

Rapid.Tech

International Trade Show & Conference
for Additive Manufacturing

Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference
Erfurt, Germany, 14 – 16 June 2016

Wieland Kniffka
Michael Eichmann
Prof. Dr. Gerd Witt



Rapid.Tech

International Trade Show & Conference
for Additive Manufacturing

www.rapidtech.de

HANSER

W. Kniffka, M. Eichmann , G. Witt (Hrsg.)

**Rapid.Tech – International Trade Show &
Conference for Additive Manufacturing**

Wieland Kniffka
Michael Eichmann
Gerd Witt (Hrsg.)

Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing

Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference
Erfurt, Germany, 14 – 16 June 2016

HANSER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Print-ISBN 978-3-446-45017-2

E-Book-ISBN 978-3-446-45060-8

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Druck und Bindung: Books on Demand, Norderstedt

Printed in Germany

Table of Contents

The proceedings contain scientific articles (S) and user's articles (U). Scientific articles had to pass a scientific quality assurance (double-blind review of abstract and paper) by the review committee.

Greeting 6

Advisory Council & Review Committee 7

Part 1: User's Conference (U)

GENERATUM – interaktiver, webbasierter Produktgenerator
GENERATUM – interactive, webbased product generator
Dipl.-Ing. Hendrik John 9

Werkstoffmechanische Charakterisierung von mittels Fused Filament Fabrication
hergestellten Strukturen
Mechanical Characterization of structures produced by Fused Filament Fabrication
*Oliver Wundes, Thomas Hanke, Ralf Schlimper, André Henkel, Torsten Theumer,
Andreas Krombholz* 18

Industrielle Additive Fertigung: Kunststofflasersintern als Produktionszweig
Industrial additive manufacturing: plastic laser sintering as branch of production
Ingrid Prestien 27

Part 2: Trade Forum "Science" (S)

Increasing the build-up rate by High Power Selective Laser Melting for Ti6Al4V
Aufbauratensteigerung mittels High-Power Selective Laser Melting für den
Werkstoff Ti6Al4V
Dipl.-Ing. Maximilian Schniedenharn, Dr. Qianchu Liu 36

Strategien zur Erreichung eines konstanten Volumenaufbaus bei der additiven
Fertigung mittels Laser-Pulver-Auftragschweißen
Strategies to achieve constant build-up with laser metal deposition
Torsten Petrat, Benjamin Graf, Andrey Gumenyuk, Michael Rethmeier 49

Reduzierung der Oberflächenrauigkeit additiv gefertigter metallischer Komponenten
mit Hilfe des erweiterten Elektropolierens
Reduction of the surface roughness of additively manufactured metallic parts
by enhanced electrolytic smoothing
S. Bagehorn, T. Mertens, O.Seack, H.J. Maier 61

Maschinenspezifische Kostentreiber bei der additiven Fertigung mittels
Laser-Strahlschmelzen (LBM)
Machine-specific Cost Drivers in Additive Manufacturing Technologies like
Laser Beam Melting (LBM)
Dipl.-Ing. Johannes Schrage 72

Anlagenabhängigkeit von optimalen Prozessparametereinstellungen beim Laser-Sintern unterschiedlicher Thermoplaste Machine-Related Dependence of Optimal Process Parameter Settings during Laser Sintering of Different Thermoplastics <i>Andreas Wegner, Gerd Witt</i>	90
Geometrische Genauigkeit von Lasersinter-Bauteilen: Einflüsse und Maßnahmen Dimensional accuracy of polymer laser sintered parts: Influences and measures <i>Stefan Josupeit, Patrick Delfs, Tobias Lieneke, Guido Adam, Hans-Joachim Schmid</i>	107
Chemische Oberflächennachbehandlung von Ultem 9085 Bauteilen Chemical Surface Treatment of Ultem 9085 Parts <i>Matthias Fischer, Oliver Seewald, Volker Schöppner</i>	121
Untersuchung des Pulvereinflusses auf den SLM Prozess Investigations of the powder influence on the SLM process <i>Sebastian Matthes M. Sc., Robert Kahlenberg M. Eng., Christian Straube M. Sc., Dr.-Ing. Simon Jahn</i>	134
High level process map for Selective Laser Melting High level process map for Selective Laser Melting <i>Eckart Uhlmann, Rodrigo Pastl Pontes, André Bergmann</i>	149
Restriktionsgerechte Bauteilgestaltung für das Selektive Laserstrahlschmelzen Restriction oriented Component Design for Selective Laser Melting <i>Rene Bastian Lippert, Roland Lachmayer</i>	159
Systematische Bionische Bauteilgestaltung zur Ausschöpfung des AM-Designpotenzials Leveraging AM-induced Design Potential Through Systematic Biomimetic Part Design <i>Tobias Kamps, Melanie Gralow, Christian Seidel, Gunther Reinhart</i>	171
Prozessangepasste Charakterisierung der Fließfähigkeit pulverförmiger Strahlschmelzmaterialien New methods for process-adapted characterization for selective beam melting powders <i>Stephanie Fanselow, Marius Sachs, Karl-Ernst Wirth, Jochen Schmidt, Wolfgang Peukert</i>	185
Einflüsse von Partikeloberflächenmodifikationen auf das Materialverhalten bei Laserstrahlschmelzprozessen Investigation of surface modifications of particles used in laser beam melting <i>Marius Sachs, Jochen Schmidt, Wolfgang Peukert, Karl-Ernst Wirth</i>	197
Thermisches und optisches Verhalten LDS-funktionalisierter Pulver für das selektive Lasersintern Thermal and Optical Behavior of LDS-functionalized Powders for Selective Laser Sintering <i>Dipl.-Ing. Christian Gath, Dipl.-Ing., (FH) Katrin Wudy, Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer</i>	210

Part 3: Trade Forum “Additive Contract Manufacturing“ (U)

Arbeitssicherheit in der pulverbettbasierten Additiven Fertigung Occupational Safety in powder-bed based Additive Manufacturing <i>Schmid, Dominik, Schmutzler, Christoph, Schreiber, Sandra, Anstatt, Christine, Zäh, Michael F.</i>	226
---	-----

Part 4: Trade Forum “3D Metal Printing“ (U)

Additive Manufacturing mit wasserverdüstem Stahlpulver Additive Manufacturing using water atomised steel powder <i>Dr. Simon Höges, Alex Zwiren, Christopher Schade</i>	237
---	-----

Selektives Laserstrahlschmelzen von Elektron® MAP 43 Magnesiumpulver Selective Laser Melting of Elektron® MAP 43 Magnesium Powder <i>Matthias Gieseke, Rajiv Tandon, Tobias Kiesow, Yvonne Wessarges, Christian Nölke, Stefan Kaierle</i>	244
---	-----

Additive Fertigung mit Metall in der Produktion - Herausforderungen und Lösungsansätze Additive Manufacturing with Metals in Production - Challenges and Solutions <i>Oliver Kaczmarzik</i>	253
---	-----

Additive Fertigung mit Metallspritzguss-Granulaten Additive manufacturing with metal injection molding granules <i>Clemens Lieberwirth, Hermann Seitz</i>	262
---	-----

Part 5: Trade Forum “Design“ (S)

Additiv denken! Think Additively! <i>Dr.-Ing. Hans-Jürgen Gittel</i>	271
--	-----

Untersuchung zu Konstruktionsempfehlungen für kleine Strukturen beim Elektronenstrahlschmelzen Investigation in design recommendations for small structures in additive manufacturing electron beam melting <i>Michael Süß, Burghardt Klöden, Alexander Kirchner, Thomas Weißgärber, Dirk Hofmann, Christine Schöne, Ralph Stelzer, Bernd Kieback</i>	279
---	-----

Festigkeits- und leichtbauoptimierte Konstruktion und Auslegung eines additiv gefertigten Fahrradvorbaus Strength and lightweight optimized design of an additive manufactured bicycle stem <i>Jan-Peter Brüggemann, Wadim Reschetnik, Hans A. Richard, Gunter Kullmer, Britta Schramm</i>	290
---	-----

Kostengünstige Ultraleichtgreifer in Hybridbauweise Hybrid structures for economic ultra lightweight end of arm tools <i>Christoph Doerffel</i>	301
---	-----

Part 6: Trade Forum “Medical Technology“ (U)

Entwicklung patientenspezifischer Orbitabodenimplantate - Ergebnisse und Perspektiven Development of patient-specific orbital floor implants - results and perspectives <i>C. Rotsch, R. Grunert, T. Töppel, C. Erhardt, M. Wagner, H. Essig</i>	312
Der Einfluss der strukturellen Ausrichtung auf die mechanischen Eigenschaften offenporiger, selektiv Laser geschmolzener TiAl6V4-Strukturen Influence of the structural orientation on the mechanical properties of selective laser melted Ti6AL4V open-porous scaffold <i>Volker Weißmann, Rainer Bader, Harald Hansmann, Nico Laufer</i>	319

Part 7: Trade Forum “Tools“ (U)

Neue Lösungen für temperierte Werkzeuge - Additive Fertigung mit der Hermle MPA Technologie New solutions for cooling your tools - additive manufacturing with Hermle MPA technology <i>Rudolf Derntl</i>	331
Robotergestütztes additives Fertigungsverfahren zur Herstellung geometrisch komplexer Großbauteile Robot based additive manufacturing process for the production of large complex parts <i>Dipl.-Ing. Torsten Felsch, Dr. Uwe Klaeger</i>	340

Part 8: Trade Forum “Aviation“ (U)

Unterstützung des AM Entscheidungsprozesses in der Luftfahrersatzteilversorgung Supporting the Decision Process in MRO Aerospace for an AM Integration <i>Gereon Deppe, Rainer Koch</i>	350
---	-----

Part 9: Trade Forum “Automotive Industry“ (U)

Seriennahe Bauteileigenschaften für die automobiler Produktentwicklung durch Additive Tooling Series-like product properties for automotive product development by additive tooling <i>Martin Friedrich, M. Sc., Dr.-Ing. Dominik Rietzel, Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt</i>	362
Autoklima Optimierung mittels SLS Improving Car Climate Control with SLS <i>M. Vetterli, R. Schmid, M. Schmid, S. Harke, T. Durand and K. Wegener</i>	370
Anwendungsorientierter Einsatz von Werkzeugstählen im 3D-Druck Application-oriented usage of tool steels in 3D-Printing <i>Robert Stache</i>	380
Kunststoffbasiertes Additive Manufacturing für Elektromobilitätsanwendungen Polymer-based Additive Manufacturing for E-Mobility Components <i>Dr.-Ing. Johannes Triebs</i>	390

Füge- und Montagerichtlinien als Teil generischer Konstruktionsrichtlinien
im Automobilbau
Joining and assembly manual as part of generic design guidelines in the
automobile industry
Thiemo Fieger, Gerd Witt403

Part 10: Trade Forum “Electronic Engineering“ (U)

3D-gedruckte Elektronik – Technologie und Anwendungen.
3D Printed Electronics – Technology and Applications.
Dr. Martin Hedges414

Greeting

Dear readers,

Additive Manufacturing (AM) and 3D Printing are two of the key technologies that are making production more efficient, sustainable and flexible across a wide spectrum of industries.

Over the three days of the Rapid.Tech conference, an elite international community of scientists and practitioners will put the marketability and practical relevance of pioneering applications and visionary approaches in this field to the test. Our focus on key industries and future areas of application means that participants will gain unique insights into future concepts and specialist expertise in the different trade forums, which have now been expanded to cover eleven major sectors.

With its tightly linked trade fair and conference, Rapid.Tech offers visitors an ideal platform from which to exchange scientific expertise and discuss user-specific issues in detail. It makes the developments and concepts accessible not just to existing experts but also to newcomers who are planning to apply these technologies in their future production processes. Only at Messe Erfurt professionals and newcomers have the possibility to inform themselves in such a comprehensive way about visions, trends, innovations and applications of Additive Manufacturing.

The conference proceedings we have compiled for you features a number of authoritative scientific articles and examples of applications from the User's Conference and the trade forums "Additive Contract Manufacturing", "3D Metal Printing", "Automotive Industry", "Electronic Engineering", "Science", "Tools", "Aviation", "Medical Technology" and "Design". These contributions have been authored by visionaries, scientists, managers and engineers from all fields of Additive Manufacturing research and applications.

Together, we share the objective of continuing to exchange knowledge and hands-on experience between industry and research bodies so that visionary ideas can be translated into added value.

