und Anlagensimulation sowie Medizintechnik.



Kurzfassung

Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsoberflächen an SLM-Bauteilen

Autoren: Technische Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz, Dr.-Ing. Philipp Klimant, Dr.-Ing. Martin Dix

Abstract:

Die Herstellung von metallischen Bauteilen mittels selektivem Laserschmelzen erlaubt die Umsetzung von bisher unerreichten Bauteilgeometrien sowie ein Höchstmaß an Fertigungsflexibilität. Bauteilbezogen stellen jedoch die hohen inneren Eigenspannungen sowie die geringe Oberflächenqualität des Urformprozesses Hemmnisse hinsichtlich des Einsatzes bei hochpräzisen Bauteilen dar.

Zur Erzielung von hochbelastbaren und eng tolerierten Funktionsflächen, wie sie z. B. im Werkzeugbau üblich sind, bedarf es neuer Ansätze in der Prozesskettengestaltung sowie neuer Prozesse für die Feinbearbeitung. Die prozesskettenübergreifende Modellierung des Bauteils mittels eines sogenannten virtuellen Zwillings bietet die Möglichkeit nicht nur alle relevanten Daten über den Produktlebenszyklus zu erfassen sondern diese auch mit Simulationsdaten zu verknüpfen, um beispielsweise Bauteilverzüge zu minimieren oder durch inverse Vorhaltung schon im Urformprozess zu kompensieren. Neben dem Datenmanagement wird eine kombinierte Endbearbeitung zur Erzielung höchster Oberflächengüten vorgestellt. So werden durch die Kombination von Fräsen und Glattwalzen auf einem Maschinensystem mittlere Rautiefen unter 1 μm erreicht. Aufgrund der Tatsache, dass die Werkzeuge geometrisch einfach sind und die Formkontur durch die Werkzeugbahn erzeugt wird, ist eine hohe geometrische Flexibilität umsetzbar.

Die vorgestellten Methoden und Verfahren sind auf die Verarbeitung nahezu aller metallischen Werkstoffe übertragbar und erlauben eine signifikante Erhöhung der umsetzbaren Fertigungsqualität bei einem Minimum an Kosten und Maschineninvestition.



Fakultät für Maschinenbau
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse
Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr. h. c. mult. Reimund Neugebauer
Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz

Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen

Dr.-Ing. Philipp Klimant

Abteilungsleiter Prozessinformatik und Virtuelle
Produktentwicklung

Email: philipp.klimant@mb.tu-chemnitz.de

Tel.: +49 (0)371 / 531-36911



Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



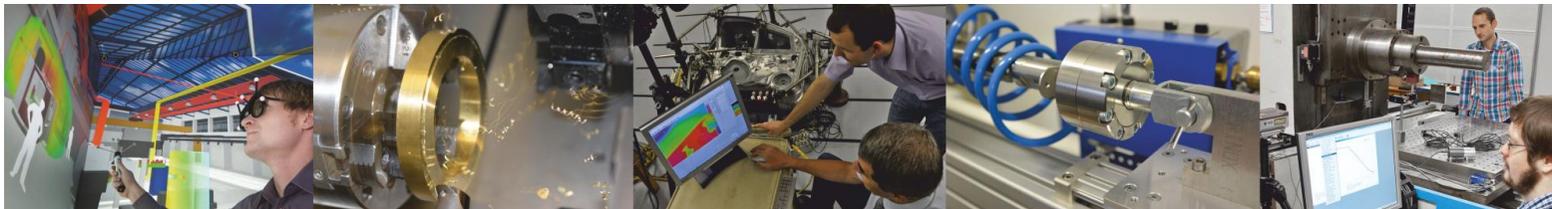
Überblick: Zahlen und Fakten der Professur

Personal

- 1 Universitätsprofessor (beurl.)
- 1 Professor (Wahrnehmung der Professur)
- 9 apl. & Honorarprofessoren
- 48 Mitarbeiter
- 25 HiWi's
- 10 Werkstattmitarbeiter
- 61 Promovenden

Lehr- und Forschungsschwerpunkte

- Werkzeugmaschinen
- Fertigungstechnik/Spanen
- Steuerungs- und Regelungstechnik
- Prozessinformatik/Virtuelle Produktentwicklung

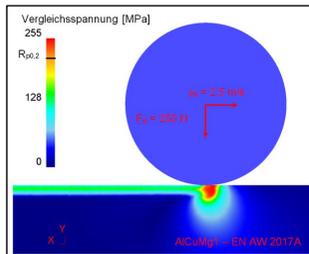
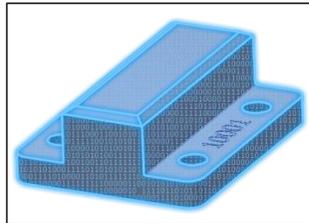


Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



2

Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



- 1. Ausgangspunkt/ Motivation
- 2. Virtueller Zwilling
 - Anwendungsmöglichkeiten
 - Begriffsdefinition und Abgrenzung
 - Entwicklung über die Produktentstehung
- 3. Endbearbeitungsverfahren Glattwalzen
 - Projektansatz
 - Weiterentwicklung des Glattwalzprozesses
- 4. Kombinierte Endbearbeitung
 - Vor- und Nachteile
 - Anforderungsprofil der Werkzeugmaschine
 - Maschinenlösung
- 5. Zusammenfassung

Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



3

Trends in der Produktion von metallischen Bauteilen



Kundenindividuelles Implantat



Spritzgusswerkzeug [wegu.de]



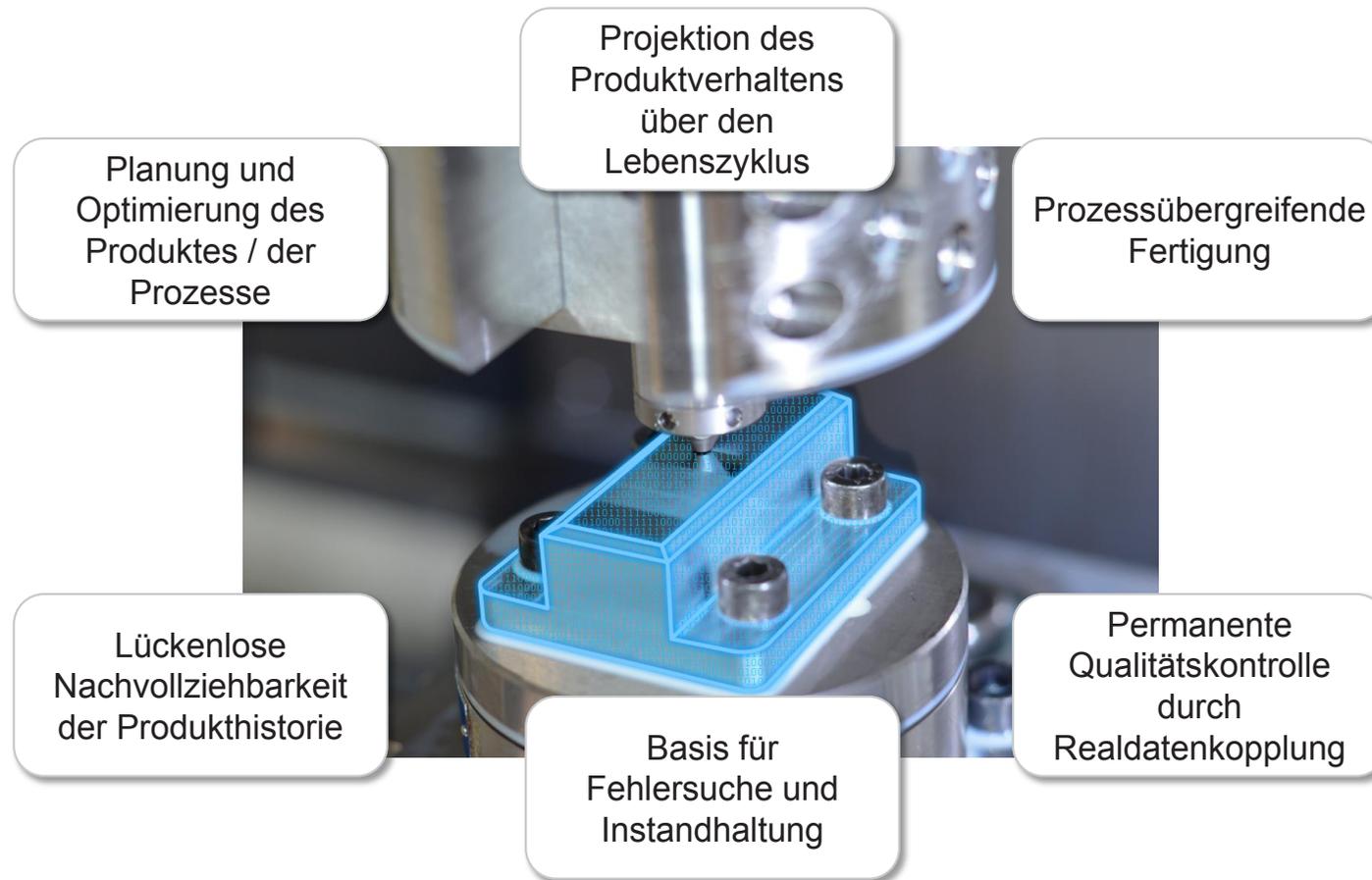
Umformwerkzeuge [ibbz.de]

- Trend „**customised Products**“ → Abnahme der Stückzahlen pro Serie → **Verkürzung Produktionsplanung, -anlauf und Fertigung** notwendig
 - Trend „**Bauteilintegration**“ → Zusammenführung vieler Funktionen in einem Bauteil → **effiziente Fertigung von komplexen Strukturen in hochfesten Werkstoffen** notwendig
 - Trend „**Gewichtsreduktion**“ → Reduktion des Bauteilgewicht zur Verbesserung der Produkteigenschaften → **Fertigung dünnwandiger, organischer Strukturen** notwendig
- **Konventionelle Prozessketten gelangen an ihre geometrischen Grenzen**
- **Erzeugbare Oberflächenqualität bei generativen Verfahren unzureichend für Funktionsflächen im Maschinenbau**
- **Losgröße 1 bedingt umfassende Fertigungsplanung und Qualitätskontrolle**

Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



4



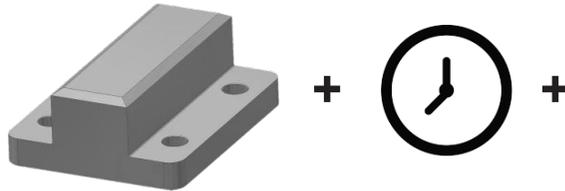
Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen

Durchgängige Datenintegration

- Bündelung und Integration der Daten der Planung und Simulation eines Produktes
- Bspw. Konstruktionsdaten (CAD), Planungsdaten (CAM), Metadaten (Toleranzvorgaben, Stücklisten), Simulationsdaten (FEM, Prozesssimulation)

Realdatenmanagement

- Sammelt real erfassten/gemessenen Daten
- Abgreifen, Auswerten und Wiedergeben der realen Daten, die aus dem Produkt, der Maschine, dem Prozess und der Fabrik hervorgehen



Digitaler Zwilling

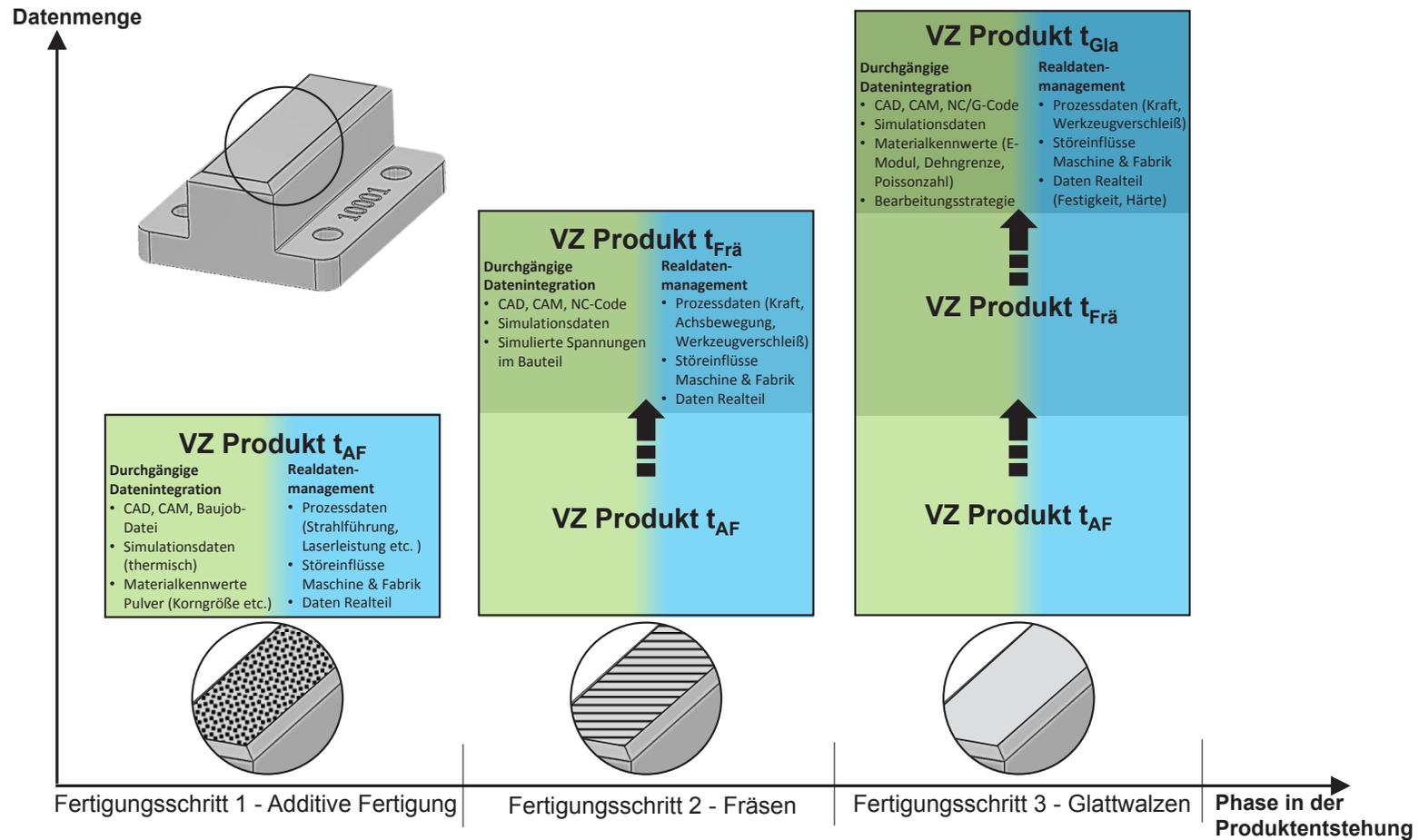
- Datenorientiert
- Verknüpft real erfasste Daten mit Planungs-/ Simulationsdaten sowie Verhaltensmodellen
- Condition Monitoring, Predictive Maintenance, Big Data, Gesundheitsindex, Betriebsdaten, ...

Virtueller Zwilling

- Modell- und Zeitorientiert
- Verknüpfung von Messdaten mit Planungs- und Simulationsmodellen
- Verortung der Daten an einer 3D-Geometrie (situations- und anwendergerecht)



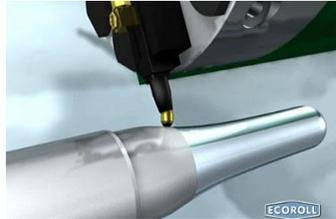
Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



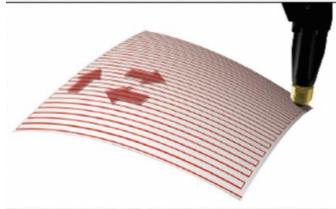
Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



7



Quelle: Ecoroll



Quelle: Ecoroll



Quelle: Teamtec

Glattwalzen → umformendes Verfahren zur Oberflächenfeinbearbeitung

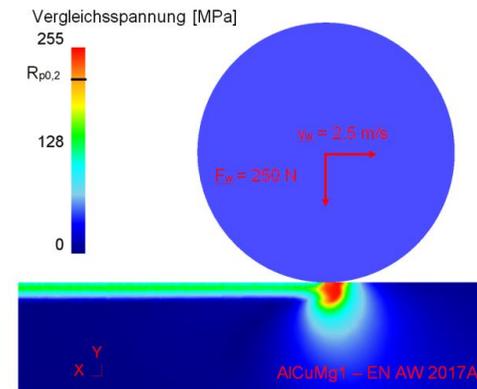
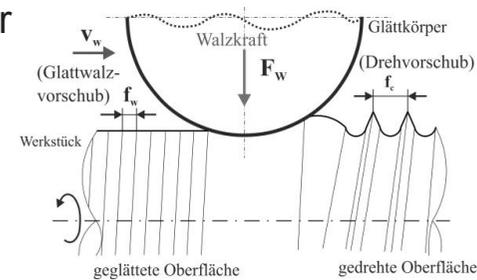
Bisher nur Bearbeitung von **rotationssymmetrischen** Bauteilen auf **Drehmaschinen mittels Glattwalzen umgesetzt**



3D-Druck (SLM) ermöglicht komplexe Strukturen und Oberflächen, Defizite in der Oberflächenqualität

Adaption des Verfahrens zur Endbearbeitung von **prismatischen** Bauteilen (Plan- und Freiformflächen) sowie Integration in die Frästechnik

- Abwälzen des Glättkörpers unter Druckkraft auf der Werkstückoberfläche
- Umformen der Oberflächenstruktur und Reduktion der Rauheit
- Verfahrensvorteile gegenüber spanenden Endbearbeitungen (z.B.: Schleifen):
 - **hohe Flexibilität** durch NC-Werkzeugpositionierung
 - in konventionelle Dreh- o. Frästechnik **integrierbar**
 - Geringere **Investitionskosten**
 - **Keine thermische Bauteilbelastung**
 - **hochqualitative Oberflächen** erzeugbar
 - Einbringen günstiger **Druckeigenspannungen**
 - Erhöhung der **Randschichthärte**
 - größere **Verschleißbeständigkeit**



Kombinierte Endbearbeitung auf einer Werkzeugmaschine

Vorteile

Spanende Formgebung (Fräsbearbeitung)

- Erzeugen präziser Formen und Flächen ($< IT4$)
- maschinelle Entfernung von SLM-Stützstrukturen

Nachteile

- Freilegen von Eigen-
spannungen des SLM \rightarrow
Bauteilverzug
- begrenzte Oberflächen-
qualität ($Rz > 2\mu\text{m}$)

Finishprozess (Glatt- / Festwalzen)

- gezieltes Einbringen von
positiven Druckspannungen
- Erreichbare Oberflächen-
qualität von $Rz < 1\mu\text{m}$

- Kombination aus kraft-
gesteuertem Prozess mit
definierter Bahnbewegung
- bisher auf rotations-
symmetrische Werkstücke
beschränkt

Unterschiedliche Anforderungen an eine Werkzeugmaschine

Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



Fraunhofer

IWU 10

Anforderungsprofil der Werkzeugmaschine

**Spanende Formgebung
(Fräsbearbeitung)**

**weggesteuerte
Verfahrbewegung**

- hohe Positioniergenauigkeit
- möglichst steifer Maschinenaufbau
- thermisch stabil

**Finishprozess
(Glatt- / Festwalzen)**

**kraftgesteuerte
Bewegung**

- einhalten eines Verfahrbereiches
- definierte Steifigkeit
- hohe Dynamik



Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



11

- Verwendung einer Werkzeugmaschine mit parallelkinematischem Aufbau
- Spezifische Eigenschaften des Antriebssystems:
 - hochdynamische „5-achsige“ -Werkzeugmaschine → hohe geometrische Flexibilität
 - Aufgrund des Konstruktionsprinzips werden alle Prozesskräfte über die Kugelgewindespindeln an die Positionierantriebe weitergeleitet → reduzierte Aufwendung an Messtechnik
 - Steuerung und Regelung der Kräfte über das Motordrehmoment → Einsparung von Aktoren
- Unterstützung der CAM-Strategie durch individuelle Simulation der Bearbeitungsprozesse zur Erzeugung eines NC-Programmes zur kombinierten Endbearbeitung



Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen

- Neue Prozesskette erlaubt Sprung in der umsetzbaren Formflexibilität und Qualität der Funktionsflächen
- Virtueller Zwilling → integrale Lösung zur Fertigungsplanung, -steuerung sowie Qualitätssicherung
- Kombinierte Endbearbeitung erlaubt Umsetzung komplexer Oberflächen mit Qualitätsklasse <IT5 (Ziel kommender Entwicklungsschritte IT3)
- Gemittelte Rautiefe von $Rz < 1 \mu\text{m}$ umgesetzt (Schleifqualität)
- Oberflächenverfestigung und induzierte Druckspannung → hohe mechanische Oberflächenstabilität ohne Wärmebehandlungsprozesse

Initiierung Anwenderkonsortium → Bei Interesse sprechen Sie uns an oder mailen Sie uns!

Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



13

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Philipp Klimant

Abteilungsleiter Prozessinformatik und Virtuelle Produktentwicklung

Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, TU Chemnitz

Email: philipp.klimant@mb.tu-chemnitz.de

Tel.: +49 (0)371 / 531-36911

Das Projekt HEIGHT wird aus Mitteln des Freistaates Sachsen und der Europäischen Union im Rahmen des Programms InnoTeam im Zeitraum vom 01.08.2016 bis 31.07.2020 gefördert.



Neue Prozesskette zur Fertigung von hochbelastbaren Funktionsflächen an SLM-Bauteilen



14

Laserstrahlschmelzprozess - Einflussgrößen und Sensoren für die Überwachung

Stefan Szemkus

Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH

Beruflicher Werdegang Stefan Szemkus

Gruppenleiter Additive Fertigung – ifw Jena

Master of Science Materialwissenschaften Uni Jena/TU Ilmenau (2014)

Six Sigma / Design for Six Sigma DFSS (2015)

Universitäre Forschungsprojekte:

„Studien zum Schmelzen und Erstarren im Powder Bed Fusion-Prozess“
Umicore AG (Masterarbeit)

„Study of ion conductivity in silver phosphate glasses“
Bundesuniversität von São Carlos/Brasilien

„Studien zur Bewegung von flüssigen Filmen im Temperaturgradienten“
Uni Jena (Bachelorarbeit)

Kontakt: s.szemkus@ifw-jena.de



Kurzfassung

Laserstrahlschmelzprozess- Einflussgrößen und Sensoren für die Überwachung
Szemkus S.; Straube, C.; Matthes, S.; Jahn, S.;
Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH (ifw Jena)

Abstract

Additive Verfahren sind ein wichtiges Element im Prozess der Produktentwicklung in vielen Unternehmen weltweit. Auch die Entwicklung und Qualifizierung additiver Prozesse und Prozesstechnik für die Fertigung von Endprodukten laufen stetig weiter. Nahezu täglich werden neue, erfolgreiche Anwendungen bekannt.

Additive Verfahren bieten Vorteile, hinsichtlich individueller, kundenspezifischer Produktlösungen, die eine hohe Flexibilität hinsichtlich Geometrie, Varianten und Stückzahl erfordern. Obwohl der Laserstrahlschmelzprozess an sich robust ist, können gegenwärtig in den seltensten Fällen Betriebszeiten von 6.000 Stunden und mehr pro Jahr mit einer Strahlschmelzanlage realisiert werden. Daher ist der Druck seitens der Industrie enorm, die Prozessstabilität und damit die Betriebsstunden pro Jahr zu steigern. Dafür ist es notwendig, sowohl prozesseigene als auch externe Einflussgrößen zu kennen und zu kontrollieren.

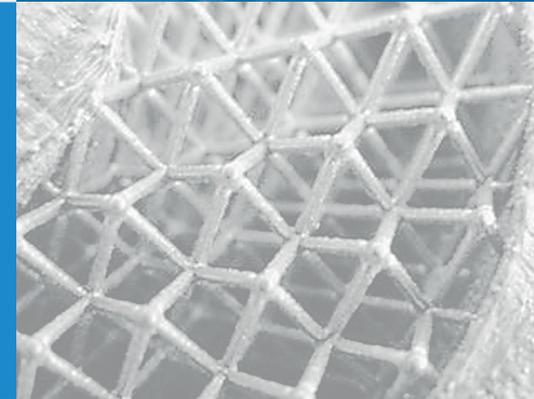
Im Beitrag werden Sensoren vorgestellt, die dabei unterstützen, sowohl beim eigentlichen Strahlschmelzprozess als auch entlang der Prozesskette, Einflussfaktoren zu kontrollieren und die Prozessstabilität zu steigern. Als Ergebnis von mehreren Forschungsprojekten sowie eigenen Verbesserungen konnte mit geringem Aufwand die Anzahl der Prozessabbrüche bzw. der Bauteilfehler (z. B. kurzfristige auftretende hohe Porosität im Bauteil) signifikant reduziert werden.



Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung

Laserstrahlschmelzprozess -
Einflussgrößen und Sensoren
für die Überwachung
- Kurzfassung -

Szemkus S.
Straube, C.
Matthes, S.
Jahn, S.



Additive Fertigung am ifw Jena



- SLM 250 HL
- Evobeam SLaVAm
- Labor-SLM-Eigenbau

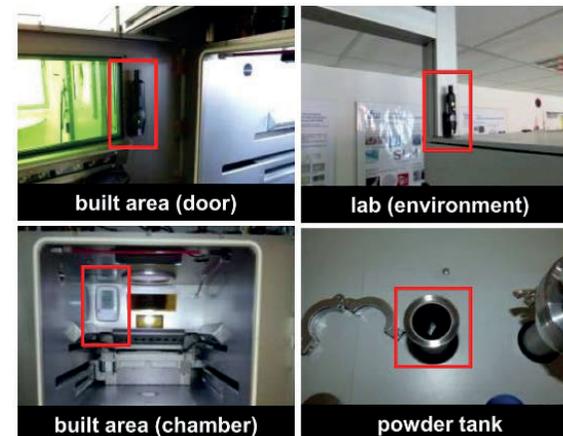
- 3 Vakuumöfen
- mehrere Atmosphärenöfen

- Zertifiziertes Werkstoffprüflabor

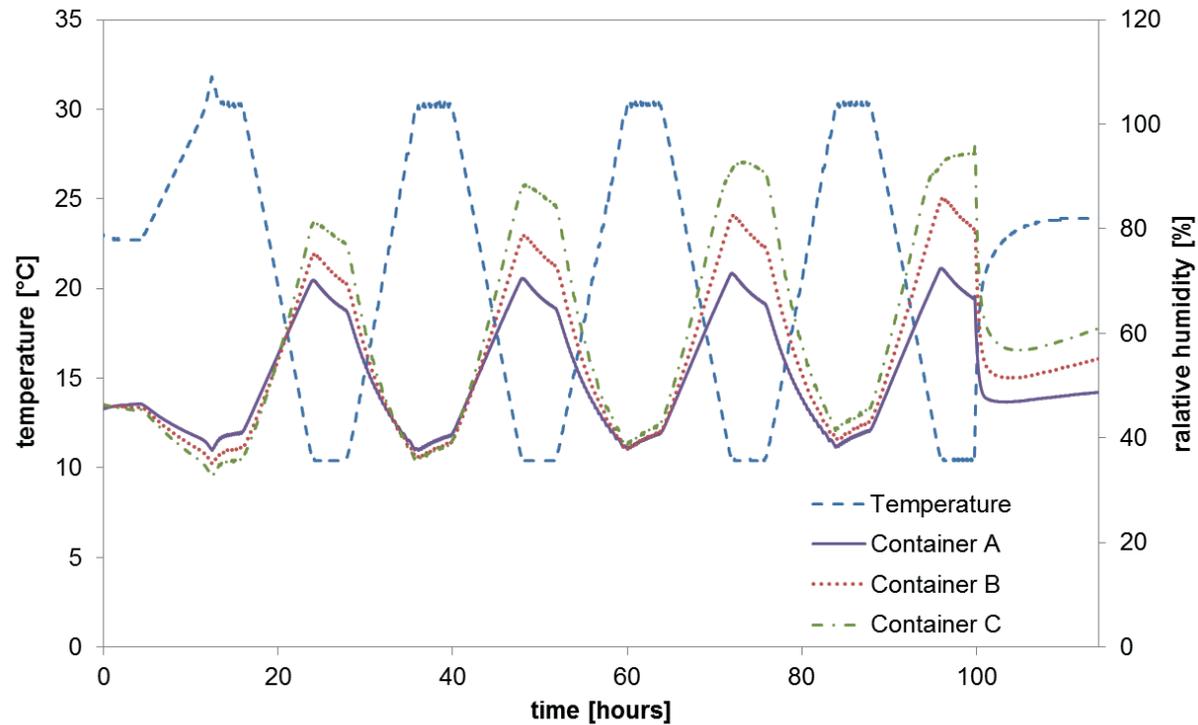
Sensorik in der Prozesskette Laserstrahlschmelzen

Einteilung in verschiedene Gruppen:

- » Einordnung in der Gesamt-Prozesskette:
 - » pre-process oder in-process oder post-process
- » In-process im Bauraum – Überwachungsfeld:
 - » lokal oder global
- » In-process im Bauraum – Sensortyp:
 - » optisch, akustisch, etc.
- » In-process im Bauraum – Fehlertyp:
 - » Verzug, Geometrie, Prozessabweichung, Volumendefekt, etc.

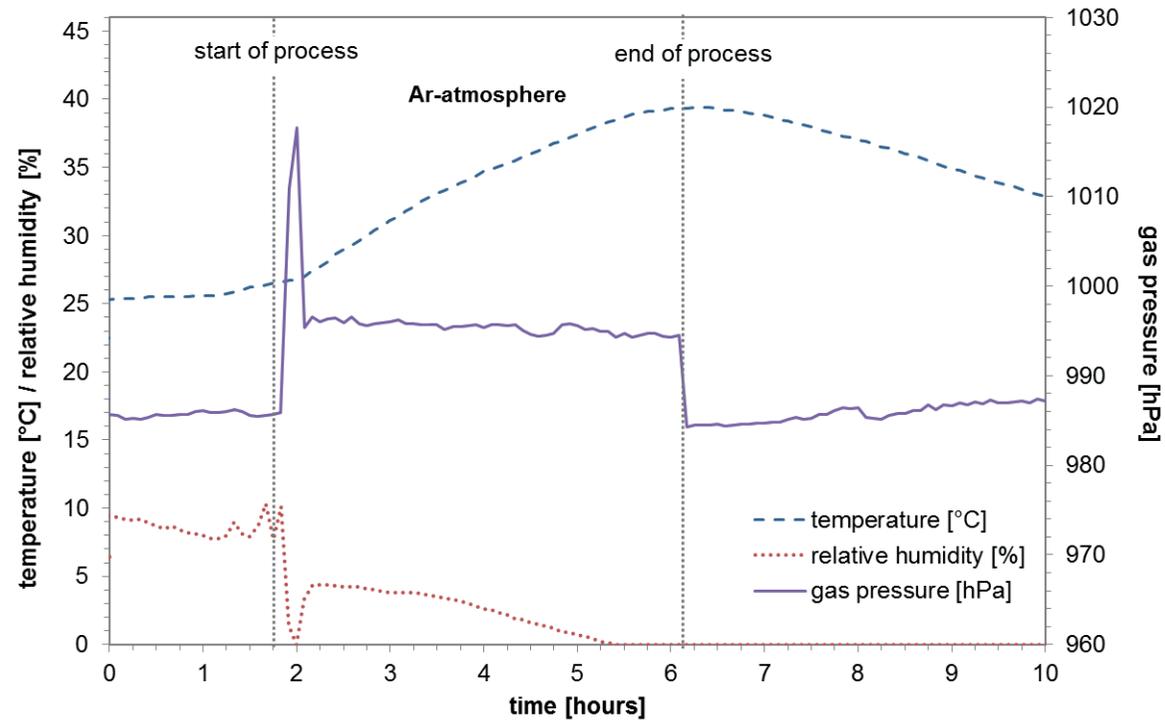


Pulver – Transportbehälter während Auslagerung



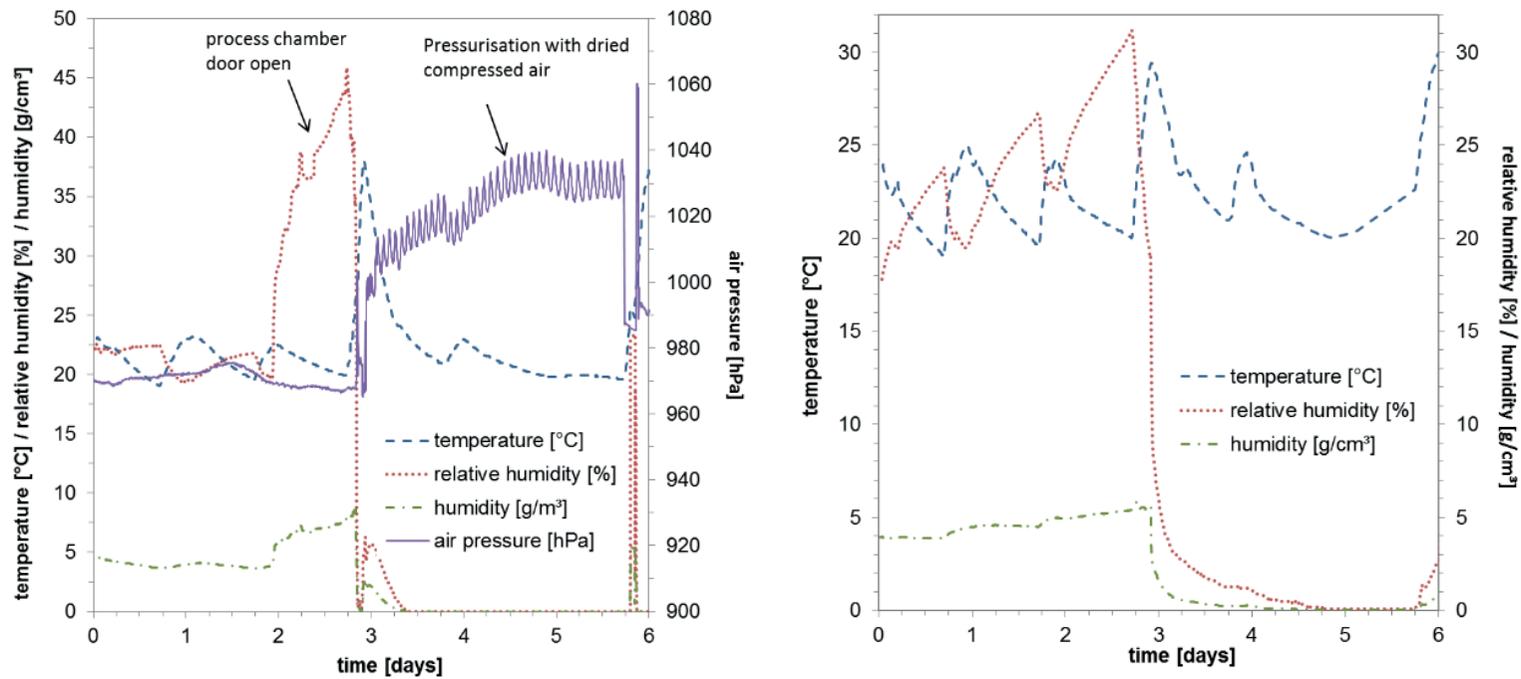
- » Deutlicher Unterschied in der Zunahme der relativen Feuchtigkeit in verschiedenen handelsüblichen Pulverbehältern

Umgebungsbedingungen – Bauraum



- » Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit in einem Produktionsprozesses über 4 Stunden.