Wieland Kniffka
CEO, Messe Erfurt GmbH

Advisory Council & Review Committee

Organizer of the User's Conference

Verein der Ingenieure und Techniker in Thüringen e.V. – VITT

Organizer and venue Rapid.Tech

Messe Erfurt GmbH
Gothaer Straße 34
99094 Erfurt / Germany
www.messe-erfurt.de

Advisory Council

- Cremer, Frank / **Kegelmann Technik GmbH**
- Eichmann, Michael / **Stratasys GmbH**
- Prof. Dr. Emmelmann, Claus / **LZN Laser Zentrum Nord GmbH**
- Prof. Dr. Franke, Jörg / **Universität Erlangen-Nürnberg**
- Fruth, Carl / **FIT AG**
- Frank, Dietmar / **EOS GmbH**
- Dr. Hartmann, Günter / **VITT e.V.**
- Horsch, Florian / **HypeCask**
- Hund, Daniel / **Concept Laser GmbH**
- Dr. Jahn, Simon/ **Günter-Köhler-Institut für Füge-technik und Werkstoffprüfung GmbH**
- Dr. Klemp, Eric / **voestalpine Additive Manufacturing Center**
- Klenk, Ulli / **SIEMENS AG**
- Köster, Antonius / **Antonius Köster GmbH & Co. KG**
- Dr. Müller, Bernhard / **Fraunhofer Allianz Generative Fertigung (Fraunhofer IWU)**
- Ohldin, Patrik / **ARCAM AB**
- Okur, Deniz / **3D Systems GmbH**
- Schumacher, Ralf / **Fachhochschule Nordwestschweiz**
- Prof. Dr. Witt, Gerd / **Universität Duisburg-Essen**
- Prof. Dr. Zimmer, Detmar / **Universität Paderborn**

Scientific Review Committee

- Prof. Dr.-Ing. Drummer, Dietmar
Lehrstuhl für Kunststofftechnik, FAU Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr.-Ing. Emmelmann, Claus
Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik, TU Hamburg-Harburg
- Prof. Dr. rer. nat. Poprawe, Reinhart
Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH Aachen
- Prof. Dr.-Ing. Schöppner, Volker
Institut für Kunststofftechnik, Universität Paderborn
- Prof. Dr.-Ing. habil. Witt, Gerd
Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen
- Prof. Dr.-Ing. Zäh, Michael
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München
- Prof. Dr.-Ing. Zimmer, Detmar
Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, Universität Paderborn

Part 1:

User's Conference

GENERATUM – interaktiver, webbasierter Produktgenerator **GENERATUM – interactive, webbased product generator**

Dipl.-Ing. Hendrik John
SYS+ENG

1 Kurzfassung

Der 3D-Druck hat sich aus dem Nischendasein der reinen Prototypen-Herstellung verabschiedet und wird mittlerweile zur Produktion von Funktionsbauteilen eingesetzt. Dabei bleibt er aber eine Domäne der Bastler, großen Industrie-Unternehmen und AM-Dienstleistern, die erhebliche Mittel in diese Technologie investieren, um Produkte zu individualisieren und nach Bedarf, z.B. Ersatzteile, verfügbar zu machen. Den meisten KMUs dagegen bleibt der Nutzen des 3D-Drucks aber verwehrt.

Es stellen sich die Schlüsselfragen, wie man an digitale, dreidimensionale Daten für sinnvolle, individualisierte Bauteile kommt, ohne ein 3D-CAD-Software-Experte zu sein oder für eine Dienstleistung teuer bezahlen zu müssen und den anschließenden Bestell- und Produktionsprozess in bestehende Prozesse ohne zusätzlichen Mehraufwand integriert.

Mit GENERATUM, dem interaktiven, WEB-basierten Produkt-Generator wollen wir eine Antwort auf diese Fragen geben. Mit dem Produkt-Generator bieten wir im B2B Geschäft Unternehmen die Möglichkeit ausgewählte Produkte durch den Endkunden webbasiert parametrisieren, individualisieren und „branden“ zu lassen. Das Ganze integriert in bestehende WEB-Shop Systeme, angepasst an das Corporate Identity des Kunden. Die generative Fertigung der Produkte geschieht im Hintergrund, ohne zusätzliche Produktions-Ressourcen des Kunden zu binden. Bei ausgewählten Produkten ermöglicht das eine wirtschaftliche Fertigung von Endkunden-spezifischen Produktvarianten bereits ab Stückzahl 1. Das Vorhalten einer Vielzahl von Produktvarianten und „Ladenhütern“ entfällt, da die Produkte „on demand“ generiert und produziert werden.

2 Short Abstract

3D-printing has grown up from prototyping to the production of functional parts. But it still remains the domain of DIY-communities and big industrial companies and AM service providers, where last ones invest a considerable amount of money into this technology to individualize their products and to enable production on demand from i.e. spare parts. But most of the SMEs cannot really profit from 3D-printing in their daily business.

The key questions are, a) how to realise the digital content development for individualised product design without being an expert in 3D-CAD-Software or paying for expensive engineering service and b) how to integrate the following order and production process in existing work flows without additional work and expenses.

One answer to this questions is GENERATUM, an interactive, WEB based Product Generator. With this Product Generator we offer companies a web based platform to parameterise, individualise and brand selected products and all this integrated in the companies' existing web-shop adapted to their Corporate Identity. The additive manufacturing and finishing of the individualised products is processed in the background without binding additional production resources of the company. This enables an economical production of end customer specific product variants starting with quantity 1. A full stock of product variants and "dead articles" is not required anymore as the products are created and produced on demand.

3 Langfassung | Full Abstract

Der 3D-Druck hat sich aus dem Nischendasein der reinen Prototypen-Herstellung verabschiedet und wird mittlerweile zur Produktion von Funktionsbauteilen eingesetzt. Dabei bleibt er aber eine Domäne der Bastler und großen Industrie-Unternehmen und AM-Dienstleistern, die erhebliche Mittel in diese Technologie investieren, um Produkte zu individualisieren und nach Bedarf, wie z.B. Ersatzteile, verfügbar zu machen. Den meisten KMUs dagegen bleibt der Nutzen des 3D-Drucks aber verwehrt.

Wer braucht schon Schlüsselanhänger oder Figuren, die mittlerweile vielzählig von Dienstleistern auf großen Internetplattformen vorgehalten werden? Es gibt kaum industrielle Produkte, die man nach eigenem Bedarf leicht anpassen oder gestalten und bestellen kann.

Wie aber kommt man an digitale, dreidimensionale Daten für sinnvolle Bauteile, ohne ein 3D-CAD-Software-Experte zu sein und keinen teuren Dienstleister beauftragen zu wollen und Design und Bestellung in bereits etablierten Prozessen abzuwickeln?

Mit GENERATUM, dem interaktiven, WEB-basierten Produkt-Generator wollen wir eine Antwort auf diese Fragen geben. Mit dem Produkt-Generator bieten wir im B2B Geschäft Unternehmen die Möglichkeit ausgewählte Produkte durch den Endkunden webbasiert parametrisieren, individualisieren und „branden“ zu lassen. Das Ganze integriert in bestehende WEB-Shop Systeme, angepasst an das Corporate Identity des

Kunden. Die generative Fertigung der Produkte geschieht im Hintergrund, ohne zusätzliche Produktions-Ressourcen des Kunden zu binden. Bei ausgewählten Produkten ermöglicht das eine wirtschaftliche Fertigung von Endkunden-spezifischen Produktvarianten bereits ab Stückzahl 1. Das Vorhalten einer Vielzahl von Produktvarianten und „Ladenhütern“ entfällt, da die Produkte „on demand“ generiert und produziert werden.

IST- Situation und Potential

IST:

Nutzung des 3D-Drucks (Additive Fertigung) nur für Profis oder Bastler – es existiert derzeit keine breite Marktbasis und Vielfalt.

Download von 3D-Bauteilen aus Datenbanken ohne echte Individualisierung und Gebrauchsfähigkeit gibt es bereits.

Die Erzeugung individueller und „3D-Druck“-fähiger Daten für Endkunden/Jedermann ohne tiefe 3D-CAD-Kenntnisse ist fast unmöglich.

Die additive Fertigung ist noch nicht weit genug verbreitet.

POTENTIAL:

End-Kunden von WEB-Shops individualisieren ihre Produkte innerhalb festgelegter Parameter online selber!

Varianten erzeugen, verändern, prüfen, branden wird möglich

Integrierte Lösung für den gesamten Bestellablauf im bestehenden WEB-Shop:

Visualisieren, Parametrisieren, Konfigurieren, Individualisieren (LOGO), Bestellen ...

Produktion, Finishing und Logistik läuft gesteuert im Hintergrund.

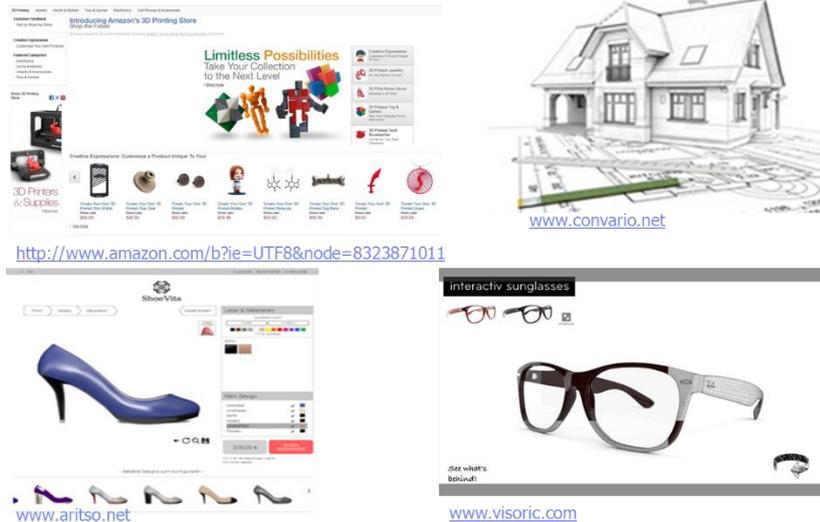
Wirtschaftliche Produktion von Produktvarianten ab Stückzahl 1.

Kritische Erfolgsfaktoren

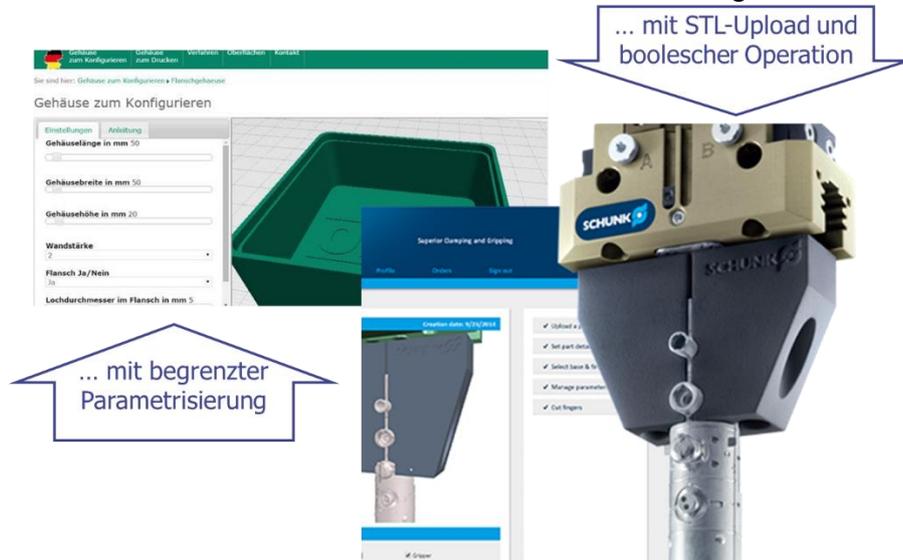
Content Development	↔	3D-Daten-Generierung?
Free 3D CAD	↔	Handhabung?
3D Scanning	↔	Daten-Qualität?
Investment in Equipment	↔	Wirtschaftlichkeit?
Workflow	↔	Komplexität?
3D-printed Part-Quality	↔	Funktionsbauteile?

Konsumenten-Beispiele (B2C) schießen wie Pilze aus dem Boden...

Während Anbieter heute auf Internet-Plattformen rigide vorgegebene Formen oder Objekte mit minimaler Veränderbarkeit feilhalten, bei denen es sich meist um „Gimmicks“ ohne große Funktion oder Wertschöpfung handelt, oder in Online-Konfiguratoren Produkte aus vorgegebenen Komponenten zusammengestellt werden können, kann jetzt das Potenzial des 3D-Drucks voll ausgeschöpft werden, indem der End-Kunde ausgewählte Produkte in Größe, Form und Aussehen online WEB-basiert parametrisieren kann. Damit kombinieren wir die Freiheit im Netz und die Freiheit im Design, um volle Personalisierung zu erreichen.

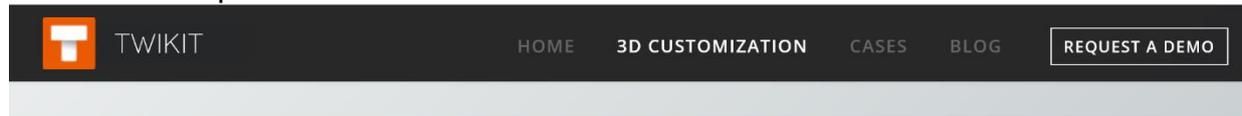


Erste Produkt-Generatoren sind bereits als Stand-Alone-Lösungen am Markt:



Unser Angebot mit dem 3D Generator als Herzstück umfasst die vollständige Prozesskette von der Konfigurationsoberfläche und 3D-Datenerstellung über die Integration in das bestehende WEB-Shop System bis hin zur Anbindung an das bestehende Warenwirtschafts-System und der Abwicklung von Produktion und Logistik. Damit fügen Sie Ihrer Produktpalette ein neues, kreatives und innovatives Element hinzu, das Kunden mit individuellen Wünschen außerhalb des Standardangebots anlocken, befriedigen und somit dauerhaft binden wird. Der Umfang und das Tempo dieses Angebots können vom Kunden bestimmt werden und sind damit skalierbar und kostenmäßig kontrollierbar.

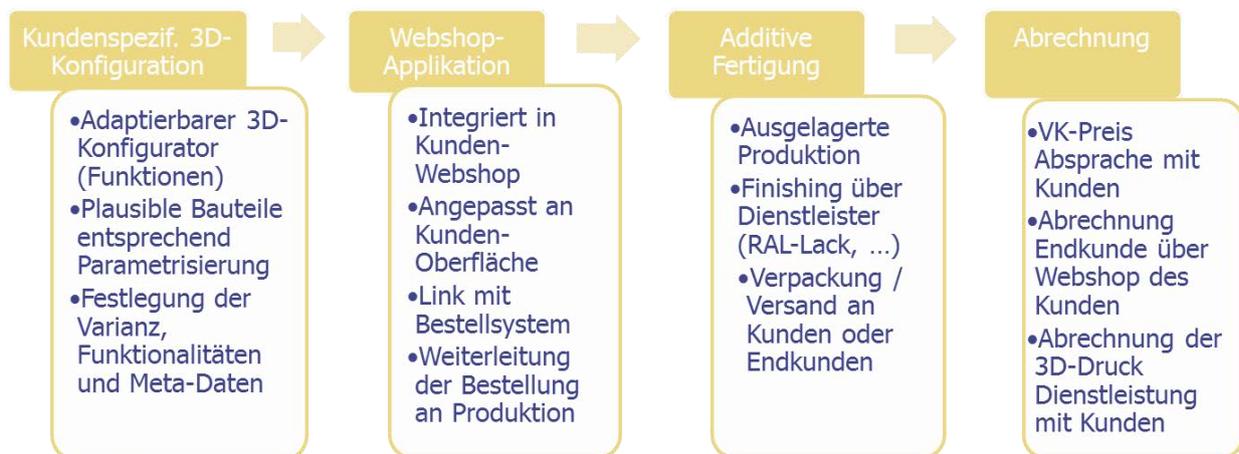
TWIKIT – Beispiel von “End-to-End” als B2C-Prozess



Twikit facilitates end-to-end 3D customization.



Unsere Umsetzung des WEB-basierten 3D-Generators unterscheidet sich von bekannten Lösungen maßgeblich dadurch, dass der 3D-Generator mit dem gesamten Workflow in die bestehende Kunden-Umgebung integriert wird:



Daraus ergeben sich folgende Alleinstellungsmerkmale:

Kunden- / Applikations-getriebener Konfigurator → **Individualisierte Produkte**

Schlüsselfertige Lösungen im B2B-Bereich → **Erweiterung des Angebotspektrums**

Integration in existierende WEB-Shops & ERP Systeme → **Integrative Leistungen**

Einfache Skalierbarkeit des 3D-Generators → **Individueller Kundenzugang**

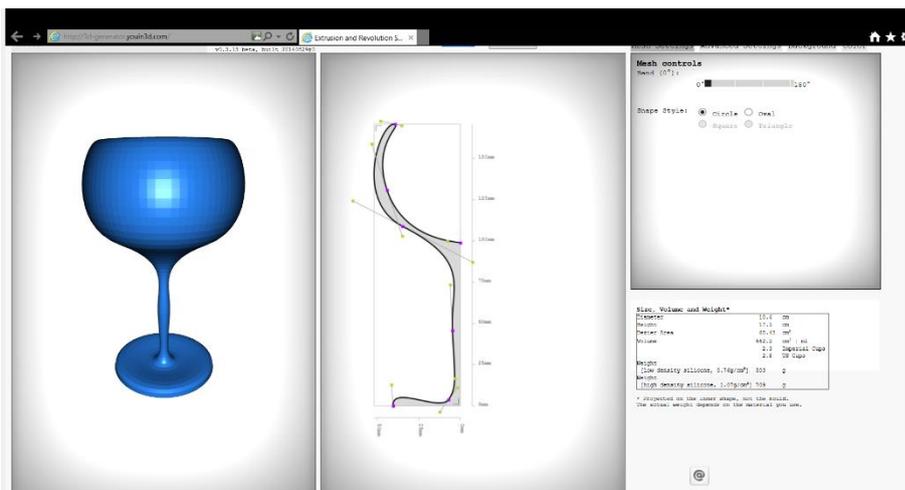
Die 3D-Daten Prozesskette lässt sich wie folgt beschreiben:



Nicht alle Produkte eignen sich für diese Anwendung und so sollte eine wohlüberlegte Auswahl getroffen werden, die mit folgenden Anforderungen einhergeht:

- Varianz
- Skalierbarkeit
- Plausibilitätskontrolle
- Standardschnittstelle kombiniert mit variablem Bereich

Die Erzeugung der 3D-Daten kann über unterschiedliche Ansätze erfolgen, wie z.B. bei Rotationskörpern über die interaktive Modellierung von Splines in der Schritzebene des Rotationskörpers.



Für die WEB-basierte Parametrisierung von Bauteilen/Produkten werden die 3D-CAD-Daten von uns neu aufgesetzt und in Abhängigkeiten zueinander gebracht. Durch bestimmte Algorithmen wird dann das 3D-Modell in Abhängigkeit der ausgewählten Parameter online generiert. Diese 3D-CAD-Algorithmen bieten folgende Vorteile:

- Reduktion Daten-Komplexität
- Performanz auf jedem End-Gerät
- Modell-Daten Sicherheit
- Intuitive Bedienung
- Einfache Integration in Web-Seite
- Kunden-angepasstes Design

Ein typisches Anwendungsbeispiel aus dem Bereich „Normalien“ macht den 3D-Generator-Ansatz deutlich.

Ausgangssituation:

Ein Hersteller von Griffen bietet zu einem bestimmten Griff-Typ, hier ein Kugelknopf, eine unüberschaubare Anzahl von Varianten in seinem Produktkatalog bzw. WEB-Shop an. Das Grunddesign des Produkte bleibt gleich, einige Merkmale ändern sich, bestimmte Merkmale sind an Standards gebunden, wie z.B. Gewindegrößen.

▼ Zeichnungen

Form C mit Gewinde

▼ Artikelübersicht (komprimiert) ▶ ARTIKELAUWAHL-FILTER

Bestellnummer	Material	Form	D1	D2	-D3	-H	T1 min.	CAD	Zub.	Preis	Bestellen
K0650.116043	Edelstahl	C	16	M4	6	15	7,2			3,21 €	
K0650.120053	Edelstahl	C	20	M5	12	18	9,1			3,55 €	
K0650.125063	Edelstahl	C	25	M6	15	22,5	11			5,20 €	
K0650.132083	Edelstahl	C	32	M8	18	29	14,5			7,75 €	
K0650.140103	Edelstahl	C	40	M10	22	37	18			13,73 €	
K0650.150123	Edelstahl	C	50	M12	28	46	21			21,50 €	
K0650.116042	Aluminium	C	16	M4	6	15	7,2			2,40 €	
K0650.120052	Aluminium	C	20	M5	12	18	9,1			2,46 €	
K0650.125062	Aluminium	C	25	M6	15	22,5	11			3,43 €	
K0650.132082	Aluminium	C	32	M8	18	29	14,5			4,85 €	
K0650.140102	Aluminium	C	40	M10	22	37	18			7,12 €	
K0650.150122	Aluminium	C	50	M12	28	46	21			10,32 €	

Die hohe Anzahl an Varianten ruft einen erheblichen Aufwand in Logistik und Produktpflege hervor.

Ansatz des WEB-basierten 3D-Generators:

Presets

Kugelknopf (direkt)

D1: 100 mm

Gewindetyp: ISO-Gewinde (metrisch)

Gewindegröße: Ø 18.0mm

H: 90 mm

D4: 50 mm

T1/T4: 45 mm

Farbe:

Material: PLA (0.02 €/g)

Gitterdetailageringhoch

Logo auftragen

Preis: 11.95€

Form C mit Gewinde

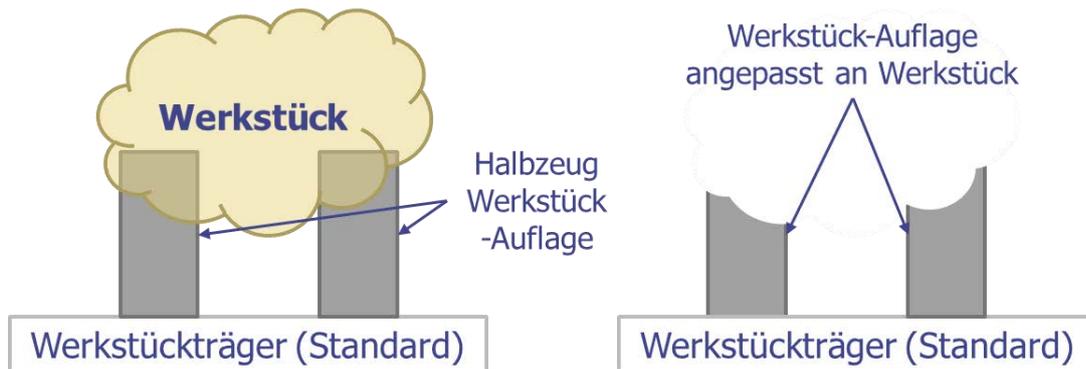
Form K mit Bohrung

v0.1.49 alpha, built 20150728#0

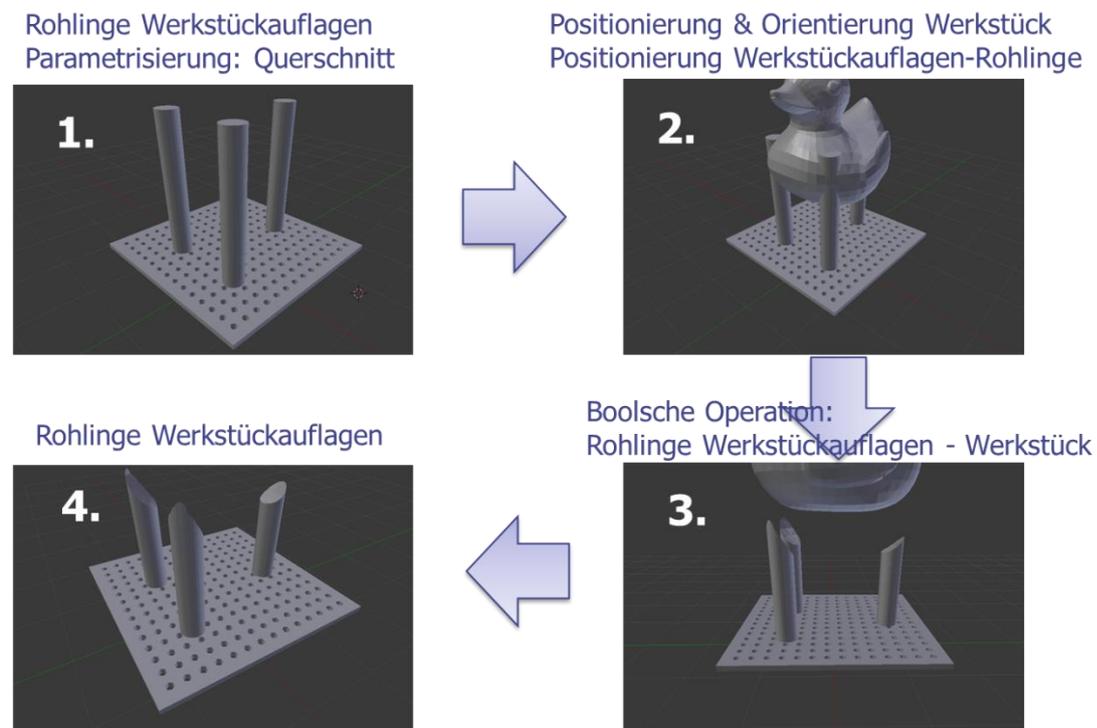
Der End-Kunde kann die freigegebenen Parameter frei eintragen und Gewindegröße, Material und Farbe aus Pull-Down Listen auswählen.
Die Option zum Hochladen und Applizieren eines Kundenlogos ist ebenfalls möglich.

Andere Anwendungen erfordern zusätzliche automatisierte 3D-CAD Funktionen, wie hier die „Boolsche Operation“ für die Generierung von Werkstückauflagen.

Werkstückauflage = Auflage MINUS Werkstück



Der im 3D-Generator automatisierte Ablauf für die Erzeugung der Werkstückauflage wird im Prinzip wie folgt umgesetzt:



Die Vorteile des 3D-Produkt-Generators GENERATUM sind hier noch einmal in Stichworten zusammengefasst:

- Bedienung eines rasant wachsenden Markt
- Differenzierung im Wettbewerb
- Macht ein Produktangebot mit hoher Varianz ab 1 Stück möglich
 - OHNE Werkzeugkosten, da ADDITIVE MANUFACTURING
 - OHNE zusätzliches Engineering, da selbsterklärend und WEB-basiert
 - OHNE zusätzliche Administration, da eShop-Funktion
 - ON DEMAND – Fertigung / KEINE Lagerhaltung (Lieferzeit 1-2 Wochen)
- Ist eine sinnvolle Produkterweiterung zu Ihrem bestehenden Produktportfolio
- Liefert den "MISSING LINK" zwischen Werkstückträger und Werkstück
- Mit dem *Generatum* erweitern Sie Ihren Kundensupport
- Angebot eines attraktiven Tools an Ihren Vertriebspartner (Automatisierern, Systemintegratoren) zur Unterstützung des Endkunden/Anwenders
- Nachhaltiger Nutzen des *Generatums* für den Endkunden/Endanwender über die Systeminstallation hinaus, z.B. bei Änderung des Werkstücks
- Ausgelagerte Fertigungsverantwortung– keine Zusatzinvestitionen
- Bei Erfolg einfach skalierbar - sukzessiv erweiterbar um Produkte & Features

Interessiert sollten vor allem Unternehmen sein, die in ihrem Marktsegment eine hohe Produktvarianz in Verbindung mit kleinen Stückzahlen aufweisen (Werkzeuge, Beschlagteile, Spannsysteme, Normalien, Griffe, Hilfsmittel in der Automatisierung u.v.m.), herstellen und/oder vermarkten und wo häufige Kundenanfragen zu Produktabwandlungen aufgrund zu kleiner Stückzahlen und zu hoher Werkzeugkosten nicht bedient werden können. Dasselbe gilt für sogenannte C-Teile - Teile die nur selten angefragt/produziert werden und zu „Ladenhütern“ werden. Was wäre, wenn der Kunde solche Variantenanfragen komplett selbstständig bis zur Bestellung abwickeln könnte und die Auftragsabwicklung bis zur Auslieferung automatisch seinen Gang geht?