Druckbeaufschlagung Bauraum/Pulvertank



» Gezielte Verringerung der Luftfeuchtigkeit in der Produktionsanlage außerhalb des Betriebs.

Zusammenfassung Sensorik/Feuchtigkeit

- » Die Überwachung des Laserstrahlschmelzprozesses führt zu neuen Erkenntnissen. Daraus resultieren Verbesserungen und somit eine erhöhte Prozesssicherheit.
- » Die Bandbreite der verwendeten Sensorik reicht von „einfachen“ Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren bis hin zur komplexen Schmelzbadüberwachung.
- » Die Feuchtigkeit sollte in der Anlage bestimmt und dokumentiert werden.
- » Raum entsprechend Klimatisieren oder/und Einsatz von Trockenmittel und Druckbeaufschlagung des Bauraums/Pulvertank
- » Filter / Pulver weisen eine große Oberfläche auf:
 - » Aufnahme von Feuchtigkeit
 - » erhöhte Porosität im Bauteil
- » Filter und Pulver trocken lagern (u. a. Trockenbeutel)
- » Filter vor Ersteinsatz “ausheizen” um aufgenommene Feuchtigkeit wieder abzugeben.



Danksagung

Die Ergebnisse entstanden in verschiedenen Forschungsvorhaben, unter anderen im Vorhaben 2012 FGR 0012, welches mit Mitteln des Freistaates Thüringen und aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds gefördert wurde, sowie in den IGF-Vorhaben 16669 BR / 1 und 00.415 Z der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, welche über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurden.



Sektion 4

NEUE TRENDS DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Filigrane Bauteile mittels 3D-Druck - konstruktive Details für ein fertigungsgerechtes Design

Hans-Werner Theobald

3D-Metall Theobald e.K.

Beruflicher Werdegang Hans-Werner Theobald

Ausbildung

2000 Industriemechaniker, Spanner-Pollux GmbH

2006 Diplom Wirtschaftsingenieur, TU Dresden

2017/18 MBA (in spe) HHL

Beruf

9 Jahre Berufserfahrung im mittelständischen Maschinenbau als

- Projektleiter
- Fertigungsleiter
- Leiter Qualitätsmanagement

Erster Kontakt mit 3D-Druck

2012 Druck eines Werkzeugeinsatzes für ein Stanzwerkzeug für Bäckereimaschinen



Kurzfassung

Filigrane Bauteile mittels 3D-Druck – konstruktive Details für ein fertigungsgerechtes Design

Der Referent ist Lohnfertiger im Bereich der additiven Fertigung von Bauteilen aus Metall. Nach seiner Erfahrung werden die Möglichkeiten der verschiedenen 3D-Druck Varianten häufig nicht ausgeschöpft, da fertigungstechnische Grundlagen beim Design nicht beachtet werden. In der Lohnfertigung werden heute immer noch meist Prototypen hergestellt oder der Kunde versucht die Beschaffung von Langläufern/ Spezialteilen zu beschleunigen. Die Potentiale im Bereich Leichtbau, Funktionsintegration und Montagevermeidung bleiben häufig ungenutzt.

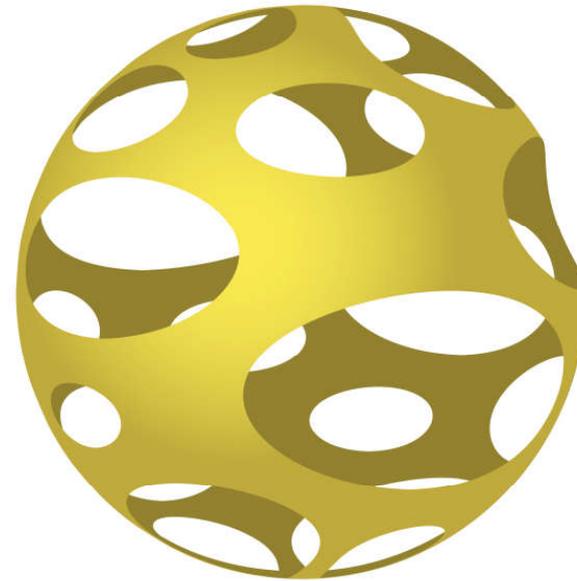
Der Referent zeigt anhand konkreter Beispiele, wie die Nutzung o.g. Potentiale mit Hilfe von additiven Verfahren erreicht werden kann. Dabei werden folgende Punkte angesprochen:

- Auswahl des passenden Maschinentyps innerhalb der SLM-Technik
- Reduktion von Gewicht und Kosten
 - o Wandungsstärken
 - o Hohlräume
- Vermeidung von Stützstrukturen
 - o Bohrungsgeometrien
 - o Neigungswinkel
- Filigrane Strukturen
 - o Kleine Bohrungen/Spalte
 - o Dünnwandige Strukturen
- Oberflächen
- Nutzung von porösen und dichten Materialbereichen
- Nachbearbeitungsverfahren

Obwohl die Beispiele auf die technischen Möglichkeiten des Referenten zugeschnitten sind, sind die aufgezeigten Konstruktionsprinzipien auf andere, vergleichbare Verfahren übertragbar.

Filigrane Bauteile mittels 3D-Druck –

3D METALL THEOBALD
METAL · ON · DEMAND



konstruktive Details für ein fertigungs-
gerechtes Design

- **Vorstellung**
- Erläuterung der Problemstellung
- Einstieg ins additive Design
 - Auswahl Fertigungsverfahren
 - Fertigungsgerechte Konstruktion
 - Nacharbeitsprozesse



Das Unternehmen



- Aufnahme der Produktion:
 - Juni 2016

- Leistungen:
 - additive Fertigung von Edelstahl und Bronze
 - Nachbearbeitung und Mikrostrahlen
 - Beratung bei fertigungsgerechter Konstruktion

- Kundengruppen:
 - Maschinenbau, F&E
 - Design und Schmuck



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

3



Zu meiner Person



- Ausbildung:
 - Industriemechaniker, Spanner-Pollux GmbH
 - Diplom Wirtschaftsingenieur, TU Dresden
 - MBA (in spe) HHL

- Beruf:
 - 9 Jahre Berufserfahrung im mittelständischen Maschinenbau:
 - Projektleiter
 - Fertigungsleiter
 - Leiter Qualitätsmanagement

- Erster Kontakt mit 3D-Druck:
 - 2012 Druck eines Werkzeugeinsatzes für ein Stanzwerkzeug für Bäckereimaschinen



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62.03.25.79
+49 (0)341.49.12.17.5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

4

- Vorstellung
- **Erläuterung der Problemstellung**
- Einstieg ins additive Design
 - Auswahl Fertigungsverfahren
 - Fertigungsgerechte Konstruktion
 - Nacharbeitsprozesse



Vor- Nachteile additiver Fertigung



Vorteile konventionelle Technik

- Höhere Präzision
- Bessere Oberflächen
- Höhere Produktivität

Vorteile additive Fertigung

- Höhere Gestaltungsfreiheit
- Einzelstücke kosteneffizient
- Hohe Geschwindigkeit bei Betrachtung des Gesamtprozesses:
Einkauf – Produktion - Logistik

Additive Fertigung ist **nicht** grundsätzlich besser oder kostengünstiger.



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

6



Wann macht die additive Fertigung Sinn?



- Leichtbau
- Funktionsintegration, kompaktere Teile
- Reduktion der Anzahl der Teile
- Vermeidung von Montagen
- Verbesserung der Funktion der Werkstücke

Änderung
des Designs

- Beschleunigung der Beschaffung von Spezialteilen
- Bau von Prototypen

Keine Änderung
des Designs



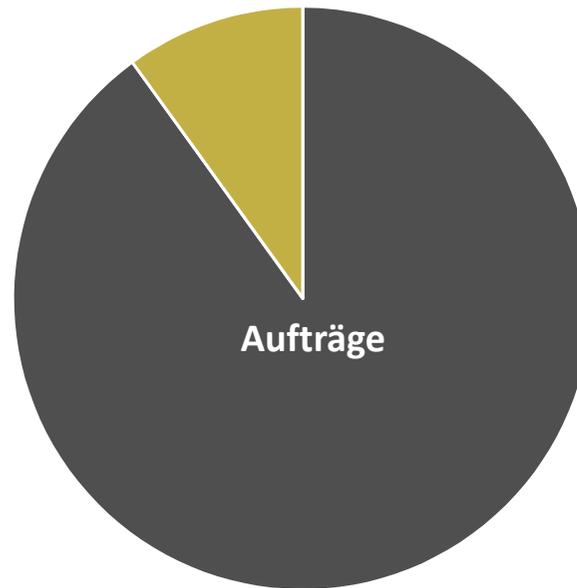
Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

7



Meine subjektive Sicht:



Selten Nutzung der spezifischen Vorteile der additiven Fertigung

■ konstruiert für konventionelle Verfahren ■ konstruiert für AM



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

8



Ein positives Beispiel:



Entwicklung eines statischen Mixers zum Einsatz in der pharmazeutischen oder chemischen Industrie



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

9



Ein positives Beispiel:



Schnitt Mischelement



- Verknüpfung der additiven mit der konventionellen Fertigung
- Strömungsoptimierung der additiven Teile
- Erweiterung des bekannten Prinzips eines statischen Mixers um eine Kühl- oder Heizfunktion
- Fertigungsgerechtes Design der Teile für additive Fertigung



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62.03.25.79
+49 (0)341.49.12.17.5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

10

- Vorstellung
- Erläuterung der Problemstellung
- **Einstieg ins additive Design**
 - Auswahl Fertigungsverfahren
 - Fertigungsgerechte Konstruktion
 - Nacharbeitsprozesse



Schritte zur fertigungsgerechten Konstruktion



- Auswahl des für die Aufgabe passenden SLM-Verfahrens
- Fertigungsgerechtes Design ? – ggf. Anpassung der Konstruktion
- Auswahl geeigneter Nacharbeitsverfahren

Bestmögliches Fertigungsergebnis



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

12

- Vorstellung
- Erläuterung der Problemstellung
- Einstieg ins additive Design
 - **Auswahl Fertigungsverfahren**
 - Fertigungsgerechte Konstruktion
 - Nacharbeitsprozesse



Auswahl Fertigungsverfahren



SLM-Anlagen	DMP50	MySint 100 PM	SLM 500HL
➤ Auftragsrate		1-5 ccm/h	bis zu 105 ccm/h
➤ Schichtstärke	1 – 5 µm	15 -20µm	20 µm - 75 µm
➤ Fokusdurchmesser	≤ 30 µm	30 µm	80 - 115 µm

Vorteile:

Filigranere Bauteile
Freistehende Wände ab 0,2mm
Bohrungen ab Durchmesser 0,2mm
bessere Oberfläche ohne Nacharbeit

Nachteil:

Längere Bauzeit und höhere Kosten



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62.03.25.79
+49 (0)341.49.12.17.5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

14



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

15

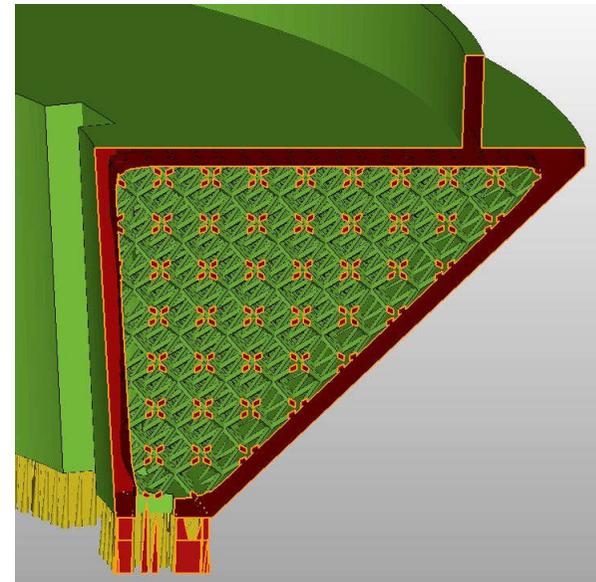
- Vorstellung
- Erläuterung der Problemstellung
- Einstieg ins additive Design
 - Auswahl Fertigungsverfahren
 - **Fertigungsgerechte Konstruktion**
 - Nacharbeitsprozesse



Fertigungsgerechtes Design



- Reduktion von Gewicht und Kosten:
 - Welche Wandungsstärken sind notwendig?
 - Sind Hohlräume sinnvoll?
 - Entnahme des Pulvers
 - interne Strukturen
- Nachbearbeitung in Konstruktion einplanen



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

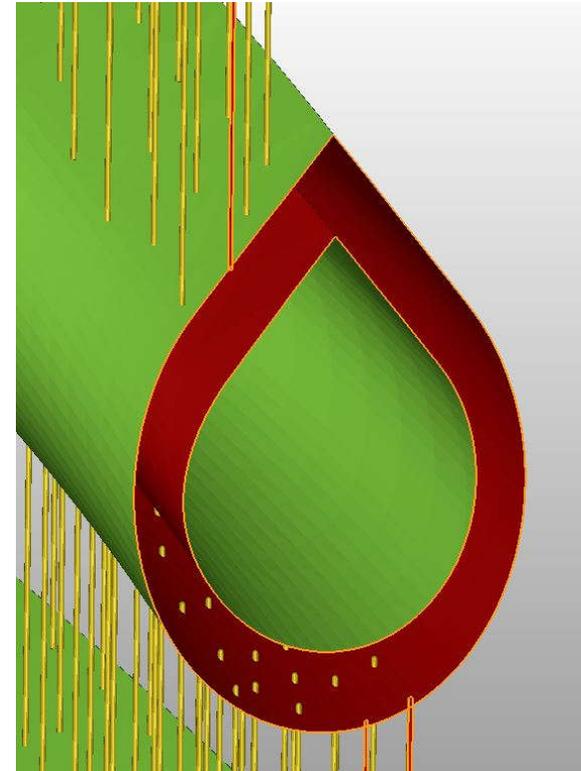
17



Fertigungsgerechtes Design



- Vermeidung von Stützstrukturen:
 - Bohrungen
Müssen Löcher rund sein?
 - Gibt es eine Vorzugs-
bauichtung
 - Neigungswinkel der Flächen
beachten