Mit dem 3D-Produkt-Generator GENERATUM können Teile online modifiziert, individualisiert und direkt bestellt werden, integriert in den bestehenden WEB-Shop und Bestellablauf. Damit vergrößern Sie auf einfache Art virtuell Ihr Produktportfolio und bieten Ihren Kunden höchste Innovation. Die veränderbare Produktpalette kann mit wenigen Teilen beginnen und stetig ausgebaut werden.

Werkstoffmechanische Charakterisierung von mittels Fused Filament Fabrication hergestellten Strukturen

Mechanical Characterization of structures produced by Fused Filament Fabrication

Oliver Wundes, Thomas Hanke, Ralf Schlimper, André Henkel, Torsten Theumer, Andreas Krombholz

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Halle, Deutschland

1 Kurzfassung

Zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Bauteilen ist die Bestimmung ihres Deformationsverhaltens unter Belastung von elementarer Bedeutung. In der Regel werden die Verformungen des Bauteils jedoch nur auf dessen Oberfläche registriert und daraus Rückschlüsse auf die Spannungen im Bauteil gezogen. In der hier vorgestellten Arbeit wird gezeigt, dass an mittels FFF (Fused Filament Fabrication) -Drucktechnologie erstellten Bauteilen über eine Kombination von Verfahren aus Röntgen-Computertomographie (CT), Bild-Korrelationsmethoden und In-situ-Druckprüfung eine adäquate Verformungsmessung im Inneren des Bauteils möglich ist. Basierend auf diesen Daten und vorliegenden Materialkenngrößen kann eine werkstoffmechanisch korrekte Beschreibung des Verhaltens eines mittels 3D-Druck erstellten Bauteils unter Belastung bis zur Prognose eines möglichen Versagensverhaltens vorgenommen werden. Das Verfahren beruht auf der Analyse von Volumendatensätzen, welche mit Hilfe einer Röntgen-CT, an Bauteilen in verschiedenen Belastungszuständen, erzeugt werden. Auf Grund der dichtebezogenen Kontrastunterschiede zwischen polymerer Matrix und eingebettetem Fasermaterial kann über die Methode der Grauwertkorrelation das Verschiebungsfeld im gesamten Bauteil in Bezug zum Ausgangszustand ermittelt werden. Aus diesem ist die Berechnung der inneren 3D-Dehnungen möglich. Werden diese zu den aufgebrachten Lasten in Beziehung gesetzt ist man in der Lage eine Reihe von effektiven Materialkenngrößen zu ermitteln.

2 Short Abstract

The determination of the deformation behaviour under load is of elementary importance for describing the material behaviour of components. In general, the deformations of the component are only recognized on the surface, and from that conclusions are drawn on the stresses in the component. This work shows that adequate strain measurements on components created by FFF (Fused Filament Fabrication) printing technology are possible by combination of X-ray computed tomography (CT), image correlation methods and in-situ compression tests. Based on this data and the present material parameters a description of the material-mechanical behaviour of a loaded component created by 3D printing can be made up to the forecast of possible failure behaviour.

The method is based on the analysis of three-dimensional image data which are generated by means of X-ray CT under various load conditions. Due to the differences in absorption contrast due to density differences between polymer matrix and embedded fibre material the displacement field could be identified with the grey scale correlation procedure in the entire component in relation to the initial state. Therefore, the calculation of 3D elongation is possible. When this is brought in relationship to the applied loads, it is possible to identify a number of effective material parameters.

3 Langfassung

3.1 Einleitung

Der additiven Fertigung von Gebrauchsgegenständen des täglichen Bedarfs wird ein großes wirtschaftliches Potential zugesprochen [Rob2015]. Durch die Möglichkeit der Integration von Verstärkungsmaterialien in additiv gefertigte Strukturen, wie beispielsweise Carbon-, Aramid- oder Glasfasern kann dieses Leistungsvermögen noch weiter ausgeschöpft werden. Somit ist mit Hilfe dieser innovativen Druck-Verfahren die Herstellung von strukturell belastbaren Bauteilen möglich geworden.

Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Möglichkeiten einer werkstoffmechanischen Bewertung dieser gedruckten Strukturen, um das Deformations- und Versagensverhalten vorhersagen zu können. Hierfür wurde in der vorliegenden Arbeit ein kombinierter mikroanalytischer-strukturmechanischer Ansatz gewählt. Dabei können die Fasermaterialien nicht nur als Verstärkungsmaterial, sondern auch als zusätzlicher Marker dienen, um mittels Korrelations-Algorithmen wie z.B. der Digitalen-Volumenkorrelation (DVK) die 3D Verformungen unter Belastung berechnen zu können. Das Verfahren beruht auf der Analyse von Volumendatensätzen, welche mit Hilfe einer Röntgen-CT, an Bauteilen in verschiedenen Belastungszuständen, erzeugt werden. Auf Grund der dichtebezogenen Kontrastunterschiede zwischen polymerer Matrix und eingebettetem Fasermaterial kann über die Methode der Grauwertkorrelation das Verschiebungsfeld im gesamten Bauteil in Bezug zum Ausgangszustand ermittelt werden. Aus diesem ist die Berechnung der inneren 3D-Dehnungen möglich. In der vorliegenden Arbeit wurde die Methode anhand eines einfachen Modellsystems, welches eine vergleichende Messung des Verschiebungsfeldes mit konventionellen Methoden ermöglicht, erprobt und evaluiert.

3.2 Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik

Für die Verarbeitung einer Vielzahl von Polymermaterialien hat sich in den vergangenen Jahren das Verfahren der Fused Filament Fabrication erfolgreich etabliert. Hinsichtlich einer kostengünstigen Anwendung des FFF, besonders für größere Bauteile, sind einige Hersteller von 3D-Druckern dazu übergegangen größere Vollmaterialbereiche durch die Einbringung von offenen inneren [Nam2014] Substrukturen mit dreieckigen, rechteckigen oder hexagonalen Querschnitten zu ersetzen. Bei diesen Ansätzen wird nur noch die Außenkontur mit 1 bis 10 Lagen aus monolithischem Material geschlossen modelliert [Klif2016]. So lassen sich neben dem Materialverbrauch auch die benötigten Prozesszeiten optimieren. Die Algorithmen zur Einbringung der Substruktur werden als automatisierte geschlossene Systemlösungen angeboten. Dem Endanwender wird so nur noch die Möglichkeit gegeben zwischen dem Füllgrad und der Füllform zu wählen. Für die Beschreibung des strukturmechanischen Verhaltens von auf diese Weise hergestellten Bauteilen stellen diese inneren Strukturen eine erhöhte Komplexität dar. Für diese Materialien, die eine ausgeprägte innere Struktur aufweisen, wie auch Faserverbundwerkstoffe und Schäume, besteht daher ein großes Interesse an der Aufklärung der Struktur-Eigenschafts-Korrelation. Das werkstoffmechanische Verhalten dieser Materialien lässt sich über eine entsprechende Gestaltung der inneren Struktur (z.B. durch Faserausrichtung oder Zellgeometrie) gezielt einstellen. Mit der hochauflösenden Röntgen-Computertomographie, die seit den 90er Jahren verstärkt Einzug in die Materialwissenschaften hält, steht eine Methode zur Verfügung, die detaillierte Einblicke in das Innere von Materialstrukturen ermöglicht [Mai12]. Ebenfalls in den 90er Jahren wurde bereits über In-situ-Verformungsexperimente in Röntgen-

Computertomographen zur Aufklärung von Verformungs- und Versagensmechanismen an metallischen Werkstoffen berichtet [Bre93]. Mittels hochauflösender Synchrotron-Computertomographie lassen sich diese Techniken auch auf Polymermaterialien mit geringen Röntgen-Absorptionskontrast anwenden [Ell02]. In jüngerer Vergangenheit und mit Weiterentwicklung der Röntgen-CT-Technik wurden In-situ-Verformungsexperimente, z.B. an Polymerschäumen auch in Labor-CT Geräten durchgeführt [Sch12]. In Verbindung mit numerischen Analysen von Repräsentativen Volumenelementen (RVE) lassen sich die beobachteten Verformungs- und Versagensmechanismen auch quantitativ analysieren. Algorithmen zur Ermittlung von inneren Dehnungsfeldern ermöglichen dann einen direkten Vergleich von Experiment und numerischer Simulation [Tod06, Sch15]. In der vorliegenden Arbeit wurden diese Methoden auf gedruckte 3D-Strukturen angewandt.

3.3 Material und Methoden

Für die Herstellung der Prüfkörper wurde ein Drucker des Typs Mark One 3D genutzt. Mittels dieses Systems wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 30 mm und einem hexagonalen Füllmuster gedruckt (s. Abbildung 1). Dafür kam das vom Hersteller bereitgestellte Material Nylon mit einem Filamentdurchmesser von 1,25 mm zum Einsatz. Ergänzend zum Druck des Polymers wurden 7 horizontale Lagen aus glasfaserverstärktem Filament (\varnothing 300 μm) in die Probe eingebettet. Diese Faserlagen wurden mit einer durchgängigen Schicht im Bereich der Boden- und Decklage von der hexagonalen Struktur (Wandstärke 100 μm) getrennt, so dass sich ein Muster, wie in Abbildung 1 dargestellt, ergibt. Der Abstand der Ebenen untereinander betrug 4,6 mm, der Abstand der oberen und unteren Faserlage zum Würfelrand je 1,2 mm. Die Würfelhülle besteht oben und unten aus 4 Decklagen a 0,1 mm und einer 0,2 mm dicken Wandstruktur. Die mittlere Dichte der Würfel betrug 0,44 g/cm³.

Zur Bestimmung der Koordinaten der Glasfaserlagen im Würfel wurden die Proben mittels Röntgen-Computertomographie vermessen. Dafür wurde ein Röntgen-Computertomograph RayScan 200E der Firma RayScan Technologies GmbH verwendet. Dieser verfügt über einen Flat-Panel Detektor mit einer Auflösung von 2048 x 2048 Pixel, welche mit 16 Bit quantisiert werden. Die Voxelgröße bei der Vermessung betrug 50 μm . Für einen 3D-Bilddatensatz einer kompletten Würfelprobe wurden 1200 Einzelprojektionen über den Umlauf von 360° aufgenommen. Die Integrationszeit des Detektors pro Aufnahme betrug 0,9 s. Die mittlere Messzeit für eine komplette CT-Aufnahme ergab sich zu 35 Minuten. Die Röntgenquelle arbeitete bei einer Spannung von 120 kV und einer Leistung von 30 W.

Zur Bestimmung des makroskopischen Verformungsverhaltens wurde an den Proben ein Druckversuch durchgeführt. Dafür wurden die Proben in einer Prüfmaschine vom Typ Zwick 50 kN mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min bei Raumtemperatur und 50 % rH geprüft. Der typische Kraft-Verschiebungsverlauf für eine Probe ist der Abbildung 2 zu entnehmen. Die Verschiebungen wurden mit Hilfe eines Makro-Wegaufnehmers der Firma Zwick vom Typ MultiExtens gemessen.

Zur Durchführung der In-situ-CT-Aufnahmen an mechanisch belasteten Würfelproben wurde auf dem Objektträger des Computertomographen eine Zug-/Druck-Verformungsapparatur (Microstage) der Firma Deben UK Ltd installiert (siehe Abbildung 3). Mittels eines elektromechanischen Antriebes können damit Lasten von bis zu 5 kN

auf eine Probe aufgebracht und Verfahrswege von 10 mm realisiert werden. Prüfkraft und Verschiebung werden mittels eingebauter Kraftmessdose und einer Wegmess-einrichtung gemessen und während der Prüfung aufgezeichnet. Für die Durchführung von Druckprüfungen an den hergestellten Würfelproben, wurden diese zwischen zwei starren Druckplatten positioniert. Der Aufbau der Verformungsapparatur aus einem CFK-Rohr ermöglicht eine nahezu artefaktfreie Aufnahme der belasteten Proben zwischen den metallischen Druckplatten.

Die Belastung der Probe erfolgte weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1mm/min. Die Maschinensteifigkeit wurde in einem Vorversuch zu 22,6 kN/mm ermittelt. Die Proben wurden in 5 Lastschritten, in denen jeweils eine konstante Verschiebung von 100 µm aufgebracht wurde, belastet. Nach jedem Lastschritt wurde die Verschiebung jeweils konstant gehalten und die Probe mittels CT vermessen sowie die Lage der Glasfaserebenen als auch der rekonstruierte Volumendatensatz zur späteren Auswertung mittels DVK ermittelt. Die Prüfkraft wurde über die gesamte Dauer des Versuchs (Lastaufbringungs- und Haltephasen für die CT-Aufnahmen) aufgezeichnet. Die Messdauer pro Belastungsschritt betrug 40 Minuten.

Im Anschluss erfolgte die Auswertung der Deformation im Inneren der Probe mittels einer am Fraunhofer IMWS entwickelten DVK Software „CC-T“ (Continuum- Correlation Toolbox) auf der Basis der Programmiersprache Python. Ergänzend wurde die Stauchung der Probe aus den Verschiebungsdaten der Glasfaserlagen in den einzelnen Belastungsschritten auf der Basis der CT-Daten ermittelt.

3.4 Auswertung der Computertomographiedaten zur Bestimmung der Verschiebungen

Mit einer einfachen Geometrieauswertung wurde die Lage der Glasfaserebenen in Abhängigkeit von der Belastung aus den CT-Bilddatensätzen mit einer Genauigkeit von ± 25 µm ermittelt. Dafür wurden manuell spezifische Muster der jeweiligen Glasfaserlage bestimmt und deren räumliche Lage in den Datensätzen der gestauchten Probe gegenüber der unverformten Probe ermittelt (s. Abbildung 4).

Zusätzlich wurden die Messdaten durch digitale Korrelationsalgorithmen ausgewertet. Das hierfür verwendete Programm CC-T ermöglicht die Bestimmung von Verschiebungsfeldern in Proben vor und nach ihrer Deformation durch DVK. Sie ist die Erweiterung bekannter digitaler 2D-Bildkorrelationsalgorithmen [Bay99; Fra07; Ger07]. Hierfür werden Volumendatensätze, beispielsweise aus Röntgen-CT-Messungen in verschiedenen Laststufen mit einem unbelasteten Datensatz verglichen. In diesem Referenzdatensatz wird das Analyse-Volumen festgelegt und anschließend, anhand der getroffenen Einstellung, durch ein 3D-Raster in eine Vielzahl von Volumenelementen unterteilt. Jedes Volumenelement kann dann durch Volumenkorrelation in einem definierten Suchbereich im deformierten Datensatz wiedergefunden werden.

$$C(u, v, w) = \frac{\sum_{x=1}^{L_x} \sum_{y=1}^{L_y} \sum_{z=1}^{L_z} [f(x, y, z) - \bar{f}][g(x + u, y + v, z + w) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{x=1}^{L_x} \sum_{y=1}^{L_y} \sum_{z=1}^{L_z} [f(x, y, z) - \bar{f}]^2} \times \sqrt{\sum_{x=1}^{L_x} \sum_{y=1}^{L_y} \sum_{z=1}^{L_z} [g(x + u, y + v, z + w) - \bar{g}]^2}}$$

Gleichung 1

Die Kreuz-Korrelation erfolgt entsprechend Gleichung 1 für jedes Volumenelement. Hierbei beschreiben $f(x, y, z)$ und $g(x, y, z)$ die Grauwerte des undeformierten Referenzvolumens, \bar{f} die Mittelwerte der Grauwertintensitäten des Referenzvolumenelements und \bar{g} des deformierten Elements und $L_{x,y,z}$ die Kantenlängen des Volumenelements. In der erhaltenen Matrix aus Korrelationskoeffizienten $C(u, v, w)$ beschreibt die Position des Maximalwertes die wahrscheinlichste Position des Mittelpunktes der deformierten Volumeneinheit. Der aus der vektoriellen Differenz der Mittelpunkte erhaltene Verschiebungsvektor kann für weiterführende Analysen, wie beispielweise der Ableitung des Deformationsgradienten verwendet werden. Die 3D-Ergebnisdarstellung erfolgt mithilfe von Mayavi [<http://mayavi.sourceforge.net/>], eines quelloffenen Visualisierungspaketes. Die Verschiebungen der einzelnen Glasfaserlagen in Abhängigkeit von der aufgetragenen globalen Stauchung sind in der folgenden Abbildung 4 dargestellt und mit dem Ergebnis der Volumenkorrelation überlagert.

Im ersten Belastungsschritt (0 μm auf 100 μm) ist zu erkennen dass die beiden Druckstempel noch keinen vollflächigen Kontakt mit der Probe haben. Die Probe wird im Ganzen auf den oberen fixen Stempel zubewegt. Es erfolgt nur eine Starrkörper-Verschiebung. Ab dem Belastungsschritt 2 (100 μm auf 200 μm) wird die Probe komprimiert. Die geometrische Bestimmung der Lagenposition stimmt zunehmend mit den Ergebnissen aus der DVK überein. Bei zunehmender Kompression in den folgenden Lastschritten (bis 500 μm) korrelieren die Ergebnisse beider Methoden. Die Verschiebungen liegen im Fehlerintervall (halbe Voxelgröße: $\pm 25 \mu\text{m}$) der Geometrievermessung an Hand der CT-Daten. Aufgrund von Bildartefakten im Bereich der metallischen Druckplatten konnten mit der DVK nur Verschiebungen der inneren fünf Lagen ausgewertet werden.

Darüber hinaus erlaubt die DVK eine orts aufgelöste Messung kompletter Verschiebungsfelder, wie die folgende Darstellung exemplarischer Ergebnisse zeigt (Abbildung 5). Im rechten Teilbild ist für eine Schnittfläche der Betrag der berechneten Verschiebungen pro Volumenelement des Auswerterrasters dargestellt. In der Umgebung der Glasfaserlagen (streifenförmig angeordnete gelb/orange farbige Bereiche) können die Verschiebungen im 3D Auswertevolumen in allen Bilddatensätzen orts aufgelöst berechnet werden. Für die zwischen den Glasfaserlagen liegenden Hohlräume der Wabenstruktur des Probekörpers lässt sich per DVK erwartungsgemäß keine Verschiebung auswerten. Die in diesen Hohlräumen eingeschlossene Luft führt lokal zu einem statistischen Bildrauschen in der CT-Aufnahme, welches keine DVK zulässt. Die Verschiebungen sind in diesen Bereichen zu 0 gesetzt (blau).

3.5 Zusammenfassung

Die Ergebnissen zeigen das mittels FFF erstellte Bauteile, durch ihre innere Stützstruktur einen ausreichenden Dichtekontrast in Röntgen-CT-Untersuchungen aufweisen und entsprechende 3D-Bilddaten dadurch mit DVK auswertbar sind. Eine ergänzende Markierung mittels Fasermaterial höher Dichte kann dies noch unterstützen. Die im vorliegenden Beitrag nachgewiesene Eignung der DVK in Bezug auf die morphologische Analyse von inneren Verformungen entsprechend belasteter Proben ist die Grundlage für eine zukünftige adäquate Beschreibung des werkstoffmechanischen Verhaltens von Werkstoffen für das FFF-Verfahren. Sie kann durch eine Erhöhung der Auflösung (Voxelgröße bis $1\mu\text{m}$) signifikant gesteigert

werden. Dies erhöht jedoch den Berechnungsaufwand erheblich. Wird zusätzlich Sub-Voxel-Auflösung erreicht, wird sogar eine detaillierte Auswertung der Verschiebungen der lokalen Mikrostruktur ermöglicht.

3.6 Literatur

- [Bay99] BAY, B. K., SMITH, T. S. FYHRIE, D. P. AND SAAD M.
Digital volume correlation: Three-dimensional strain mapping using X-ray tomography,
Exp. Mech. 39(3) 1999, 217–226.
- [Bre93] BREUNIG, T.M.; STOCK, S.R.; BROWN, R.C.:
Simple load frame for in situ computed tomography and x-ray tomographic microscopy.
Materials Evaluation 51 (1993), 596–600
- [Eli02] ELLIOT, J. A. ; WINDLE, A. H. ; HOBDELL, J. R. ; EECHHAUT, G. ; OLDMAN,
R. J. ; LUDWIG,W. ; BOLLER, E. ; CLOETENS, P. ; BARUCHEL, J.
In-situ deformation of an open-cell flexible polyurethane foam characterised by 3D computed
microtomography.
- [Fra07] FRANCK, C., HONG, S., MASKARINEC, S. A., TIRRELL, D. A. AND RAVICHANDRAN, G.
Threedimensional full-field measurements of large deformations in soft materials using confocal
microscopy and digital volume correlation,
Exp. Mech. 47(3) 2007, 427–438.
- [Ger07] GERMANEAU, A., DOUMALIN, P. AND DUPRE, J. C.
3D strain field measurement by correlation of volume images using scattered light: Recording of images
and choice of marks,
Strain 43(3) 2007, 207–218.
- [Kli2016] VAN DER KLIFT, F.; KOGA, Y.; TODOROKI, A.; MASAHITO, U.; HIRANO, Y. & MATSUZAKI,
R.
3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens,
Open Journal of Composite Materials, 2016, 6, 18-27
- [Mai12] MAIRE, E.
X-Ray tomography applied to the characterization of highly porous materials.
Annual Review of Materials Research 42 (2012), 163–178
- [Nam2014] NAMIKI, M.; UEDA, M.; TODOROKI, A.; HIRANO, Y. AND MATSUZAKI, R.
3D Printing of Continuous Fibre Reinforced Plastic, Proceedings of the Society of the Advancement of
Material and Process Engineering 2014, Seattle, 2-5 June 2014, 6
- [Rob2015] ROBERSON, D.; SHEMELYA, C.; MACDONALD, E. & WICKER, R.
Expanding the applicability of FDM-type technologies through materials development,
Rapid Prototyping Journal, 2015, 21, 137-143
- [Sch12] SCHLIMPER, R.; SCHLADITZ, K.; LADISCH, S.; SCHAEUBLE, R.
Mechanical in situ testing of closed cell rigid polymer foams via computed tomography,
Proceedings of CELLMAT 2012, Dresden, 07-09 Nov. 2012
- [Sch15] SCHLIMPER, R.; VECCHIO, I.; SCHLADITZ, K. & SCHAEUBLE, R.
RVE Modelling of Deformation and Failure Behaviour of Closed Cell Rigid Polymer,
Foams.
Proceedings of 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 2015

Journal of Materials Science 37 (2002), 1547–1555

[Tod06] TODA, H.; KOBAYASHI, T.; NIINOMI, M.; OHGAKI, T.; KOBAYASHI, M.;
KURODA, N.; AKAHORI, T.; UESUGI, K.; MAKII, K.; ARUGA, Y.:

Quantitative assessment of microstructure and its effects on compression behavior of aluminum foams
via high-resolution synchrotron X-ray tomography.

Metallurgical and Materials Transactions A 37 (2006), 1211–1219

3.7 Abbildungen

Abbildung 1:

Aufbau der Probenwürfel mit Lage der Faserebenen und hexagonaler Füllstruktur

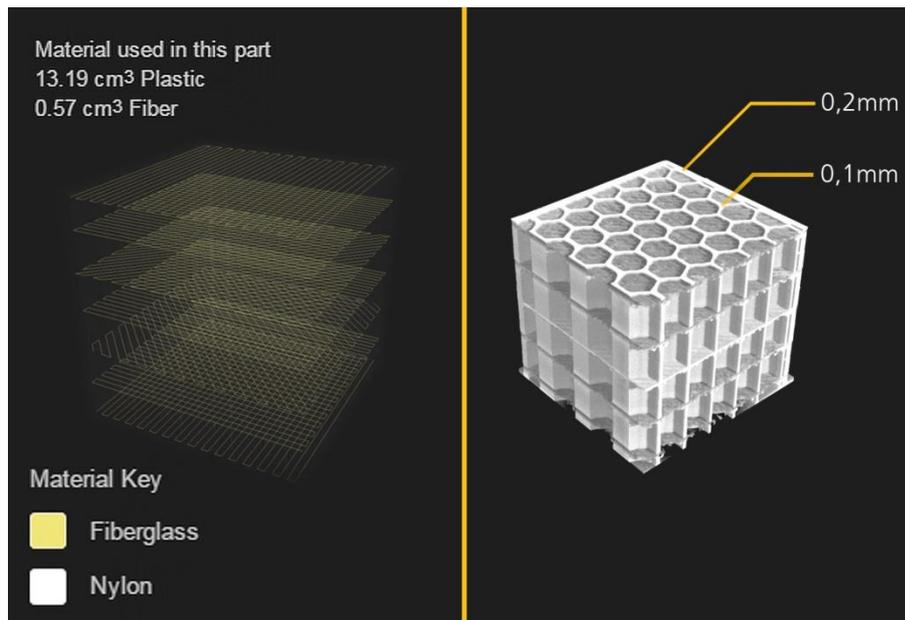


Abbildung 2:

Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Probe 2 im Druckversuch

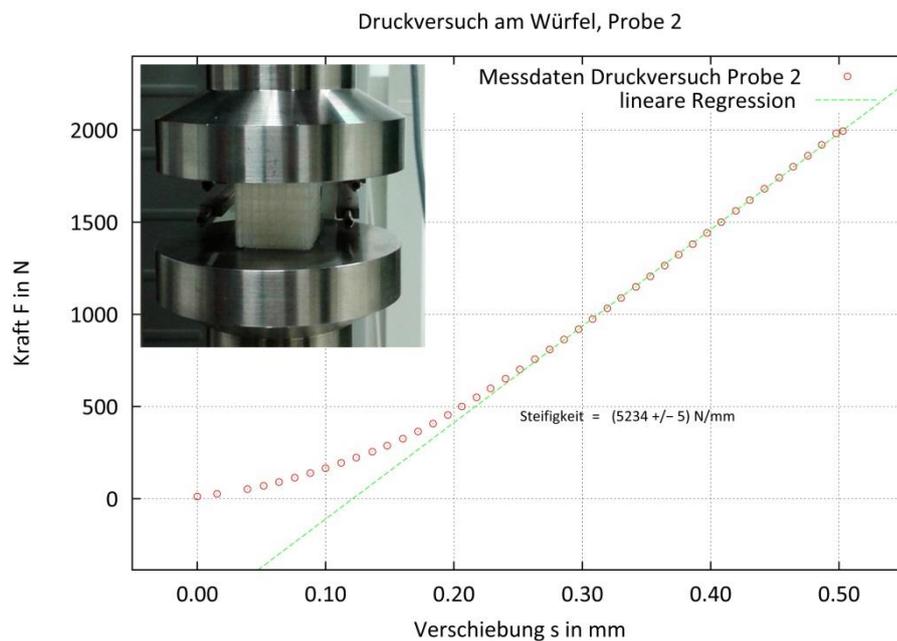


Abbildung 3:
Messaufbau zur CT-In-Situ-Druckprüfung, Zylindrische Prüfeinrichtung aus CFK-Material für optimale Durchstrahlung

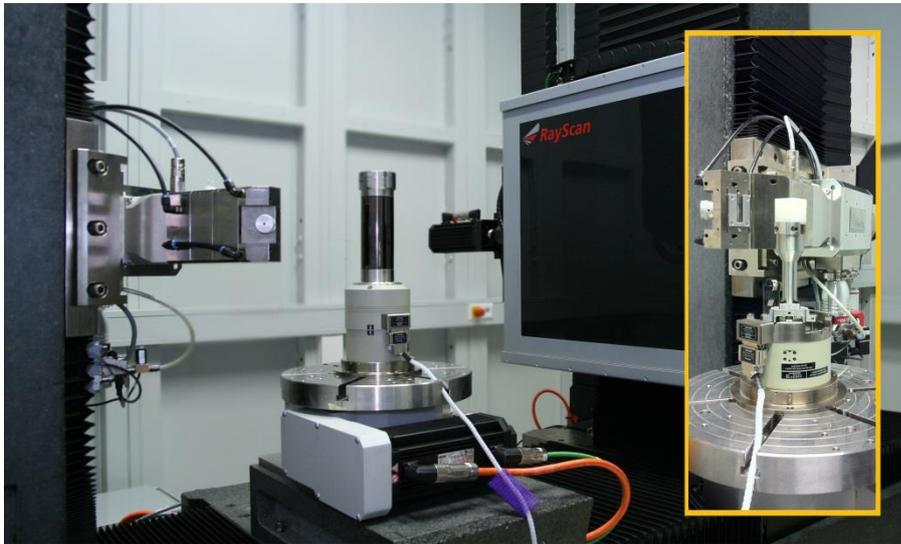


Abbildung 4:
Darstellung der Lage der Glasfaserebenen im Vergleich aus DVK und orts aufgelöster Bestimmung aus CT-Daten in Abhängigkeit vom Belastungsschritt

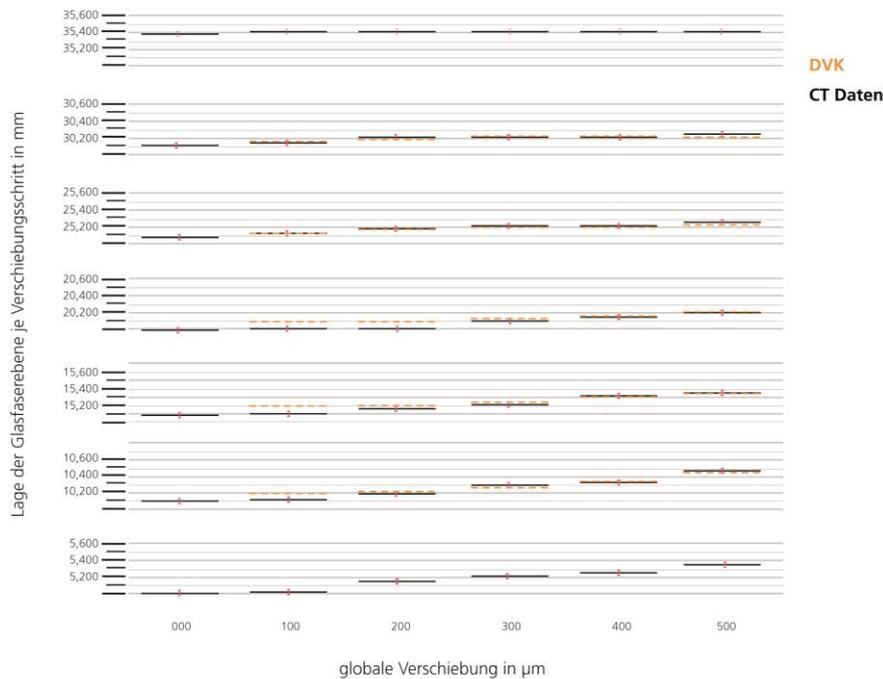


Abbildung 5:

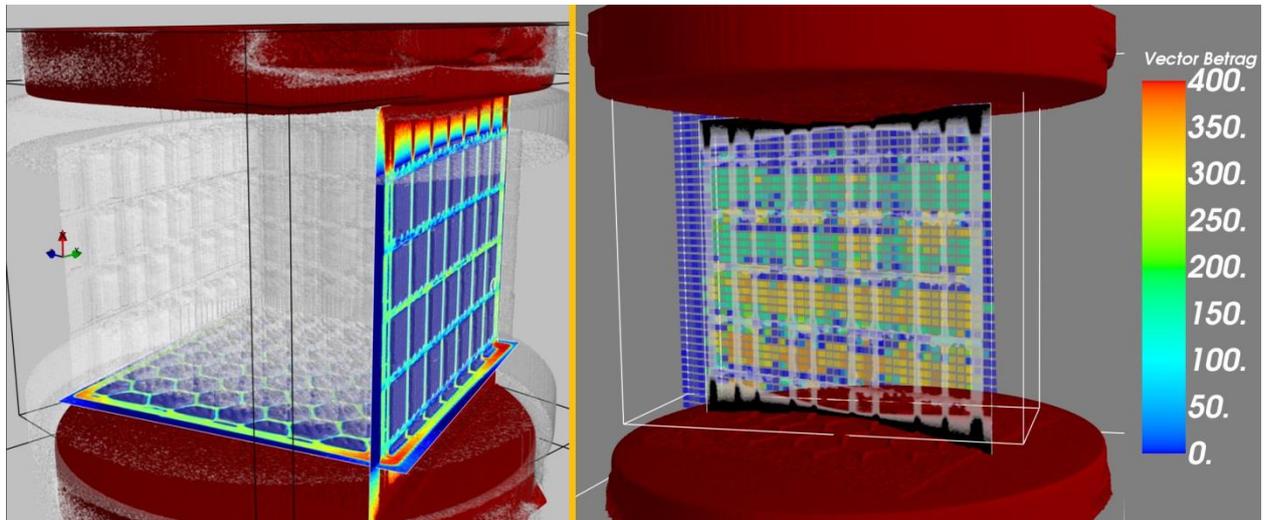
linkes Bild:

Abbildung der Mikrostruktur des Probenwürfels durch die Signalintensität der CT-Daten

rechtes Bild:

Betrag der Verschiebung der Volumenelemente in einer Schnittebene in

Belastungsrichtung in μm



Industrielle Additive Fertigung: Kunststofflasersintern als Produktionszweig Industrial additive manufacturing: plastic laser sintering as branch of production

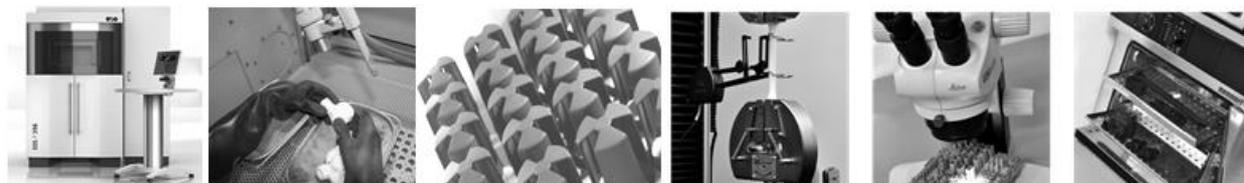
Ingrid Prestien
CIPRES Technology Systems

Langfassung

EINLEITUNG

Die Additive Fertigung beziehungsweise der 3D-Druck ist wohl die erfolgreichste Technologie, die sich so schnell auf dem Fertigungsmarkt durchsetzt. Dieses Verfahren ist nicht branchenabhängig und kann fast überall eingesetzt werden, ob in der Raumfahrt oder in der Konditorei, bei der Herstellung von Brillengestellen oder beim Hausbau, es gibt kaum eine Einschränkung bei der Verwendungsart. Das macht dieses Verfahren unter anderem so interessant.

In diesem Vortrag geht es darum, die industrielle Serienfertigung von Kunststoffteilen mittels Additiver Fertigung mit all ihren Vor- und Nachteilen zu präsentieren. Gibt es tatsächlich eine wirtschaftliche Chargenproduktion? Wie sieht heute eine industrielle Fertigung aus? Wie sollte sie in der Zukunft aussehen?



I. Was macht diese Technology so interessant?

Diese Technology bietet nicht nur die gestalterischen Freiheiten mit optimierten Baustrukturen und Oberflächen sondern auch ein enormes Einsparpotenzial bei kleinen und mittleren Stückzahlen. Ob Prototypen oder Serienfertigung – immer mehr Unternehmen nutzen das, um ihre Produkte schnell, individuell und kostenoptimiert herzustellen. Die kurze Produktionszeit von kleinen Serien von ca. 9 – 11 Arbeitstagen macht diese Fertigung hoch unschlagbar.

II. Ist ein industrieller Standard möglich?

Ein industrieller Standard ist möglich, wird aber erst erreicht, wenn Reproduzierbarkeit und Qualität durch Maßhaltigkeit, Homogenität, Dichte und Festigkeit des Materials im Verhältnis stehen. Dies ist aber nur möglich, wenn das Verfahren absolut beherrscht wird. Durch die Kombination verschiedener Fertigungstechniken wird nicht nur ein hochwertiges Bauteil, sondern auch ein reproduzierbares und hochqualitatives Produkt erstellt.

Eine ausführliche Beratung zur Nutzung der Möglichkeiten der Additiven Fertigung ist ein Muss und geht nur über die verfahrensgerechte Konstruktion von Bauteilen, unter Berücksichtigung der Entwicklungs- und Konstruktionsparameter bis hin zu deren Serienfertigung. Hierbei werden Produkteigenschaften genau spezifiziert und müssen sogar garantiert werden.

Was die Oberflächenqualität angeht: Im Regelfall ist die verkaufsfertige Produktqualität erst durch Nachbearbeitung bzw. Veredlung von 3D-Rohlingen mittels Gleitschliff, Politur und Kolorierung erreichbar. Wobei das Färben von Kunststoff-Lasersinterteilen der Hauptschlüssel für die erfolgreiche Fertigung ist. Die Farbe muss beständig gegen Licht und UV-Strahlung, Wasser und Abrieb sein. Auch Schweiß sollte die Farbe nicht angreifen und frei von Allergenen sein, was bei Brillen und Schmuck ein „Muss“ ist.



Dies verlangt viele Erfahrungswerte und qualifizierte Mitarbeiter die kaum auf dem Markt zu finden sind, weshalb solche Fertigungen zurzeit nur bei hochqualifizierten Dienstleistern möglich ist. Um alle diese Qualitätsmerkmale zu gewährleisten ist es auch erforderlich, nicht nur die Maschinen zu beherrschen sondern entsprechend diese zu modifizieren. CIPRES hat im Laufe der Jahre ihre Maschinen angepasst, ist auf diese Herausforderungen eingegangen und gilt europaweit als Richtungsweiser für die Serienherstellung von farbigen Kunststoff-Lasersinterteilen.

Gerade in der Brillenindustrie, wird in den letzten Jahren vermehrt auf lasergesinterte Brillengestelle gesetzt, da die Modelle in kürzester Zeit geändert und die Farben dem Trend angepasst werden können. In 2015 sind schätzungsweise 90.000 Brillengestelle mittels Lasersintern hergestellt worden.

III. Welche Argumente (ver)föhren dazu dieses Verfahren zu nutzen?

Brillengestelle sind zurzeit die meist produzierten Kunststoff-SLS-Objekte in Europa. Fassungen sind wie maßgeschneidert für die Additive Manufaktur und helfen uns daher als gutes Beispiel um diese Frage zu beantworten. Deshalb haben sich Brillenhersteller wie Bellinger, ic-berlin, Hoet, Monoqool, MYKITA usw. dafür entschieden, diese Fertigungsmethode zu nutzen.

Diese Frage wird uns öfters gestellt: Warum werden Brillengestelle mittels SLS hergestellt, wenn das Spritzgießen günstiger ist? Beim tieferen Einblick in die

Herstellung von Brillenrahmen wird schnell klar, warum das SLS-Verfahren so interessant für diese Hersteller ist.