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

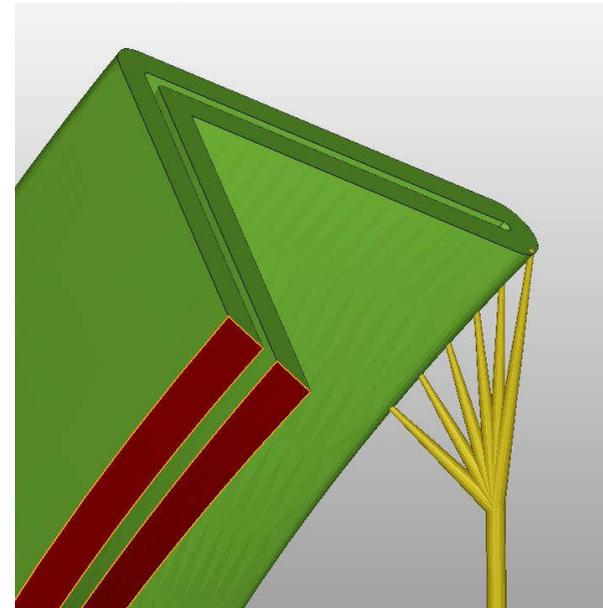
18



Fertigungsgerechtes Design



- Filigrane Strukturen
 - Kleine Löcher / Spalte unter 45° sind kleinere Spaltmaße möglich
 - Dünnwandige Strukturen:
 - Verbindung mit restlichem Bauteil beachten
 - Unter 0,3mm sind keine Stützen mehr möglich



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

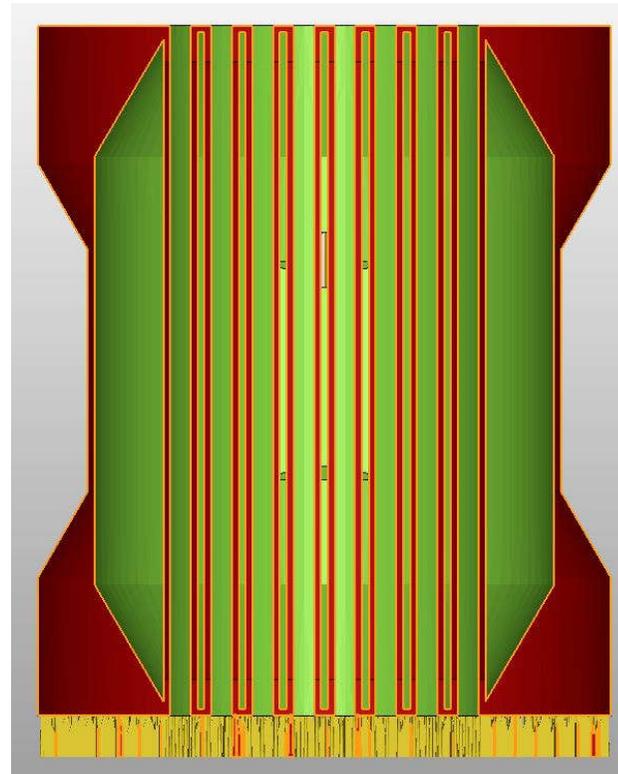
19



Fertigungsgerechtes Design



- Oberflächen
 - Qualität abhängig von der Orientierung im Bau-raum
 - Nicht nachbearbeitbare Bereich möglichst unter 90° orientieren
- Sondereffekte des 3D-Druck nutzen
 - Gezielt poröse und dichte Bereiche einbringen



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62.03.25.79
+49 (0)341.49.12.17.5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

20

- Vorstellung
- Erläuterung der Problemstellung
- Einstieg ins additive Design
 - Auswahl Fertigungsverfahren
 - Fertigungsgerechte Konstruktion
 - **Nacharbeitsprozesse**



Bekannte Nachbearbeitungsverfahren



- Trennung der Bauteile von der Plattform
 - sägen
 - drahterodieren
 - Plattform als Aufnahmeplatte in einer Fräse nutzen
- Ablösen der Stützstrukturen
 - manuell
- Nachbearbeitung von Oberflächen (Aufmaß)
 - feilen
 - fräsen
 - plasmapolieren
 - gleitschleifen



Hans-Werner Theobald
Karl-Heine-Straße 99
(im Business Innovation Center)
04229 Leipzig

Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79
+49 (0)341.49 12 17 5
E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Internet: www.3d-metall-theobald.de

22

Diskussion

- **Telefon** ... 0176 . 62 03 25 79
- **E-Mail** ... info@3d-metall-theobald.de
- **Internet** ... www.3d-metall-theobald.de



23

Verfahrensgrenzen des Arburg Freeformers

Franziska Kaut

Procter & Gamble Service GmbH

Franziska Kaut

Ausbildung:

- 2007-2011 Bachelorstudium im Bereich Kunststofftechnik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Aalen
- 2011-2014 Masterstudium im Studiengang Polymer Technology an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Aalen (Berufsbegleitend)
- Seit 2014 Promotionsstudentin an der Universität Halle
in Kooperation mit Polymer Service GmbH Merseburg
zum Thema Additive Fertigung mit thermoplastischen Polymeren

Beruflicher Werdegang:

- Seit 2011 Entwicklungsingenieurin bei Procter&Gamble in Kronberg im Bereich Kunststofftechnik-Prozessentwicklung für die Produktbereiche Oral-B, Braun und Gillette
- Seit 2014 Entwicklungsingenieurin Bereich Additive Fertigung von thermoplastischen Polymeren bei Procter&Gamble Standort Kronberg im Taunus
Fokus: Entwicklung von additiven Fertigungstechnologien zur Herstellung von funktionsfähigen Prototypen und einsatzfähigen Bauteilen im Hinblick auf die mechanische und chemische Belastbarkeit.



Kurzfassung

Procter&Gamble ist das zweitgrößte Konsumgüterunternehmen der Welt und setzt bereits seit vielen Jahren bei der Herstellung von Prototypen auf unterschiedliche additive Fertigungsverfahren.

Die Marktentwicklung erfordert immer schnellere Entwicklungszyklen und innovative Produktkonzepte. Aufgrund der wachsenden Anforderungen entwickelt Procter&Gamble gemeinsam mit strategischen Partnern und Universitäten neue Prozesse im Gebiet der additiven Fertigung.

Ziel der Entwicklung ist die Herstellung von Consumer Products in additiven Fertigungsverfahren aus unterschiedlichen thermoplastischen Kunststoffen mit gleichzeitig hohen mechanischen Eigenschaften.

Der Vortrag fokussiert die Herstellung von Bauteilen durch die industrielle Nutzung des ARBURG Freeformers. Im ersten Teil wird der Fokus auf die Technologie und die damit erzielbaren Eigenschaften an Bauteilen aus thermoplastischen Kunststoffen gelegt. Der zweite Teil diskutiert die aktuell einsetzbaren Materialien sowie die Prozessgrenzen und das Potential des ARBURG Kunststoff Freiform Verfahrens.



Quelle: Arburg

Industrielle Nutzung des ARBURG Freeformer

Erfahrungsbericht aus der industriellen Nutzung des Arburg Freeformers bei Procter&Gamble

4. Mitteldeutsches Forum
3D-Druck in der Anwendung



17.Mai 2017
Franziska Kaut, Procter&Gamble

1

Agenda



Vorstellung Procter&Gamble

AM bei P&G | Der Arburg Freeformer bei P&G



Die Freeformer Technologie

Das Verfahren | Theoretische Grundlagen



Mechanische Festigkeiten

Einfluss Prozessparameter | Dichtermittlung



Materialien

Welche Materialien können eingesetzt werden?



Prozessgrenzen

Was geht heute noch nicht?



Zusammenfassung

Fazit | Ausblick

Franziska Kaut
Procter& Gamble

2



Vorstellung Procter&Gamble

Gründung 1837 von William Procter und James Gamble, in Cincinnati /Ohio

Mitarbeiter global	ca. 121 000
Mitarbeiter in Deutschland	ca. 13 000

Umsatz (Mrd. US\$)	65.3
--------------------	------

Ausgaben für Forschung & Entwicklung (Mrd. US\$)	2.0
--	-----

14 deutsche Standorte

- 11 Werke
- 5 Distributionszentren
- 1 Forschungszentrum „GIC“



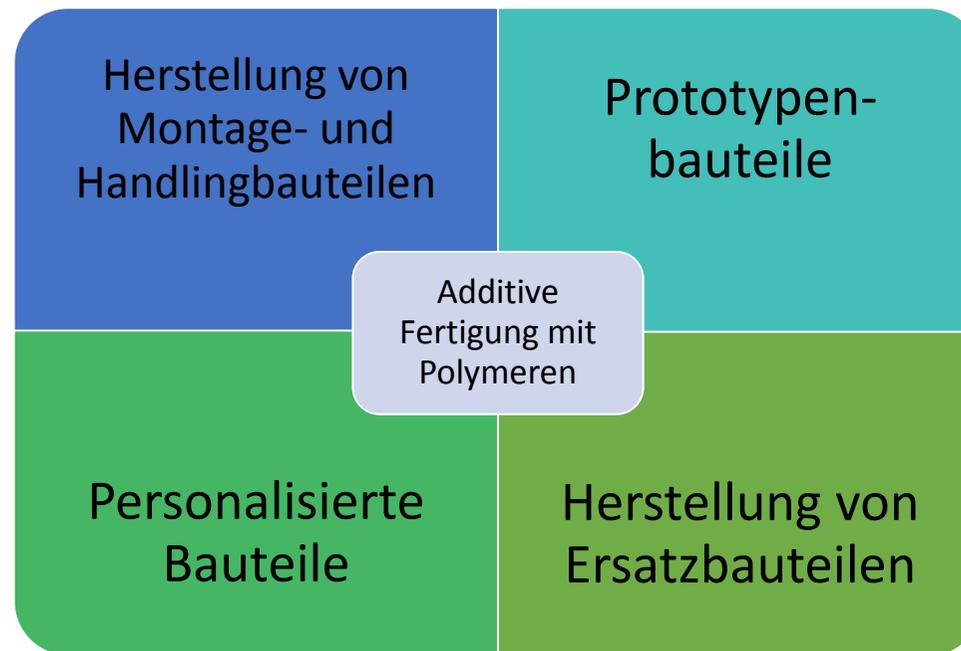
Franziska Kaut
Procter& Gamble

3



Vorstellung Procter&Gamble

Additive Manufacturing bei P&G



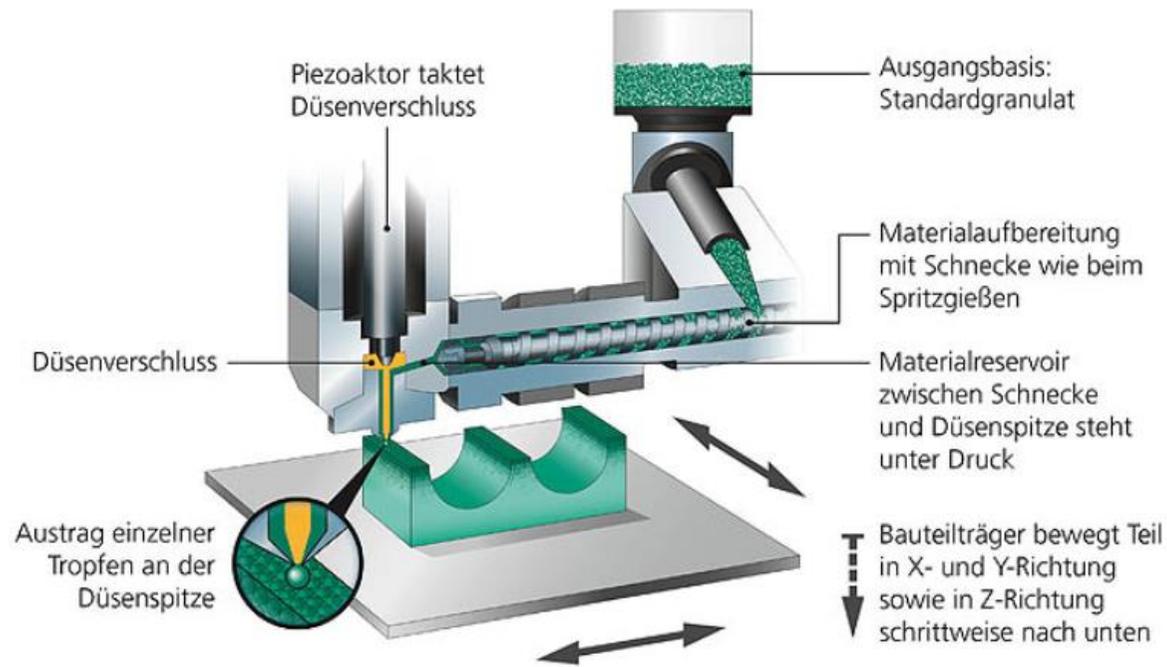
Franziska Kaut
Procter& Gamble





Die Freeformer Technologie

Das Verfahren



Quelle: Arburg, Verfahrensbeschreibung AKF

Franziska Kaut
Procter& Gamble

5



Die Freeformer Technologie

Das Verfahren

- ARBURG Kunststoff Freiformen (AKF) ermöglicht die Herstellung von Bauteilen mit Standardgranulaten
- Kein Mikrogranulat notwendig
- Zwei Austrageinheiten bieten Vielfalt in Material- oder Farbkombination
- Basis sind CAD Daten die mit spezifischer Slicing Software aufbereitet werden



Quelle: Arburg ; Verfahrensbeschreibung AKF

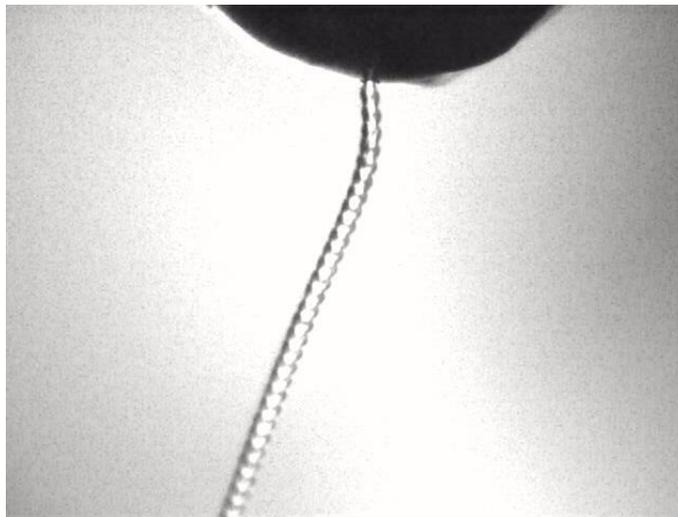
Franziska Kaut
Procter& Gamble

6

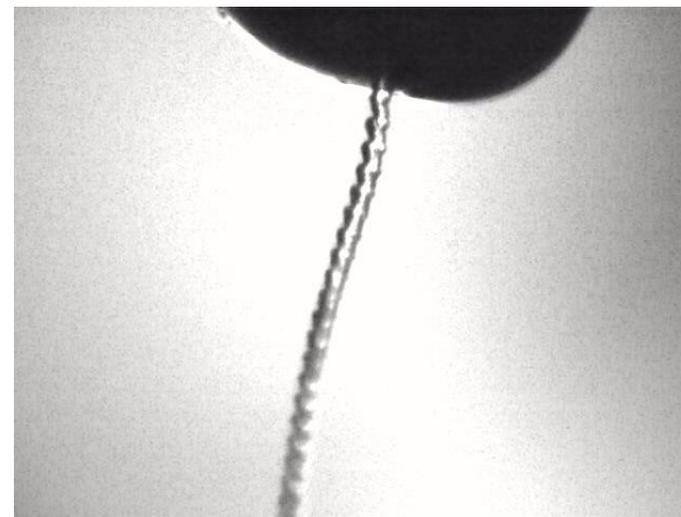


Die Freeformer Technologie

Theoretische Grundlagen



Tropfenstrang aus PP bei 240°C Zylindertemperatur



Tropfenstrang aus PP bei 280°C Zylindertemperatur

Franziska Kaut
Procter& Gamble

7



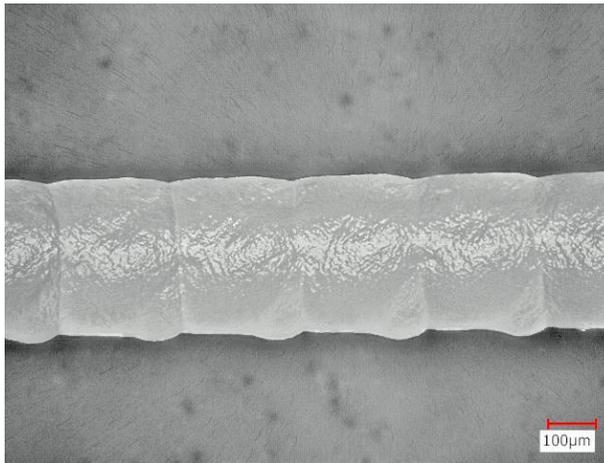
Die Freeformer Technologie

Theoretische Grundlagen

Prozessuntersuchungen ABS

Variation der Parameter:

- Zylinder- und Düsentemperatur
- Düsenfrequenz



ABS; 220 °C; 200 Hz



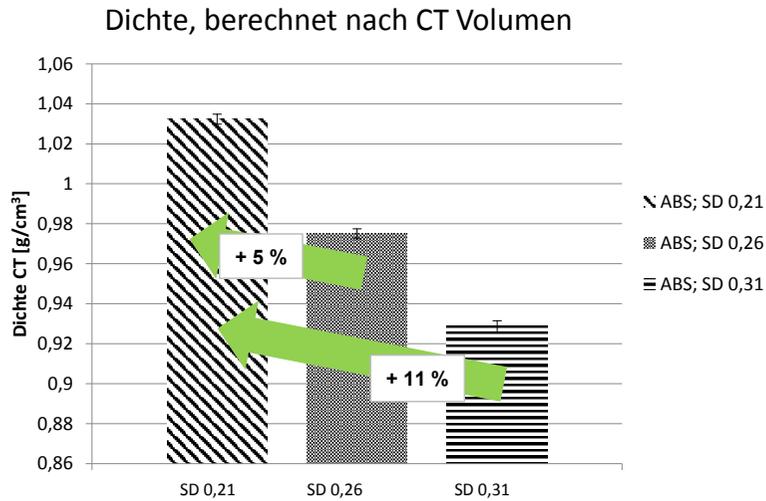
ABS; 260 °C; 200 Hz

Franziska Kaut
Procter & Gamble

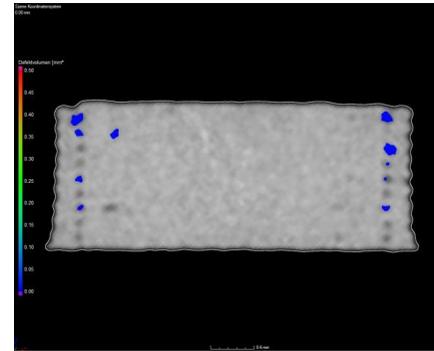


Mechanische Festigkeiten

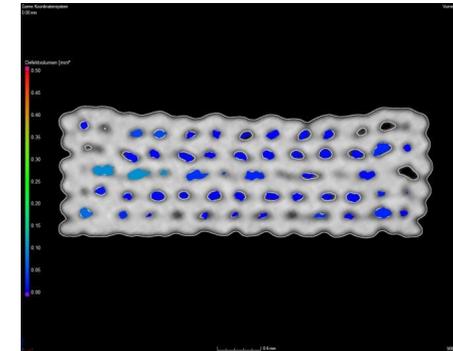
Einfluss der Prozessparameter bei ABS



N=5; Prüfkörper Typ 1BA



SD 0,21; ABS



SD 0,31; ABS

Franziska Kaut
Procter& Gamble

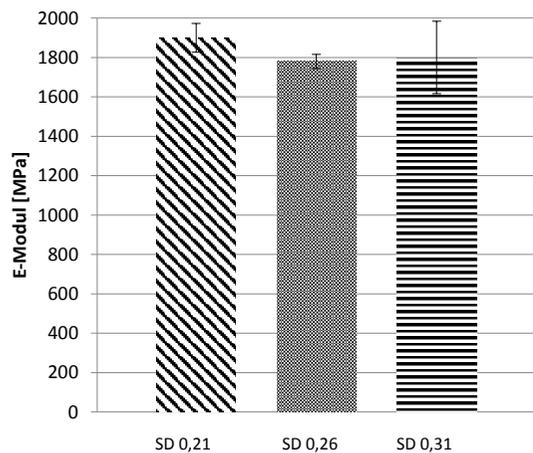
9



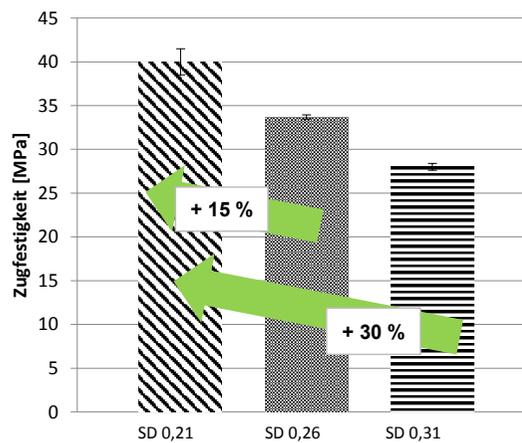
Mechanische Festigkeiten

Einfluss der Prozessparameter bei ABS

Zugversuch für ABS nach DIN EN ISO 527-2; Y-Richtung

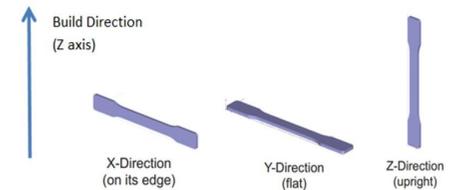


▨ ABS; SD 0,21
 ▩ ABS; SD 0,26
 ≡ ABS; SD 0,31



▨ ABS; SD 0,21
 ▩ ABS; SD 0,26
 ≡ ABS; SD 0,31

N=5; Prüfkörper Typ 1BA



Quelle: P. Lambert, „www.sculpteo.com,“ Mai 2014. [Online]

Franziska Kaut
Procter & Gamble

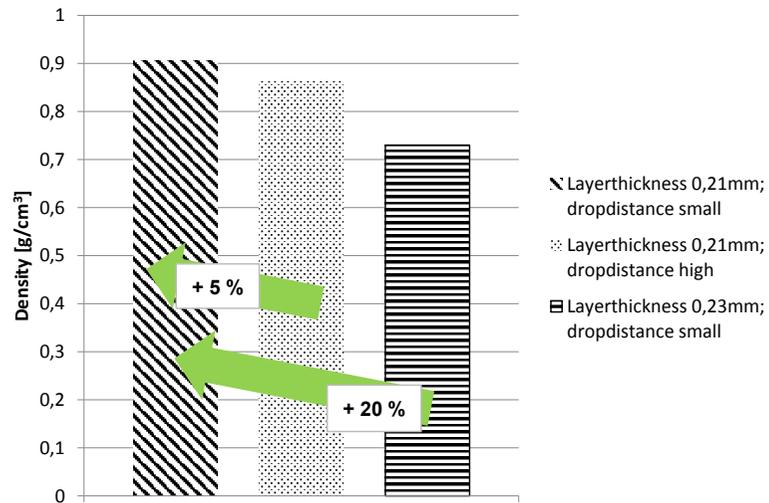
10



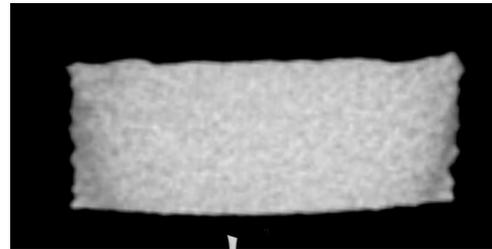
Mechanische Festigkeiten

Einfluss der Prozessparameter bei PP

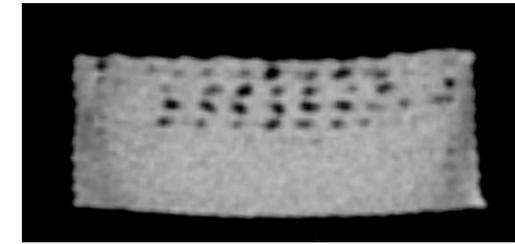
Dichtermittlung an PP Bauteil mittels CT



N=5; Prüfkörper Typ 1BA



SD 0,21; dropdistance small; PP



SD 0.21; dropdistance high; ABS

Franziska Kaut
Procter & Gamble

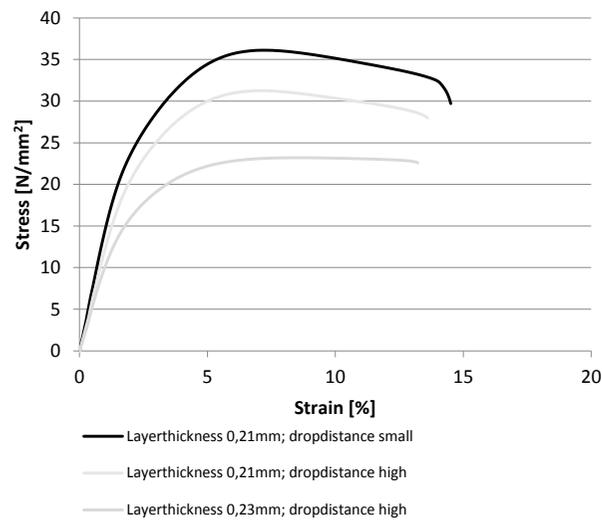
11



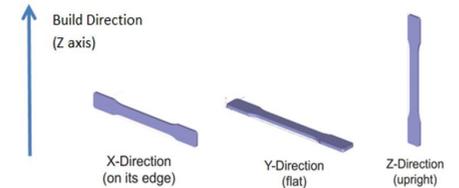
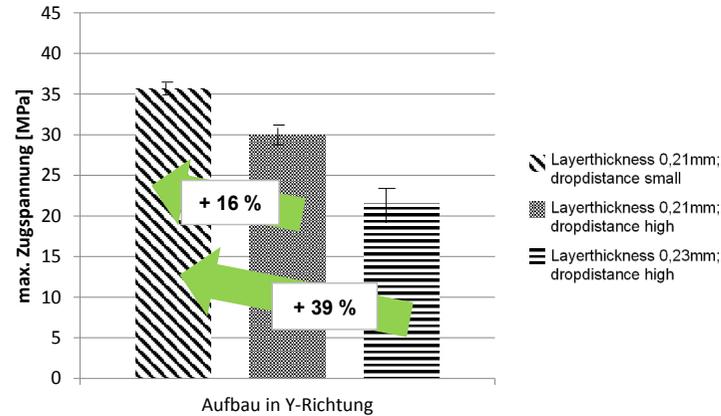
Mechanische Festigkeiten

Einfluss der Prozessparameter bei PP

Zugversuch für PP nach DIN EN ISO 527-2; Y-Richtung



N=5; Prüfkörper Typ 1BA



Quelle: P. Lambert, „www.sculpteo.com,“ Mai 2014. [Online]

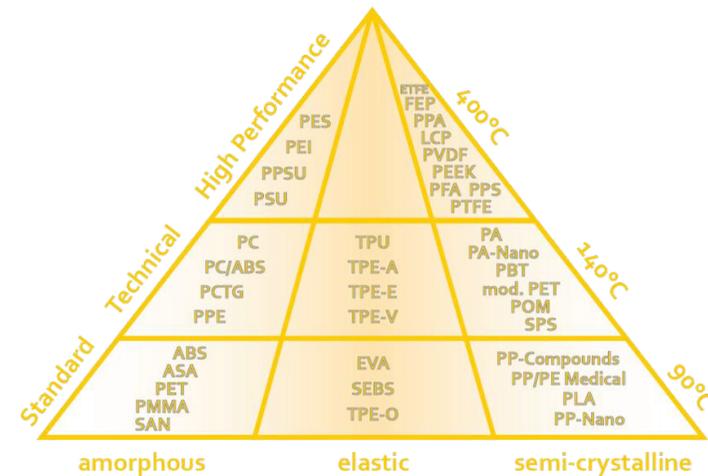
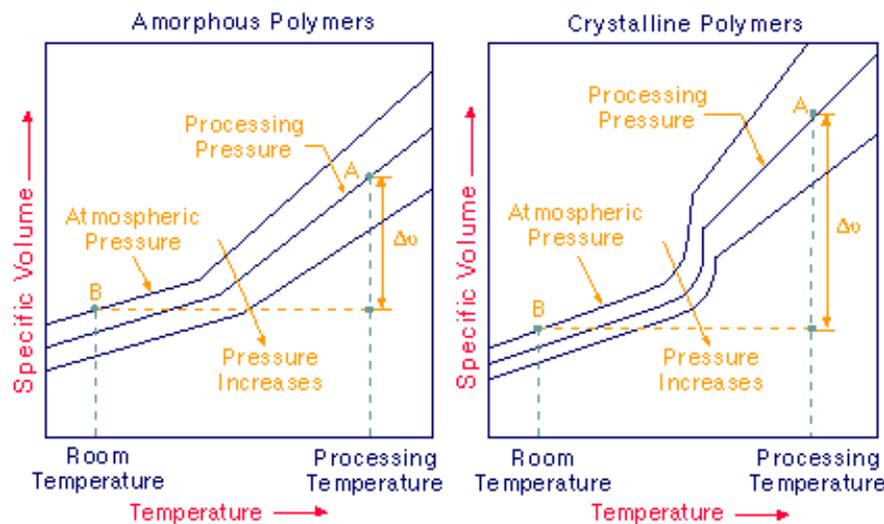
Franziska Kaut
Procter & Gamble

12



Materialien

Welche Materialien können eingesetzt werden?



➔ Teilkristalline Thermoplasten aufgrund Änderung des spezifischen Volumens nur eingeschränkt verarbeitbar

Franziska Kaut
Procter & Gamble

13



Prozessgrenzen

Was geht heute noch nicht?

- Verstärkte Kunststoffe
- Teilkristalline Kunststoffe eingeschränkt
- Stützmaterial nur für amorphe Kunststoffe
- Hochtemperaturmaterialien (Maximale Zylindertemperatur 350°C)
- Prozessüberwachung eingeschränkt
- Materialbelastung durch hohe Verweilzeiten

Franziska Kaut
Procter& Gamble

14



Zusammenfassung

- Verarbeitung von amorphen Kunststoffen bei gleichzeitig guten mechanischen Eigenschaften möglich
- Verarbeitung von Thermoplastischen Elastomeren möglich, jedoch bei hohem Düsenverschleiß
- Komplexe Prozessführung besonders bei teilkristallinen Materialien
- Prozessverständnis aus der Kunststoffverarbeitung notwendig
- Geringe Austragsgeschwindigkeiten
- Haftungsuntersuchungen zu Fundamentplatte nicht abgeschlossen
- Optimierungspotential im Haftverbund der Schichten
- Stützmaterial nicht für alle Materialien vorhanden
- Reproduzierbarkeit eingeschränkt
- Slicing Software ausbaufähig

Franziska Kaut
Procter& Gamble

15

Bauteile so stabil wie Aluminium - einfach 3D gedruckt

Joachim Kasemann

Mark3D GmbH

Beruflicher Werdegang Joachim Kasemann

Herr Joachim Kasemann ist seit April 2016 Mitglied in der Geschäftsleitung der Mark3D und verantwortet den gesamten Vertrieb. Als Partner von MarkForged vertreibt die Mark3D das gesamte Produktportfolio des 3D-Drucker-Pioniers.

Zuvor war Herr Joachim Kasemann für den Vertrieb der Coffee Solution GmbH, ein Tochterunternehmen der Coffee GmbH, verantwortlich. Die Coffee GmbH hält für Ihre Kunden ein ganzheitliches Portfolio bereit: Die Produkte und Lösungen der Coffee GmbH decken den gesamten Produktentstehungsprozess ab – von der Idee, dem Design, über die Konzeption, die mechanische Konstruktion (3D CAD), Simulation, der elektrischen Konstruktion (ECAD), Daten- und Dokumentenverwaltung (PDM) und der technischen Kommunikation bis hin zur Erstellung von Prototypen, additiver Fertigung (3D Druck) und der konventionellen Fertigung.

In der Zeit vor der Coffee Solution GmbH führte Joachim Kasemann über 14 Jahre erfolgreich und engagiert seine eigene Firma Joachim Kasemann Industrievertretung.

Die fertigende Industrie zieht sich wie ein roter Faden durch Herrn Kasemanns Lebenslauf. So war er von 1991 bis 2014 erfolgreicher Verkaufsleiter bei der Firma Werner Wilke Zerspanungstechnik. Werner Wilke Zerspanungstechnik stellt Dreh- und Fräswerkzeuge, Werkzeuge zum Bohren und Gewindeschneiden sowie Halter und Spannwerkzeuge her. Das perfekte Fundament, aufgebaut auf seinen Erfahrungen im vertrieblichen Innen- und Außendienst bei Schell Werkzeugsysteme GmbH.



Kurzfassung

Es gibt zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für 3D Druck, die weit über Rapid Prototyping hinausgehen. Kommen Ihnen diese Fragen bekannt vor?

- Benötigen Ihre Projekte mehr Zeit als geplant, weil Sie auf Ihre Zulieferer und Dienstleister warten müssen?
- Sind zu hohe Kosten und zu langes Warten auf konventionell gefertigte Aluminiumteile ein Problem?
- Sind Sie es leid, aufgrund von Kapazitätsengpässen ständig "NEIN" zu potentiellen Kunden sagen zu müssen?

Mit Materialien wie Glasfaser, Carbon oder Kevlar kann der professionelle Anwender echte Probleme lösen und Bauteile drucken, die bisher nicht 3D gedruckt werden konnten, sondern mechanisch gefertigt werden mussten.

Werkzeuge und Vorrichtungen können häufig nur bedingt additiv gefertigt werden, weil meistens nicht die benötigte Festigkeit erreicht wird. Jetzt wird abriebfestes Nylon mit Glasfaser, Kevlar oder Carbon verbunden und kann damit ein besseres Festigkeits-Gewichts-Verhältnis erreichen als Aluminium.