Bildquelle : pq eyewear Ron Arad



Mykita Mylon
Bildquelle: www.Mykita.com



Meyer
Bildquelle:www.meyer-eyewear.de

Eine Spritzgussbrille ist bei Brillen-Manufakturen verpönt und gilt als Billigprodukt, gestalterisch unflexibel und das Material erfüllt nicht den gewünschten Tragekomfort - ist vergleichbar wie „Gummistiefel“ tragen.

Die Herstellung von Brillenfassungen ist trotz Automatisierung sehr aufwendig. Um ein qualitativ hochwertiges Brillengestell herzustellen sind ca. fünfzig und mehr Arbeitsschritte notwendig - ob Kunststoff, Holz, Acetat oder Metall; ohne die Herstellung des Materials zu berücksichtigen.

Die Mehrheit der Brillenfassungen wird mit Präzisionsmaschinen und individuell gefertigten Werkzeugen aus Platten ausgefräst. Die Frontpartie sowie die Brillenbügel werden mehrstufig bearbeitet: geschnitten, gestanzt, erhitzt, gebogen, gefräst und gewölbt. Zusätzlich, neben automatischer Politur z.B. Gleitschliff (7-10 Tage), werden auch Brillenfassungen immer noch von Hand poliert.

Zum Werkstoff: Acetat ist das Material das am häufigsten zur Manufaktur von Brillenfassungen verwendet wird. Der Werkstoff ist in dieser Branche allgemein schon seit langem mehr als etabliert, aber die wenigsten wissen, dass es sich bei Acetat um eine Naturfaser (Baumwolle) handelt und die Herstellung sehr aufwendig ist.

Hier nur ein kurzer Einblick zur Herstellung von Acetat: Es wird weißes Baumwollpulver mit Alkohol und Aceton stundenlang gerührt, nach bestimmten Rezepturen werden die Farben beigemengt. Dieser Teig wird anschließend mit Zylindern zu Platten gewalzt und zu Blöcken gepresst. Ab hier beginnt die kreative Arbeit mit vielen Arbeitsschritten. Aus den Blöcken werden Platten verschiedenster Stärke geschnitten. Diese Platten werden übereinander gelegt und mit Druck und Wärme gepresst. So entsteht ein neuer Block usw. Dieser Vorgang wird bis hin zum gewünschten Muster wiederholt. Diese Farbeinlegetechniken sind sehr aufwendig. Eine echte Handarbeit mit akkurater Handfärbung für eine präzise Oberflächenqualität. Ohne Zweifel ist das Ergebnis beachtlich.

Hinzu kommt, eine echte Herausforderung für die Brillenhersteller, die Scharnierproblematik (ausgeleierte Bügel, Verlust der Schraubchen), die zweidimensional beweglichen Pads (nicht passkonform, Druckstellen) und der Einkauf auf Vorrat von Platten in hohen Mengen, auch wenn nicht klar ist, ob die gewählte Farbe ein Trend wird.

Mit dieser Erklärung wird erst klar, welcher Aufwand die Herstellung von Fronten bedeutet.

Mit Lasersintern fallen deutlich viele Arbeitsschritte weg. Keine mehrstufige Bearbeitung mehr. Kein: Schneiden, Stanzen, Erhitzen, Biegen, Fräsen und Wölben. Alle diese Schritte können bereits in der 3D-Konstruktion berücksichtigt werden und der Fantasie stehen fast keine Einschränkungen mehr im Weg. Die Scharnierproblematik (keine Schrauben) oder die Druckstellen der Pads, können auch geschickt mit genialen Konstruktionslösungen bei der 3D-Zeichnung integriert werden. Die Gestaltungsfreiheit ist sicherlich das Hauptargument für dieses Verfahren.

Die lasergesinterten Brillenfassungen schaffen neue Design-Dimensionen, sind sehr leicht, flexibel und können biokompatibel hergestellt werden. Dies revolutioniert die Welt der Brillen. Das SLS-Material ist für den Brillenträger durch ihre Leichtigkeit kaum zu spüren und der Werkstoff garantiert einen unvergleichbaren Tragekomfort. Durch ihre thermischen und mechanischen Eigenschaften besitzen die Polyamide den gewünschten "Memory-Effekt" sowie die Formstabilität.

Aufgrund der kurzen Produktionszeit beim Lasersintern ist der Kunde nicht gezwungen große Vorräte zu lagern und kann schnell nach Bedarf produzieren und spart immense Kosten. Dagegen steht das SLS-Material sofort zur Verfügung. Das Produkt ist bei der Herstellung in Naturfarbe Weiß und kann nachträglich koloriert und die Gestelle nach Farbtrends und Absatz hergestellt werden. Hierbei entsteht ein echter „Color on Demand“, was erhebliche Lagerkosten spart und nur das was bestellt worden ist auch gefertigt wird. Ein netter Nebeneffekt ist auch, dass die Tendenz der Trendfarbe nachgegangen werden kann und man nicht auf Vorräten sitzen bleibt.

Aktuell ist zu beobachten, dass zunehmend viele etablierte Hersteller diverse Branchen ausloten, welche Möglichkeiten und Risiken in der vergleichsweise jungen Technologie für ihr Produktportfolio stecken. Einzelne wagen sich bereits an absatzfähige Produkte (siehe „Tabakpfeife“ in Fallstudie).



Mit Hilfe kolorierter 3D-Erzeugnisse können neue Märkte erschlossen werden, vor allem von kleinen, innovativen Unternehmen und Start-Ups bzw. Nischenanbietern mit limitierten Stückzahlen (Designerlabels). Diesen kommt der vergleichsweise geringe Aufwand gegenüber Massenprodukten und deren Herstellungsverfahren im 3D-Druck mit „color finishing“ extrem entgegen.

In dem Maße, wie sich dieser Trend verstärkt, wächst daraus für die Hersteller von Massenware das Risiko; denn was heute innovative Trendsetter sind, könnten morgen ernstzunehmende Wettbewerber sein.

IV. Entscheidungskriterien um SLS als Produktionszweig zu nutzen

Industrielle Fertigung mittels Lasersintern ist vorab nur für kleine Serien möglich. Ab einer bestimmten Losgröße ist dieses Verfahren zurzeit kostenintensiv.

Auch nicht jede Kleinserie kann mit Lasersintern kostengünstig abgedeckt werden. Folgende Produktkategorien die sich hierfür gut eignen:

- Faustgroße Objekte, die bei der Herstellung mit herkömmlichen Verfahrenstechniken aufwendiger sind als SLS, z.B. Brillenfassungen.
- Produkte die aus mehreren Baugruppen bestehen und kurzfristig Neuentwicklungen durchleben, z.B. Case Studie EyeSeeCam.
- Alle Kleinserien, die nicht anders herstellbar sind, z.B. Case Studie Pfeife Vauen
- Limitierte Stückzahlen – Designerlabels
- Nullserien
- Personalisierte Fertigung durch steigende Nachfrage an Individualität

Primär geht es dabei darum Kunden für Serienteile zu gewinnen.

Die Individualisierung von Endprodukten ist ideal für Konsumgüter wie Brillen, Schmuck, Accessoires, Lampen, Vasen, Tassen, Kleider, Schuhe, Hüte und noch vieles mehr. „Mass customized“ ist kompromisslos nur mit gefärbten Lasersinterteilen möglich. Der Trend zur Individualität wird sich damit weiterentwickeln. Es geht nicht mehr nur um Abgrenzung und Differenzierung, sondern um eine bestimmte Haltung, die man kommunizieren möchte.

In letzter Zeit entdeckt auch die Medizinbranche die Vorteile der Technologie. So entstehen individuell angepasste Labor- und Messgeräte heute bereits in 3D-Druckern. Zwar steckt die Branche in vielen Bereichen noch in den Kinderschuhen. Doch Forscher und Entwickler sehen hier großes Potenzial.

Aus Herstellersicht ist das Kolorieren von Sinterrohlingen zunächst eine bezahlbare Produktionsergänzung, die das Anwendungs- und –Absatzpotenzial drastisch erhöht. Zu gewährleisten ist, dass sich die geometrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften des Sinterteils nicht durch den Farbauftrag verändern. Wesentliche Qualitätsparameter sind darüber hinaus Licht-, Wasser- sowie Abriebbeständigkeit. Bei Gebrauchsgegenständen (z.B. Teller, Trinkbecher) sind auch Lebensmittelechtheit und chemische Beständigkeit zu gewährleisten (z. B. Spülmaschinenfestigkeit), sowie bei Produkten in häufigem oder ständigem Körperkontakt (z. B. Schmuck, Brillen etc.), Biokompatibilität und Schweißbeständigkeit.

V. Wie sieht die Zukunft der industriellen Additiven Fertigung aus?

Derzeit sieht es so aus, als könne der 3D-Druck die Produktionstechnologie des 21. Jahrhunderts werden. Es ist eine relativ neue Technologie. Experten gehen davon aus,

dass sie im Laufe der nächsten Jahre noch erheblich weiterentwickelt und dadurch besser, günstiger und vielfältiger einsetzbar wird.

Zukunftsvisionen reichen vom kleinen dreidimensionalen Drucker auf dem Schreibtisch bis hin zu Anlagen, die ein ganzes Haus „drucken“ können. Mit traditioneller Massenproduktion kann 3D-Druck wirtschaftlich bislang noch nicht konkurrieren. Allerdings ist die Technologie im Begriff, eine wichtige Basis für die Kleinserienproduktion zu werden. Außerdem wird man immer häufiger „Losgröße 1“ hören.

Viele Analysten zeichnen eine rosige Zukunft für die 3D-Drucktechnik. Das Marktforschungsunternehmen Canalys rechnet bis 2018 mit einem jährlichen Umsatzwachstum von rund 45 Prozent weltweit. 2013 waren es nach Angaben der Analysten 2,5 Milliarden US-Dollar, 2018 sollen es schon 16 Milliarden Dollar sein. Ray Kurzweil, Leiter der technischen Entwicklung bei Google, rechnet damit, dass die Technik in fünf Jahren einen Paradigmenwechsel auslösen kann. Seiner Einschätzung nach, könnte es in den 2020er Jahren zur Normalität gehören, sich etwa 3D-Modelle seiner Lieblingskleidung am Computer herunterzuladen und dann über den Drucker auszugeben.

Unter verschiedenen erprobten 3D-Druck-Verfahren, hat sich das generative Lasersintern als diejenige Technologie herauskristallisiert, die uns der Kleinserienproduktion am nächsten bringt. Es ist daher zu erwarten, dass sich das Lasersintern jetzt als Produktionszweig etabliert.

Allerdings beschränkt sich die Anforderung an das fertige Lasersinterteil nicht nur darauf, dass es am Ende das Erscheinungsbild des gewünschten Endprodukts hat. Es muss auch über alle „inneren Werte“ verfügen, d. h. alle verlangten Eigenschaften vorweisen.

Die Möglichkeiten des generativen Lasersinterns sind derzeit begrenzt auf die Exaktheit der Geometrie des jeweiligen Werkstücks und dessen Materialeigenschaften, aufgrund der verwendeten Rohstoffe und deren molekularen Veränderung durch das Sintern. Die Aufgabenstellung einer Kleinserienproduktion ist vor diesem Hintergrund vor allem eine Herausforderung an die Postproduktion.

SCHLUSSWORT

Dieses Fertigungsverfahren erhöht nicht nur die Freiräume der Produktentwickler, sondern auch neue Wege für Produkte die vorher nicht möglich waren.

Sie eröffnet großen OEM-Herstellern aus unterschiedlichsten Industriezweigen die Möglichkeit, sich am Markt zu differenzieren – im Hinblick auf neue Kostenreduktionspotenziale, Kundennutzen oder zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen.

Die weitaus meisten Hersteller greifen in der Produktion von 3D-Teilen auf qualifizierte Dienstleister zurück. Nur wenige versuchen bereits die Verfahrenstechnik „in-house“ zu etablieren. Für Dienstleister der Additiven Fertigung liegt darin eine riesige Chance. Der Markt stellt sich als Wachstumsmarkt bzw. „Markt im Aufbruch“ dar. Veredlung von 3D-Rohlingen – insbesondere e-coloring – ist die Upgrade-Option für das nächste Level: Vom „Rapid Prototyper“ zum „Serienhersteller“.

Die Serienproduktion ist auch im 3D-Druck der Schlüssel, um Kosten zu senken bzw. Umsatz und Ertrag zu steigern. Zunehmend viele Dienstleister erkennen dies und akquirieren gezielt auf der einen Seite Kunden für endgebrauchsfertige bzw. –nahe Serien von 3D-Prints.

Case Studie

Diamond: Pfeife von Vauen



Diamond

Eine Lebenseinstellung von Menschen, die über den eigenen "Pfeifenrand" hinaussehen. Mit Ruhe und Überlegung, mit Freude an Kommunikation und Lebendigkeit bereichern Pfeifenliebhaber ihre Umgebung und beteiligen sich aktiv am Zeitgeschehen. Genau das, ist das Ziel: „Das volle Potenzial des 3D-Drucks zu nutzen“.