3D Druck für Kleinserien – das Unmögliche wird möglich!

Mittels Schichtstärken von 0,05 mm und einer integrierten Bauprozesskontrolle können Teile produziert werden, welche die gleiche Qualität aufweisen wie Spritzgussteile. An dieser Stelle ist es nicht übertrieben zu sagen: 3D Druck verändert die Produktion! Die Vorteile sind einfach immens: komplette Designfreiheit, hohe mechanische Belastbarkeit, hohe Wiederholgenauigkeit und extrem geringe Fertigungskosten.

Print Stronger



Bauteile so stabil wie Aluminium –
einfach 3D gedruckt



Print Stronger



Prototypen, Serienteile. Wer hilft uns?



Print Stronger



Kollege Kurt... aber wir müssen warten...!



Print Stronger



Stabilität von Metall - für den Preis von Kunststoff

Für jeden Ingenieur bezahlbar



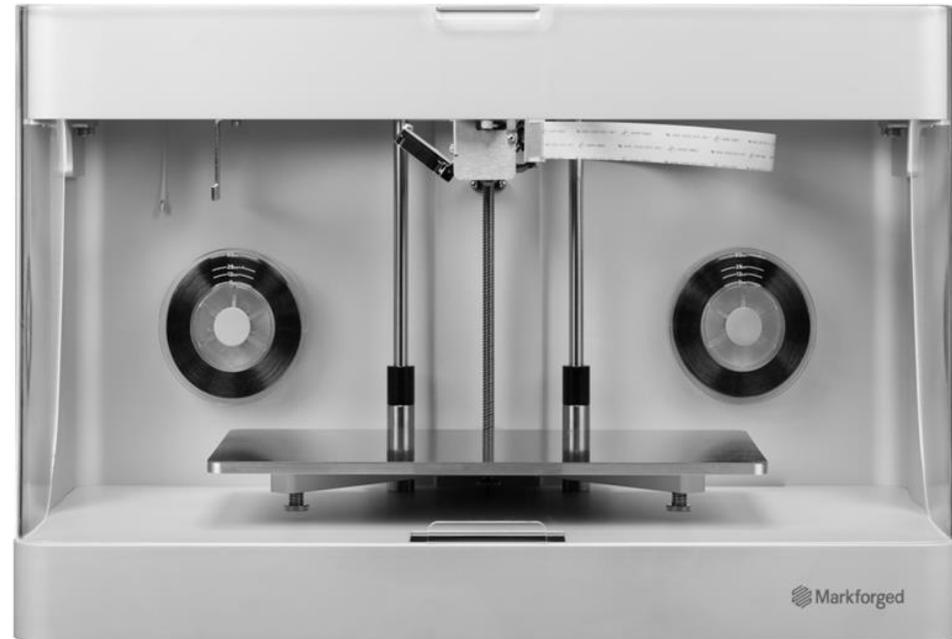
Print Stronger



Fused Filament Fabrication (FFF) Mark TWO

Stabilität von Aluminium –
einfach 3D gedruckt

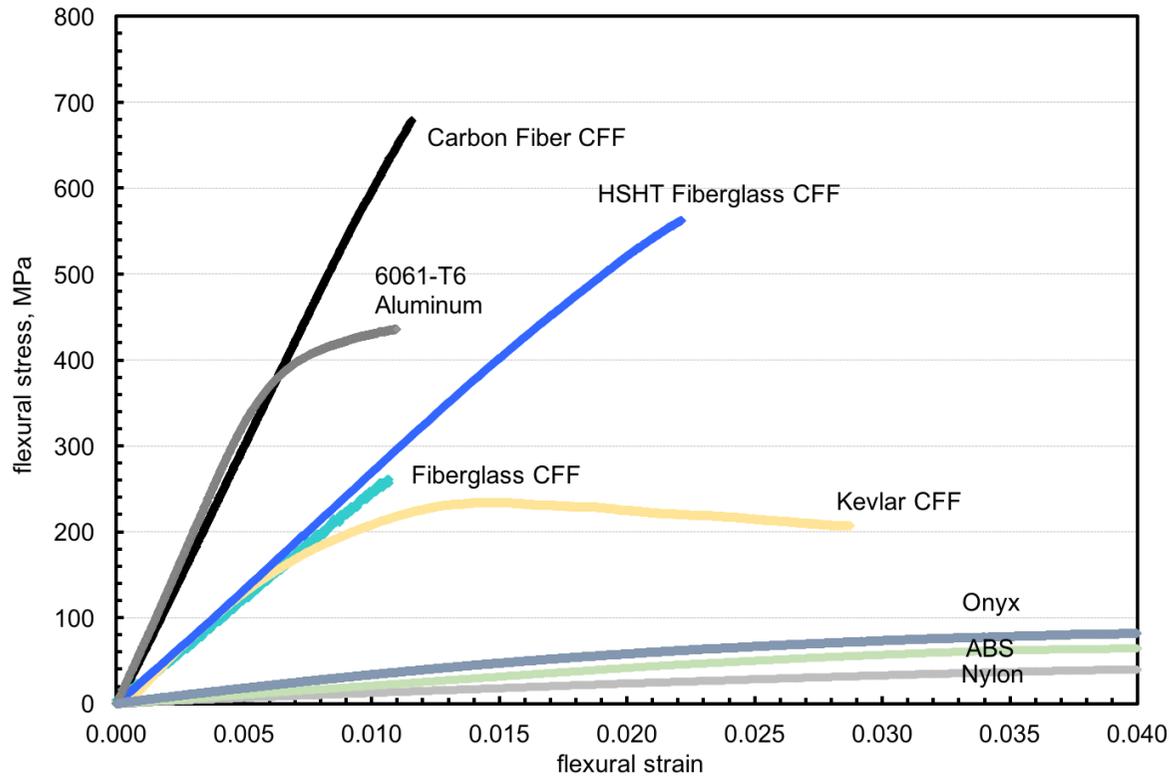
Industriebauteile -
am selben Tag.



Print Stronger



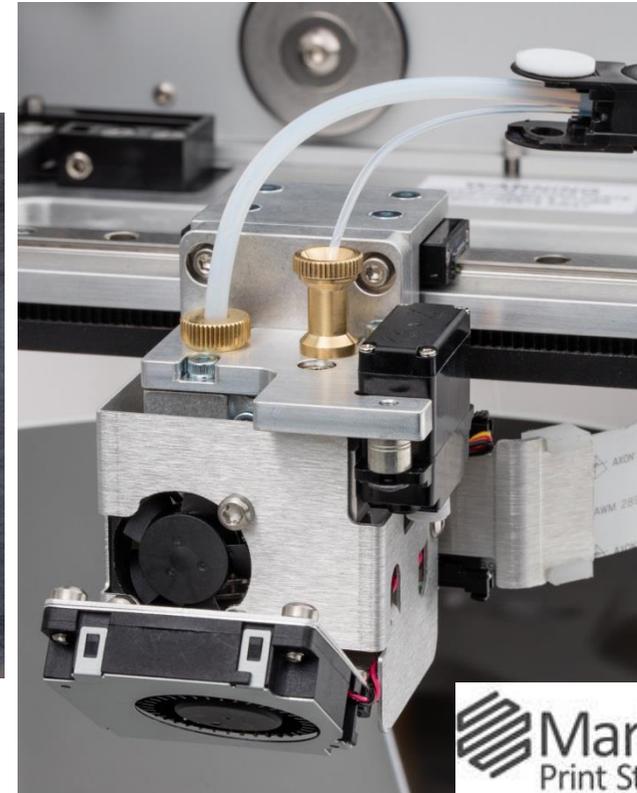
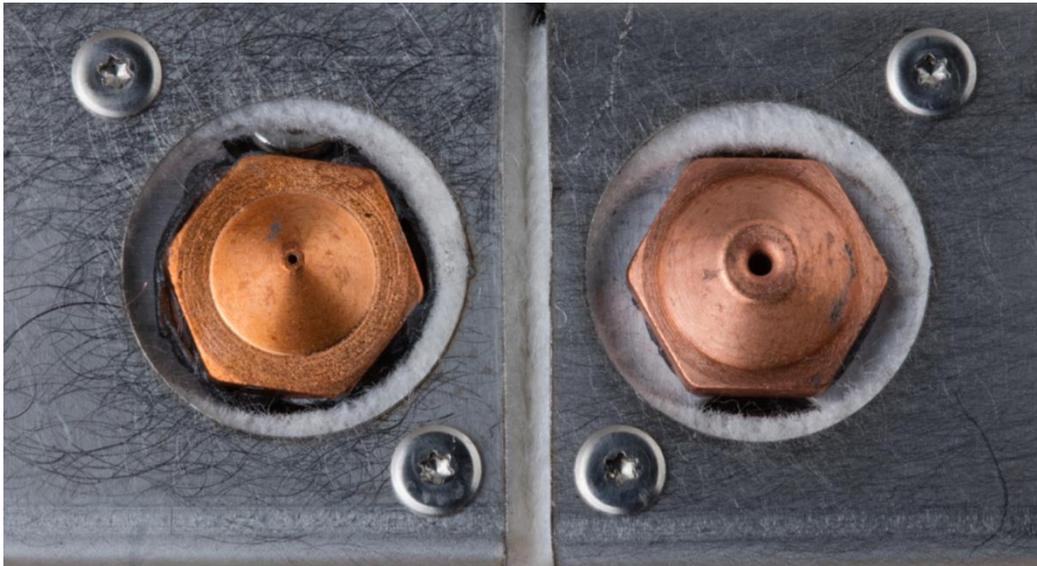
Carbon – stabiler als Aluminium



Print Stronger



Zwei Düsen für zwei Materialien



Print Stronger



Materialien



Nylon PA6

Nylon ist ein strapazierfähiger und flexibler Kunststoff mit geringen Reibeigenschaften.



Onyx mit Mikro-Carbonfasern

Kombination von Nylon PA6 mit Mikro-Carbonfasern für noch mehr Stabilität, Steifigkeit, Flächenstabilität und Wärmeformbeständigkeit bis 145°C.

Print Stronger



Endlosfasern



Karbon hat das höchste Festigkeits-Gewichts-Verhältnis und die höchste Wärmeleitfähigkeit.



Glasfaser ist das wirtschaftlichste Material. Es ist so stabil wie Karbon, doch nur 40% so steif and doppelt so schwer.



Kevlar hat die beste Abriebfestigkeit und ist die flexibelste Faser. Ideal für langlebige Bauteile die stoßfest sein müssen.



High Strength, High Temp (HSHT) Glasfaser ist speziell geeignet für Bauteile in Umgebungstemperaturen über 105°C mit einer Wärmeformbeständigkeit bis 140°C.

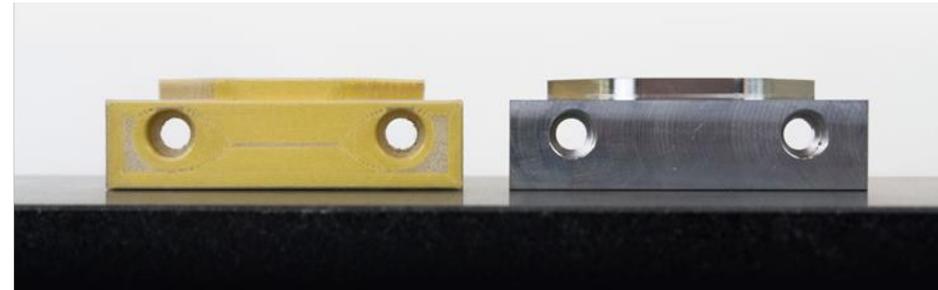


Print Stronger



Nutzen Sie Ihre vorhandenen Konstruktionen

Einfache Konstruktionsänderung.
Mit Fasern verstärkte 3D
gedruckte Bauteile können oft
Aluminiumbauteile direkt
ersetzen.

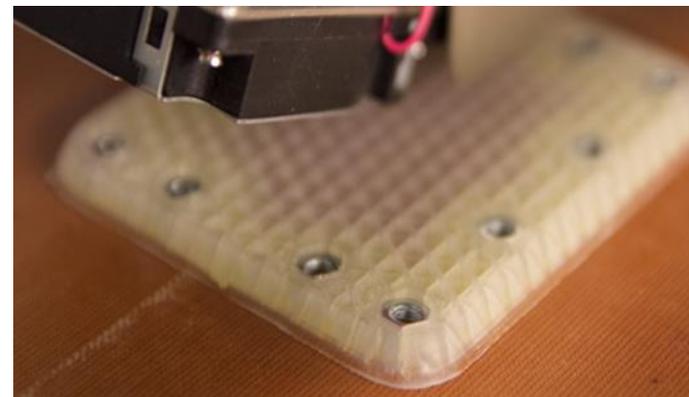
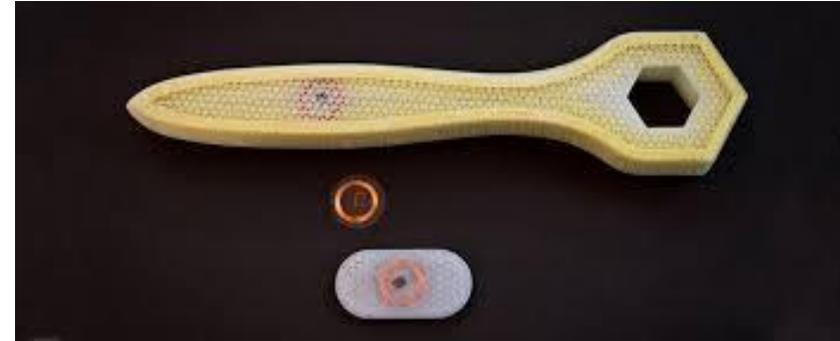


Print Stronger

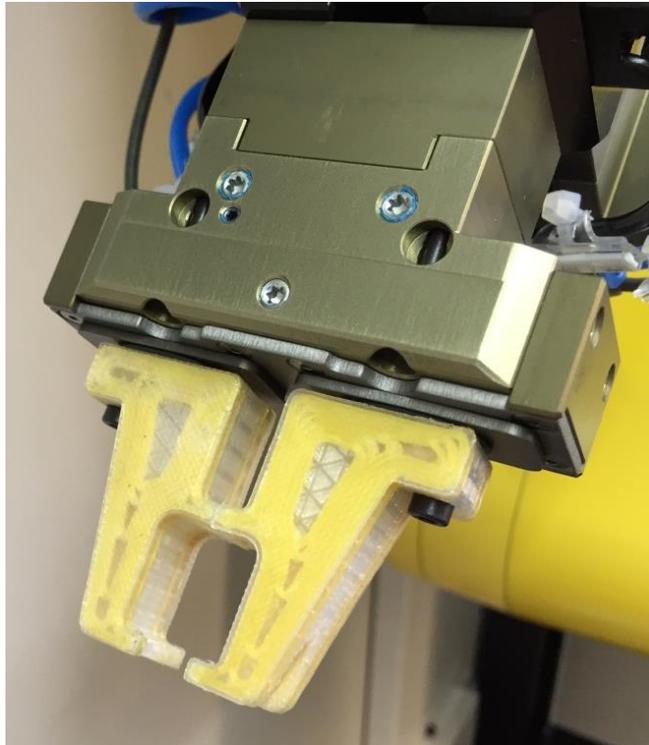


Eingebettete Bauteile

Fehler passieren - leider.
Fehler kosten Geld.
Eingebettete RFID Chips helfen
Fehler zu vermeiden.



Print Stronger

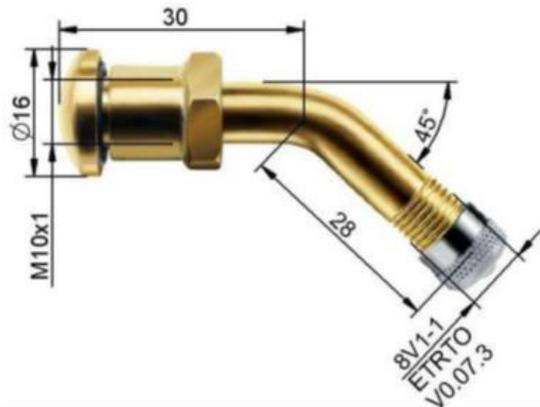


Bauteil:	Robotergreifer
Druckkosten:	€ 3,91
Druckzeit:	2 Stunden
Material:	Nylon/PA6 und Kevlar

Mechanisch gefertigt:	
Kosten:	€ 260,00
Material:	Werkzeugstahl
Lieferzeit:	4 Stunden



Print Stronger



Bauteil:	Montagehilfe
Druckkosten:	€ 4,94
Druckzeit:	3 ½ Stunden
Material:	Nylon/PA6 und Glasfaser

Mechanisch gefertigt:	
Kosten:	€ 150,00
Material:	Aluminium
Lieferzeit:	4 Wochen



Print Stronger



Bauteil:	Wärmekontaktnieten
Druckkosten:	€ 14,00
Druckzeit:	54 Stunden
Material:	Nylon/PA6 und Glasfaser

Mechanisch gefertigt:	
Kosten:	€ 141,00
Material:	Aluminium
Lieferzeit:	96 Stunden



Print Stronger

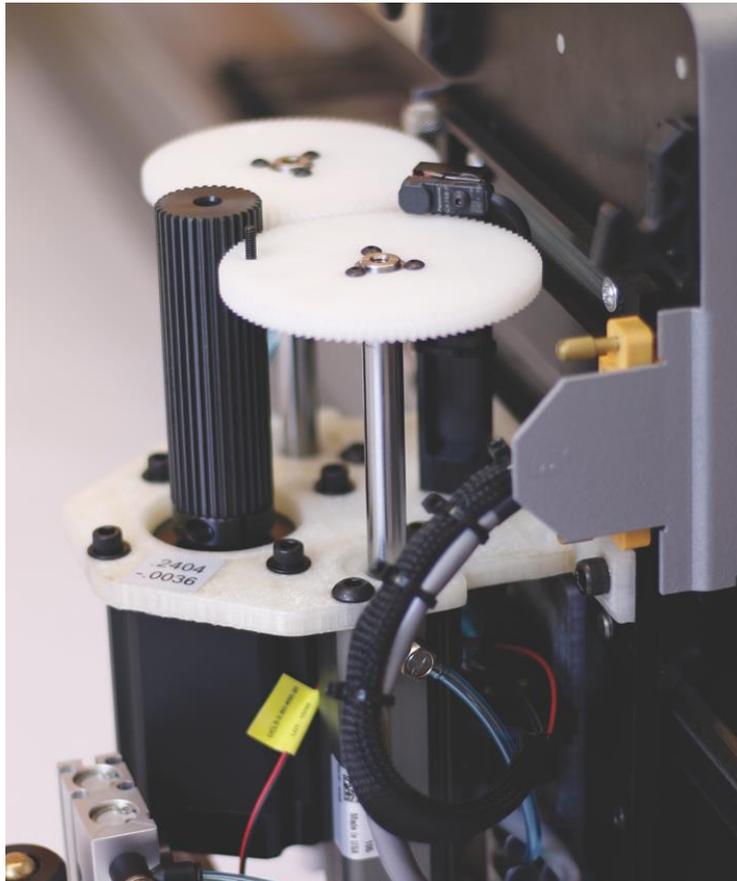


Bauteil:	Produktionshilfe
Druckkosten:	€ 20,00
Druckzeit:	24 Stunden
Material:	Nylon/PA6 und Glasfaser

Mechanisch gefertigt:	
Kosten:	€ 49,00
Material:	Aluminium
Lieferzeit:	168 Stunden



Print Stronger



Bauteil:	Funktionsprototyp
Druckkosten:	€ 43,00
Druckzeit:	42 Stunden
Material:	Nylon/PA6 und Glasfaser

Mechanisch gefertigt:	
Kosten:	€ 599,00
Material:	Stahl
Fertigungszeit:	96 Stunden



Print Stronger



Bauteil:	Prototyp
Druckkosten:	€ 61,00
Druckzeit:	60 Stunden
Material:	Nylon/PA6 und Glasfaser

Mechanisch gefertigt:	
Kosten:	€ 2.955,00
Material:	Aluminium
Fertigungszeit:	72 Stunden

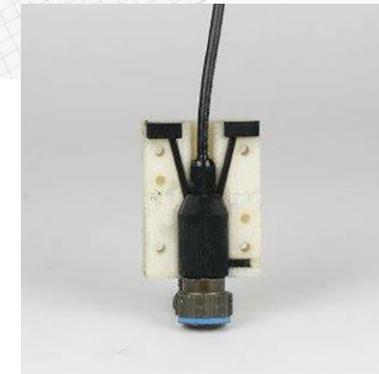
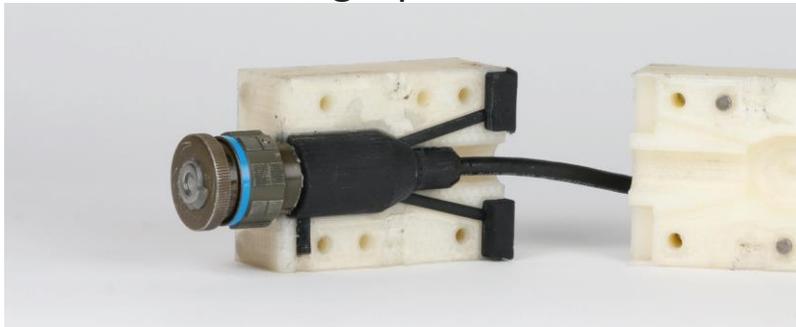


Print Stronger



Spritzform aus Nylon/PA und High Temp Glasfaser

Silikongehäuse für spezifische Anwendungen. Lieferzeit der Formen zu lange. Flüssiges Silikon wird mit 90°C - 130°C in Formen gespritzt



Die Lösung ist das HSHT Fiberglass Material. In EIGER wurden die Formhälften mit HSHT Fiberglass verstärkt und nach nur zwei Tagen konnte der Kunde seine Silikon Gehäuse spritzen. Eine Zeitersparnis von 93 %.



Print Stronger



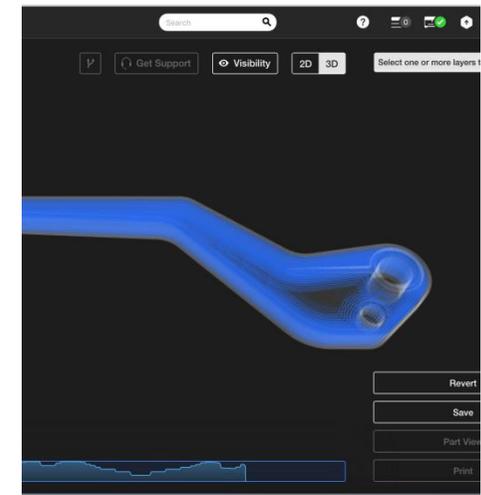
Die Komplettlösung



Einzigartige Materialien



Einzigartige Hardware



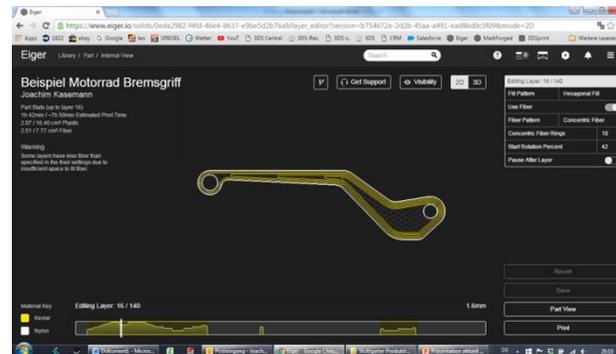
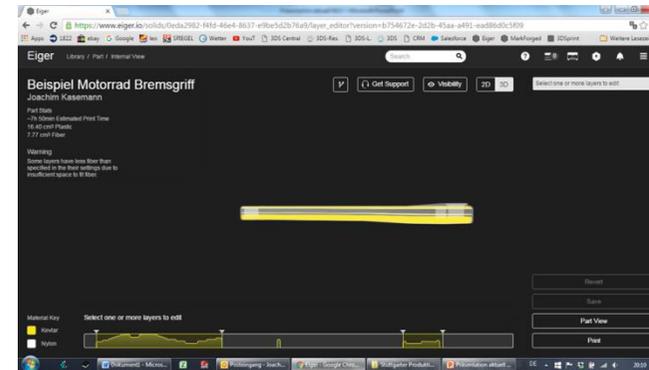
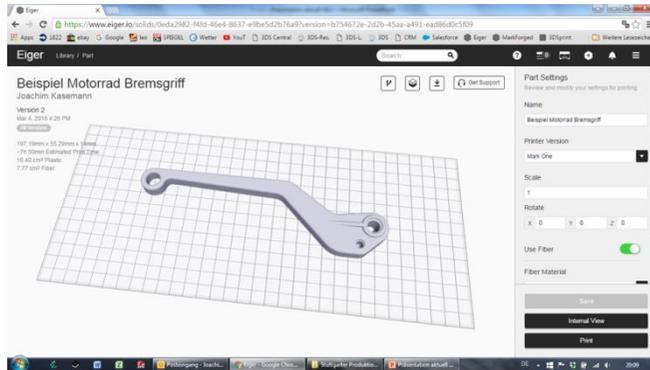
Einzigartige Software



Print Stronger



Software



Sektion 4 Neue Trends der Additiven Fertigung

Eiger Library / Part

Search

Multifunktionsgriff-Carbon

Johannes Lütz

Version 2
Apr 20, 2016 12:31 PM

All Versions

146.42mm x 120.32mm x 20.5mm
~17h 20min, Estimated Print Time
69.43 cm³ Plastic
0.79 cm³ Fiber

Plastic fill type

Fiber fill type

Triangular Fill

Concentric Fill

Hexagonal Fill

Isotropic Fill

Supports Angle: 0

Thin Features:

Use Brim:

Original Units: Imperial

Layer Height (mm): 0,125

Fill Pattern: Triangular Fill

Fill Density: 50%

Roof & Floor Layers: 4

Wall Layers: 2

Description

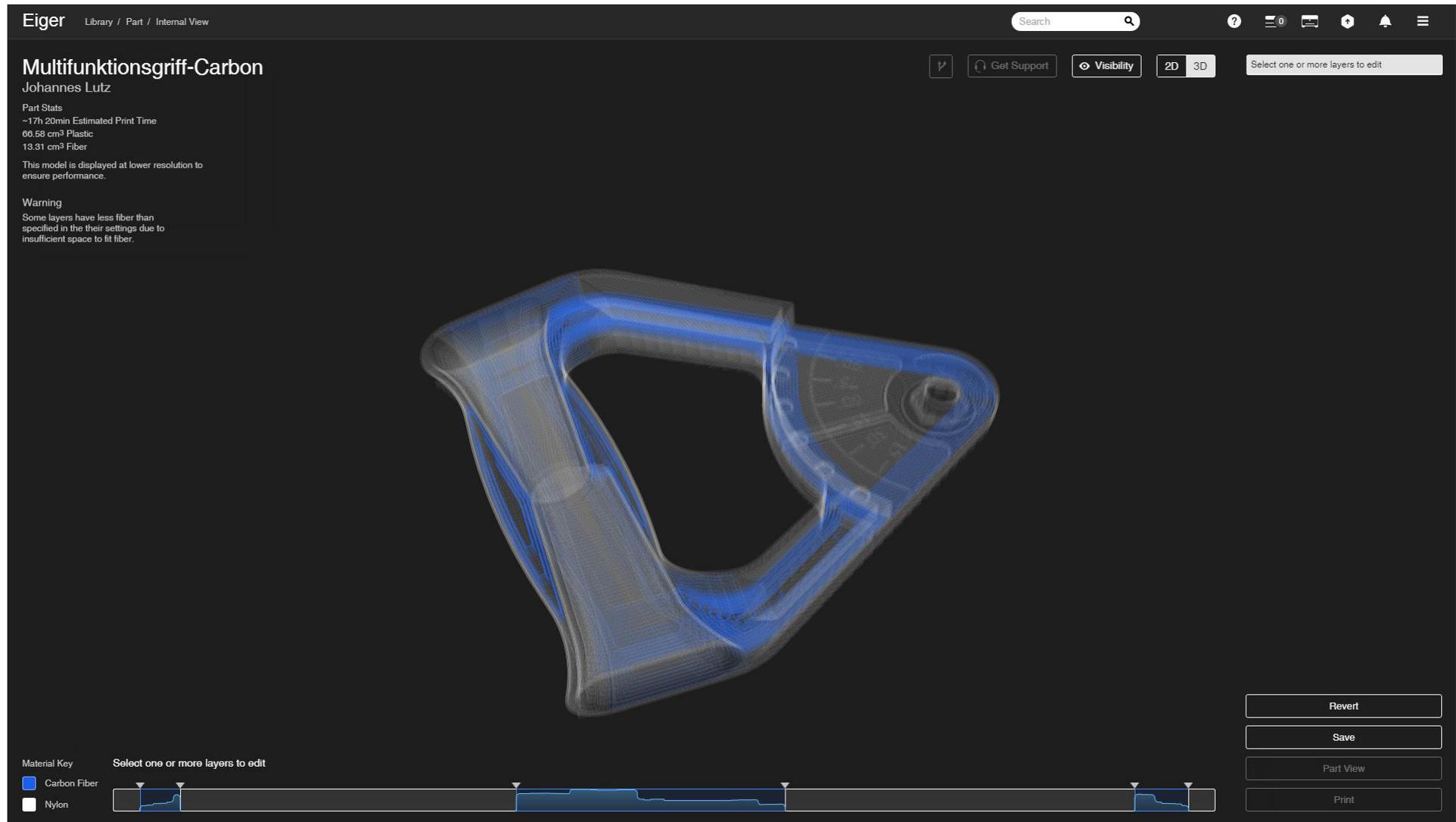
Save

Internal View

Print

Your organization doesn't have any Mark Two 3D Printers yet [Request Info](#)

Sektion 4 Neue Trends der Additiven Fertigung



Sektion 4 Neue Trends der Additiven Fertigung

Eiger Library / Part / Internal View

Multifunktionsgriff-Carbon
Johannes Lutz

Part Stats (up to layer 10)
1h 54min / ~17h 20min Estimated Print Time
4.88 / 68.73 cm³ Plastic
1.01 / 2.34 cm³ Fiber

This model is displayed at lower resolution to ensure performance.

Warning
Some layers have less fiber than specified in their settings due to insufficient space to fit fiber.

Editing Layer: 10 / 164

Fill Pattern	Triangular Fill
Use Fiber	<input checked="" type="checkbox"/>
Fiber Pattern	Concentric Fiber
Concentric Fiber Rings	10
Start Rotation Percent	25
Pause After Layer	<input type="checkbox"/>

Material Key

Editing Layer: 10 / 164

- Carbon Fiber
- Nylon

1.25mm

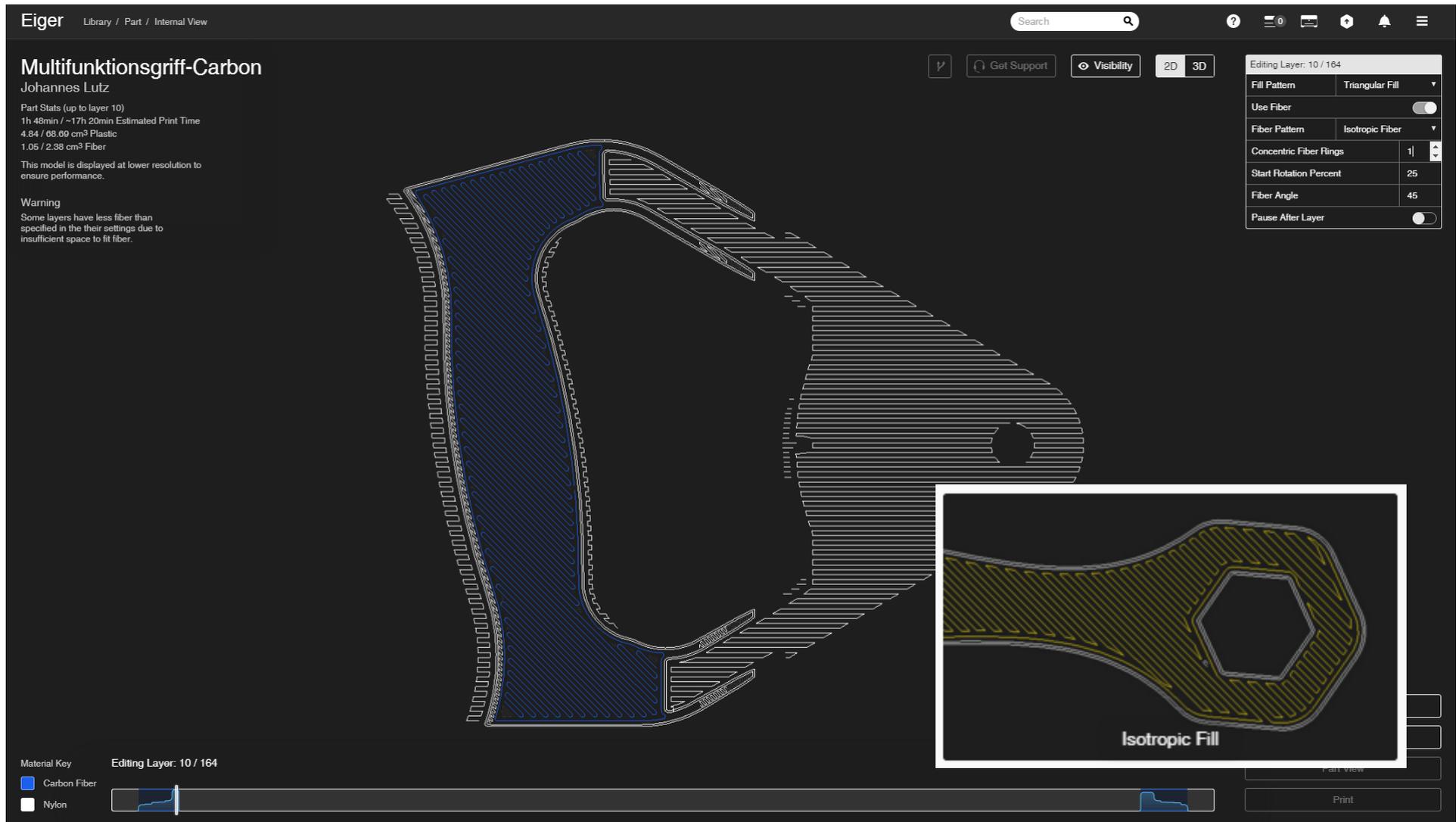
Part View

Print

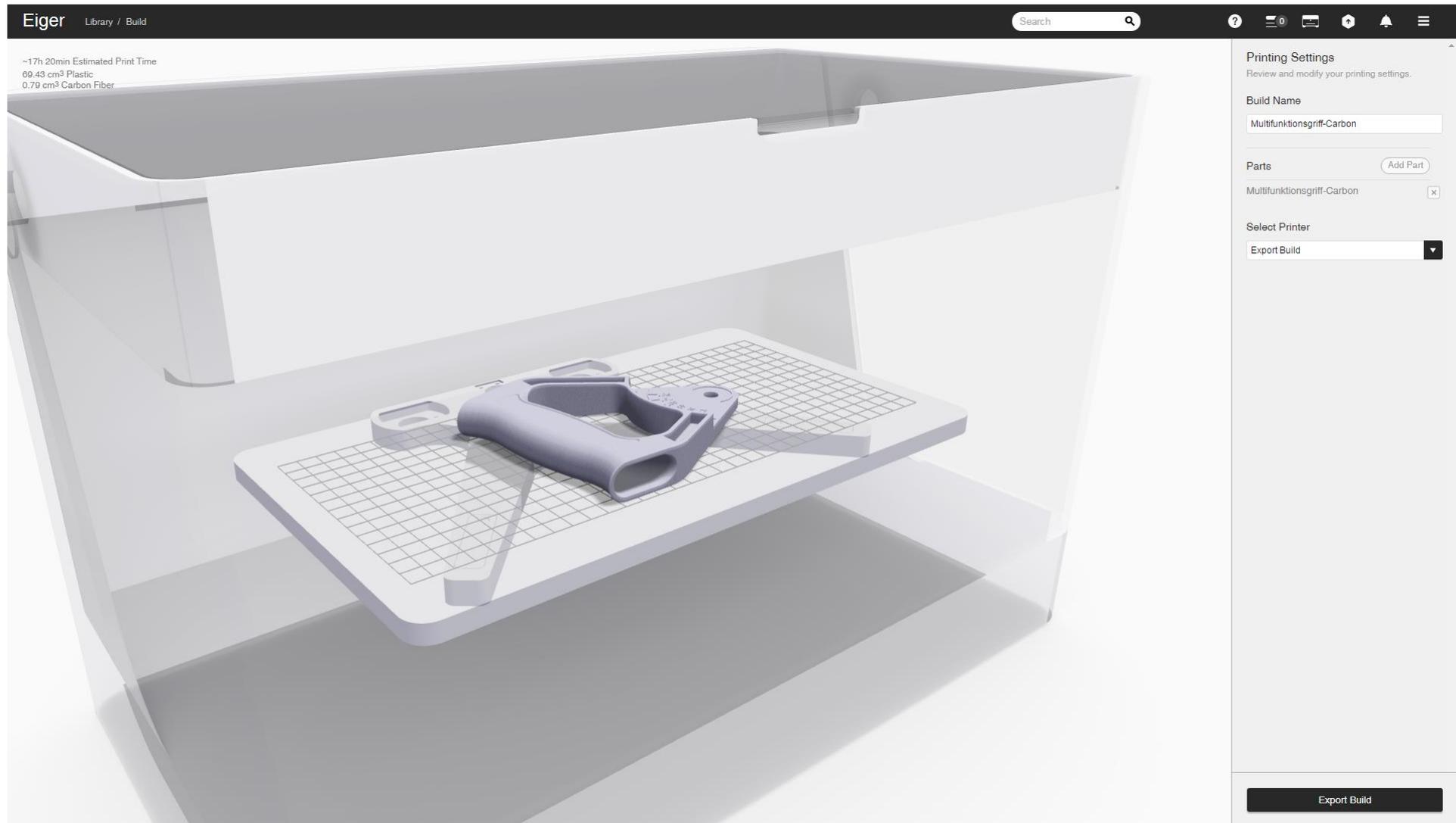
Fiber fill type

Concentric Fill

Sektion 4 Neue Trends der Additiven Fertigung



Sektion 4 Neue Trends der Additiven Fertigung



Print Stronger



Herzlichen Dank



Mark **3D** GmbH
Anton-Huber-Straße 20

73430 Aalen

Telefon:
07361 63396 00

Mail
info@mark3d.de

I-Net
www.mark3d.de



Was können preisgünstige 3D-Drucker leisten - eine Übersicht

Dietmar Glatz

Hochschule Merseburg

Kurzvita Dietmar Glatz

Ausbildung 1972-1975 Universität Paderborn

Abschluss als Dipl.-Ing. Maschinenbau / Fachrichtung Kunststofftechnik

Spezielle Qualifikationen

CAD, CAM, CNC, Rapid Prototyping, Programmierung von μ Prozessoren

Patente und Veröffentlichungen

Diverse Patent-und Gebrauchsmusteranmeldungen



Abstract:

Was können preisgünstige 3D-Drucker leisten - eine Übersicht

Dietmar Glatz, Hochschule Merseburg

Die Technologie der additiven Fertigung, umgangssprachlich auch als 3D-Druck bezeichnet, ist aus der heutigen Produktionslandschaft nicht mehr wegzudenken.

Jeden Tag entstehen durch diese neuartigen Fertigungsmethoden neue Produkte und Applikationen.

Waren vor Jahren die Preise für derartige Anlagen jenseits der 100.000 € Grenze, bringt die Wirtschaft, beflügelt durch den Wegfall wichtiger Patente, immer mehr Maschinen, auch im kleineren Preissegment, auf den Markt. Die Vielzahl der verschiedenen Systeme zu durchschauen fällt auch Fachleuten schwer. Umso wichtiger ist es, einen Überblick über das Leistungsvermögen von 3D-Druckern im unteren Preissegment zu geben, welches bei 200 € für Bausätze beginnt und bis 10.000 € reicht.

Der Fokus dieses Vortrags richtet sich auf die Verfahren die mit thermoplastischer Matrix arbeiten. Aber auch einige 3D-Drucker, welche mit photosensitiven, duroplastischen Harzen arbeiten, werden vorgestellt.

Interessant ist, dass auch 3D-Drucker aus der „untersten“ Schublade brauchbare Teile liefern können, wenn alle Parameter und auch die Anlage selbst sauber eingestellt sind, welches wiederum eine Portion an Fachwissen und/oder Erfahrung voraussetzt.

In dieser Übersicht können nicht alle Systeme per Definition untersucht und dargestellt werden.

Kontaktdaten der Referenten

Plenarveranstaltung

Elena López	Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden	Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden Winterbergstr. 28 01277 Dresden Telefon +49 351 83391-0 Fax +49 351 83391-3300
André Streek	Laserinstitut Hochschule Mittweida	Hochschule Mittweida Fakultät Ingenieurwissenschaften Technikumplatz 17 09648 Mittweida Tel.: +49 (0) 3727 / 58-1837 Fax: +49 (0) 3727 / 58-21837 eMail: streek@hs-mittweida.de
Stefan Kaierle	Laser Zentrum Hannover e.V.	Laser Zentrum Hannover e.V. Materials and Processes Department Hollerithallee 8 30419 Hannover Tel.: +49 511 2788-370 Fax: +49 511 2788-100 E-mail: s.kaierle@lzh.de

Sektion I: Folgeverfahren

Jens Bliedtner	Ernst-Abbe-Hochschule Jena	Ernst-Abbe-Hochschule Jena Fachbereich SciTec Carl-Zeiss-Promenade 2 07745 Jena Telefon +49 3641 205-444 Fax: +49 3641 205-401 eMail: Jens.Bliedtner@eah-jena.de
Thomas Töppel Bernhard Müller	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU	Fraunhofer IWU Nöthnitzer Str. 44 01187 Dresden Telefon: +49 351 / 47 72 - 21 52 eMail: thomas.toepfel@iwu.fraunhofer.de
Ines Dani	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU	Fraunhofer IWU Reichenhainer Str. 88 09126 Chemnitz Telefon: +49 371 5397-1311 eMail: ines.dani@iwu.fraunhofer.de
Günter Ganß	Ingenieurbüro für Kunststofftechnik Suhl	Ingenieurbüro für Kunststofftechnik Suhl Am Lahnaer Platz 14 98716 Geraberg Tel: 03677/869351 Mobil: 0175 8064658 Mail: g.ganss@online.de

Kontaktdaten der Referenten

Sektion 2: Biomedizinische Applikationen

Matthias Schnabelrauch	INNOVENT e. V.	INNOVENT e. V., Forschungsbereich Biomaterialien Prüssingstrasse 27B 07745 Jena Phone: +49 3641 282512 Fax: +49 3641 282530 eMail: ms@innovent-jena.de
Johannes Rost	Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.	Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V. an der HTWK Leipzig Karl-Liebknecht-Straße 132 D-04277 Leipzig Tel.: +49 341 3076-8726 eMail: johannes.rost@htwk-leipzig.de
Michael Hacker	Universität Leipzig	Universität Leipzig Institut für Pharmazie, Pharmazeutische Technologie Eilenburger Str. 15a 04317 Leipzig Tel.: 0341-9736602 Fax: 0341-9736609 eMail: mhacker@uni-leipzig.de
Felix Krujatz	Technische Universität Dresden	TU Dresden Institut für Naturstofftechnik Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik Besucheradresse: ZINT, Bergstrasse 120, 01069 Dresden Phone: 0049-35146332727 eMail: Felix.Krujatz@tu-dresden.de

Sektion 3: 3D-Druck von Metall

Martin Erler	Laserinstitut Hochschule Mittweida	Hochschule Mittweida Fakultät Ingenieurwissenschaften Technikumplatz 17 09648 Mittweida Tel.: +49 3727 / 58-1841 Fax: +49 3727 / 58-21841 eMail: erler2@hs-mittweida.de
Nils Keller	Additiv Works GmbH	Additive Works GmbH Leher Heerstr. 173B 28357 Bremen Tel: +49 (0)421-331001-21 eMail: keller@additive.works

Kontakt Daten der Referenten

Philipp Klimant	Technische Universität Chemnitz	Technische Universität Chemnitz Fakultät für Maschinenbau Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse Reichenhainer Straße 70 D-09126 Chemnitz Tel.: +49 (0)371 / 531-36911 eMail: philipp.klimant@mb.tu-chemnitz.de
Stefan Szemkus	Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH	Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik u. Werkstoffprüfung GmbH Otto-Schott-Str. 13 07745 Jena eMail: s.szemkus@ifw-jena.de

Sektion 4. Neue Trends der Additiven Fertigung

Hans-Werner Theobald	3D Metall Theobald	3D Metall Theobald Karl-Heine-Straße 99 04229 Leipzig Telefon: +49 (0)176.62 03 25 79 +49 (0)341.49 12 17 5 E-Mail: info@3d-metall-theobald.de
Franziska Kaut	P&G Service GmbH	Procter&Gamble Service GmbH 61476 Kronberg im Taunus Tel: 06173 30 1188 eMail: kaut.f@pg.com
Joachim Kasemann	Mark3D GmbH	Mark3D GmbH Anton-Huber-Straße 20 73430 Aalen Telefon: 07361 63396-02 Telefax: 07361 63396-19 eMail: jk@mark3d.de
Dietmar Glatz	Hochschule Merseburg	Hochschule Merseburg Eberhard-Leibnitz-Straße 2 06217 Merseburg Tel.: (0461) 46-2802 Mobil: (0171)75 68 566 Mail: dietmar.glatz@hs-merseburg.de

Kooperationsbörse

Mitteldeutsches Netzwerk Rapid Prototyping enficos mitz GmbH, 06217 Merseburg, Fritz-Haber-Straße 9	Dr. Bernd Schmidt, Tel. 03461-20 60 80 www.rp-netzwerk.de
Hochschule Mittweida, Laserinstitut 09648 Mittweida, Technikumplatz 17	Robby Ebert, Tel. 03727-581401 www.hs-mittweida.de
Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften 09648 Mittweida, Technikumplatz 17	Prof. Dr.-Ing. Jörg Matthes, Tel. 03727-581545 www.hs-mittweida.de
Messe Erfurt GmbH 99094 Erfurt, Gothaer Straße 34	Diana Keucher, Tel: 0361-4001730 www.messe-erfurt.de
Dick & Dick GmbH generative Fertigung Plautstraße 20, 04179 Leipzig	Dipl.-Ing. Fabian Hartmann www.dick-dick.de
Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- u. Umwelttechnologien e.V. GMBU 06120 Halle (Saale), Erich-Neuß-Weg 5	Dr. Klaus Krüger, Tel: 0345 - 77 79 64 1 www.gmbu.de
Ingenieurbüro für Kunststofftechnik Suhl	Günter Ganß 03677 869 351
Raylase AG 82234 Wessling, Deutschland	Dr. Philip Schön, Tel. 08153-88 98-0 www.raylase.de
Rapidobject GmbH 04229 Leipzig, Weißenfelser Straße 84	Petra Wallasch, Tel: 0341 - 23 18 37 30 www.rapidobject.com
3D-Metall Theobald e.K. 04229 Leipzig, Karl-Heine-Straße 99 (BIC)	Hans-Werner Theobald, Tel. 0341 491 21 75 www.3d-metall-theobald.de
form+technik Engineering GmbH 09224 Chemnitz/OT Grüna, Chemnitzer Str. 83	Roy Friedel, Tel. 0371 8100980 www.formundtechnik.de
cesima ceramics M. Kage D-39524 Wust-Fischbeck, Rathenower Str.2	Matthias Kage, Tel. 039323 75193 www.cesima.de

Kooperationsbörse

Portec GmbH 98544 Zella-Mehlis, Am Köhlersgehäu 32	Holger Krause, Tel: 03682-46690 www.portec-gmbh.de
GEFERTEC GmbH 12681 Berlin, Schwarze-Pumpe-Weg 16	Marcus Ortloff, Tel. 030912074371 www.gefertec.de
LASERVORM GmbH 09648 Altmittweida, Suestraße 8	Tommy Lindner, Tel: (0) 3727 99 74 73 www.laservorm.com
Handwerkskammer Halle (Saale), Bildungs- und Technologiezentrum BTZ 06132 Halle (Saale), Straße der Handwerker 2	Thomas Klokow, Tel: 0345 - 77 98 891 www.hwkhalle.de
Formicum 3D-Service GmbH 04105 Leipzig, Max-Planck-Straße 5	Gunther Bigl, Tel: 0341- 39 28 06 30 www.formicum.de
3D-Schilling GmbH 99706 Sondershausen/Oberspier, Mühlenweg 4	Herr Christian Schilling, Tel.: 03532 770230 www.3d-schilling.de
EAH Jena/ Modellfabrik 3D-Druck im Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum 07745 Jena, Carl Zeiss Promenade 2	Constanze Möhwald, Tel. 03641 205 - 128 www.EAH-jena.de
burms 07745 Jena, Carl-Zeiss-Promenade 10	Uwe Brick, Tel.: 03641 635178 www.burms.de
3Faktur 07749 Jena, Moritz-von-Rohr-Straße 1a	Johannes Zaremba, Tel: 03641-3200067 www.3faktur.com
Hochschule Magdeburg-Stendal 39114 Magdeburg, Breitscheidstraße 2	Dr. Peter Gerth www.maschinenbau.hs-magdeburg.de
Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung c/o Fraunhofer IWU Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz	Sandra Piehler, Tel. 0371 5397-1465 www.generativ.fraunhofer.de
HTWK Leipzig, Fakultät Maschinenbau und Energietechnik 04277 Leipzig, Karl-Liebknecht-Straße 134,	Tobias Flath, Tel. 0341-3076 4141 www.htwk-leipzig.de
Hochschule Merseburg, Weiterbildung und Personaltransfer 06217 Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2	A. Kröner, Tel. 03461 46-2700 www.hs-merseburg.de