Produktinformationen

Designer	Vauen / Alexander Eckert
Anbieter	VAUEN Vereinigte Pfeifenfabriken Nürnberg GmbH
Herkunft	Nürnberg, Deutschland
Material	PA2200 + 30 % Keramik
Finishing	Glasperlengestrahlt Koloriert Thermochemisch behandelt Poliert
Veröffentlichung	Ende 2014
Made in	Germany
Produktart	Pfeife

Marktidee: Trend Produktion / Pfeifen auf Kundenwunsch und Marktnachfrage herstellen

Vorteile: Print in Germany / Geringe Produktionskosten / Einen Markttrend folgen / Verrückte Farben für extravagante Pfeifenliebhaber

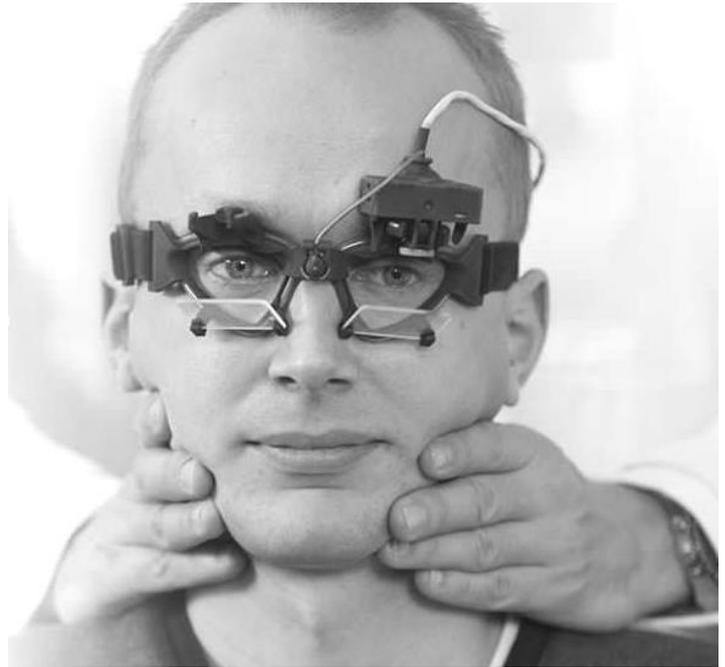
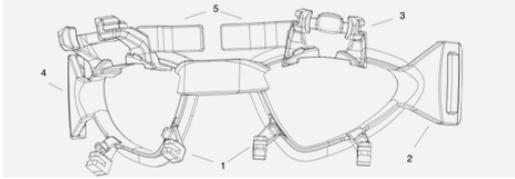
Markeinführung Ende 2014

Preis: ca. EUR 250,--

Bemerkung: Alexander Eckert ist durch den Brillen-Hersteller Mykita inspiriert

Bildquelle: www.Vauen.com

EyeSeeCam: Kopf-Impuls-Test Brille



EyeSeeCam

Dieses System ist in Schwindel-Ambulanzen im Einsatz.

Die Brille wird dem Patienten aufgesetzt und der Kopf-Impuls-Test mittels einer integrierten Infrarot-Kamera und Beschleunigungssensoren aufgezeichnet, quantifiziert und graphisch dargestellt.

Das Ziel: „Das volle Potenzial des 3D-Drucks zu nutzen“.

Produktinformationen

Designer	Dr. Schneider University of Munich Hospital
Hersteller	Interacoustics
Herkunft	Deutschland
Material	PA2200 Glasperlengestrahlt Koloriert Thermochemisch behandelt Poliert
Finishing	
Veröffentlicht	2008
Made in	Germany
Anwender	Krankenhäuser / Ärzte

Marktidee: Medizinische Lösung

Vorteile: Geringe Produktionskosten / Schnelle Produktänderung durch Innovationen

Herstellungsmenge: ca. 30 - 100 Brillen pro Jahr

Bemerkung: Das Produkt ist schon länger auf dem Markt. In dieser Zeit wurden über 120 verschiedene Änderungen am Produkt, bestehend aus mehreren Komponenten durchgeführt. Somit wurden großen Summen an Werkzeugkosten gespart. Deshalb ist die Herstellung mit SLS die einzige kostengünstige Produktionsmethode. Lackieren kam nach einer gewissen Zeit nicht mehr in Frage, durch das Kolorieren wurden viele Probleme gelöst und das Erscheinungsbild erheblich verbessert.

Bildquelle: Dr. Schneider, University of Munich Hospital

Part 2:

Trade Forum “Science“

Aufbauratensteigerung mittels High-Power Selective Laser Melting für den Werkstoff Ti6Al4V

Increasing the build-up rate by High Power Selective Laser Melting for Ti6Al4V

Dipl.-Ing. Maximilian Schniedenharn¹, Dr. Qianchu Liu²

¹Fraunhofer Institute for Laser Technology; ²Defence Science and Technology Group Australia

1 Kurzfassung

Um das additive Fertigungsverfahren Selective Laser Melting zur Serienreife weiterzuentwickeln, muss unter anderem die Aufbaurrate (umgeschmolzenes Material pro Zeit) erhöht werden. In diesem Vortrag wird dazu das Hülle-Kern Verfahren mit Laserleistung bis zu 1kW für die Fertigung von Bauteilen aus Ti-6Al-4V vorgestellt. Bei diesem Verfahren wird der Kern des Bauteils mit einem Laserstrahldurchmesser von ca. 800µm und einer Schichtdicke von 90µm belichtet. Um die Oberflächenqualität nicht negativ zu beeinflussen, wird für die Hülle weiterhin ein Standardparametersatz verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass ein High-Power SLM Prozess mit Ti-6Al-4V geeignet ist, um Bauteile mit einer Dichte von >99,5% bei gleichzeitiger signifikanter Steigerung der Aufbaurrate herzustellen.

2 Short Abstract

In order to make Selective Laser Melting ready for series production, its production rate (molten material per time unit), amongst other factors, has to be increased. In the present work, a high power laser (1000 W) is used for manufacturing a Ti6Al4V specimen with varying process parameters (scan speed, layer thickness and hatch distance) based on the skin-core strategy. A suitable processing parameter window which yields a part density of > 99.5% is identified for Ti6Al4V specimens at the given laser power. Manufacturing defects (porosity and lack of fusion) are investigated and their effect on relative material density is discussed. The results show that high power SLM can fabricate highly dense Ti6Al4V parts with a significantly increased production rate in comparison to conventional SLM.

3 Introduction

Additive powder bed-based manufacturing technology enables the production of parts with an almost infinite freedom of design. Since this technology adds material layer by layer instead of removing it from wrought material, it is of special interest where lightweight parts need to be made from expensive materials.

Today, the energy sources used to melt the material are either provided by an electron- or a laser beam; the corresponding additive processes are hereafter referred to as Electron Beam Melting (EBM) or Selective Laser Melting (SLM). In the former process, the electron beam is deflected by an electric field, while in the latter, the laser beam is deflected by galvanometer-driven mirrors, which makes the deflection of a laser beam slower by a magnitude because of the mirrors' mass. An important figure of any production technology is the time it takes to produce a part from scratch. For additive technologies a commonly used approach to compare the processing speed is the theoretical volume build-up rate (molten volume per time unit) $\dot{V}_{process}$:

$$\dot{V}_{process} = D_s \cdot v_s \cdot \Delta y_s , \quad [1] \text{ 3-1}$$

where D_s is the layer thickness [μm], v_s is the scanning speed [mm/s] and Δy_s is the scan line spacing. The volume energy E_V allows for the prediction a single parameter when the others are known:

$$E_V = \frac{P_L}{D_s \cdot v_s \cdot \Delta y_s} = \frac{P_L}{\dot{V}_{process}} , \quad [1] \text{ 3-2}$$

where P_L is the laser power [W]. In order to increase the build-up rate according to equation [1] 3-1, one or more of the parameters have to be increased. When the laser power is kept at a constant level, the increase of the volume build-up rate leads to a decrease in volume energy. However, if the volume energy reaches a material-specific bottom line, the resulting part density decreases as well. One way to overcome this obstacle is to increase the laser power. When this is done and the laser's spot size is kept constant, the intensity increases at the point of processing, leading to a higher evaporation and splatter rate and, thus, reducing the part's density [2].

For the production of Ti6Al4V components, the theoretical build-up rate for EBM can reach up to $50 \text{ mm}^3/\text{s}$ [3], while the build-up rate for SLM is about $3\text{-}5 \text{ mm}^3/\text{s}$ [4]. The difference is caused by a much faster scanning rate in combination with a higher layer thickness for EBM processes. This, however, reduces the surface quality of EBM parts in comparison to those from SLM.

In order to speed up the SLM process, two methods have emerged: use of multiple laser/scanners and high-power (HP) laser systems. The use of two or more laser/scanner systems enables the building chamber to be upscaled without slowing down the process; to achieve this, the scanners are aligned in such a way that each scanner covers an individual scanning field with a slight overlap to the adjacent one. The processing parameters have to be adapted very little or not at all when a multiple scanner SLM system is set up, but it is difficult to align the individual scanning fields correctly. The resulting theoretical build-up rate will always be the product of the number of laser/scanner systems multiplied by the initial build-up rate.

When the laser power is increased, the processing parameters have to be adapted as well. The use of a HP SLM system will be discussed in the next chapter.

3.1 High-Power Selective Laser Melting

When the laser power is increased up to a material-specific value, it is necessary to increase the beam spot size as well in order to avoid excessive evaporation of the material. A larger beam size in combination with an increased laser power will lead to larger melt pools which, in turn, will impair the surface quality [1]. On the other hand, larger melt pools enable the use of larger layer thickness and scan-line spacing, which result in a higher build-up rate while keeping the volume energy and, thus, the part density at a constant level.

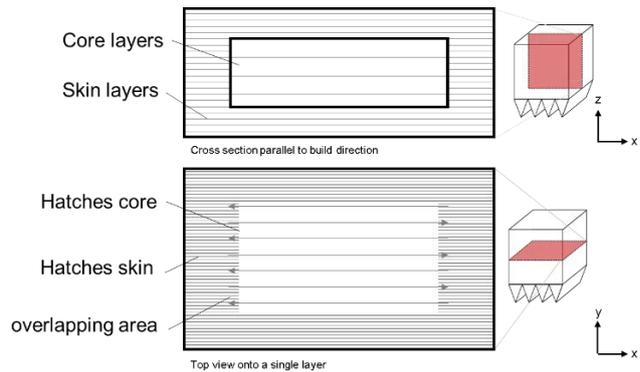


Figure 3-1: Illustration of skin-core layers (top) and hatching (bottom)

By dividing the scanning area into an inner core, which is scanned by a high-power laser (larger layer thickness and scan line spacing, adapted scanning speed), and an outer hull, which is scanned by a standard-powered laser, typical SLM surface roughness values can be achieved while simultaneously increasing the build-up rate. Figure 3-1 illustrates the layout of the scanning vectors and layer thickness, which is called the "Skin-Core" strategy.

The scope of this work is to identify a suitable processing window for the fabrication of Ti6Al4V with an HP SLM system, thereby increasing the volume build-up rate using a single scanner system. Furthermore, the governing types of defects, the resulting mechanical properties as well as deformation of the as-built samples are discussed.

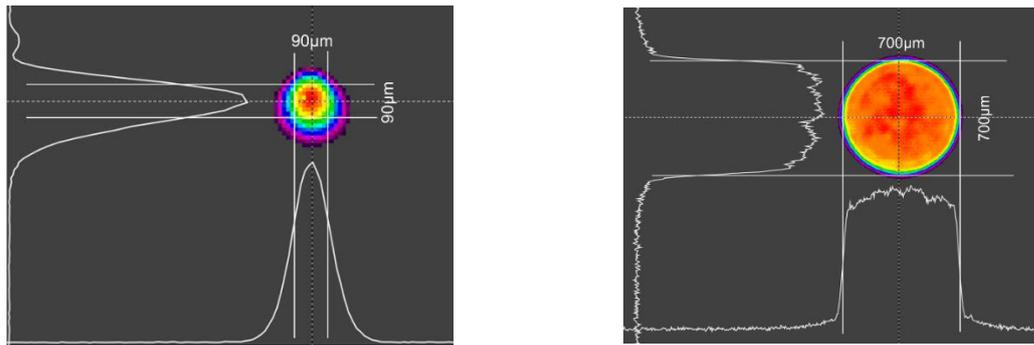
4 Experimental Setup

4.1 Equipment

The machine used is a 280HL by SLM Solutions. It is equipped with two separate lasers, and a beam switch that enables the use of both lasers through the same optics (IntelliScan25 scanner, VarioScan focusing unit by Scanlab) during the process. The properties of the lasers are shown in Table 1.

Table 1: Fraunhofer ILT SLM280HL laser properties

	Laser 1	Laser 2
Type	Single mode Nd:YAG	Multimode Nd:YAG
Maximum Output Power	400W	2000W
Wavelength	1070nm	1070nm
Spot size	90µm	700µm



a) Intensity distribution in focal plane 200W b) Intensity distribution in focal plane 1000W

Figure 4-1: Laser intensity distribution within focal plane (not to scale)

In order to minimize thermal lensing effects, optics made of fused-silica glass were used in the optical path. Figure 4-1 shows the intensity distribution of the standard (left) and HP (right) system in the focal plane. The standard laser system has a Gaussian intensity distribution with a minimal spot size of 90 μm, while the HP system has a top-hat intensity distribution with a minimal spot size of 700 μm.

4.2 Powder characteristics

The chemical analysis of the Ti6Al4V powder used (produced by TLS Technik GmbH) indicates that the powder is within the specification given by [5] (see Table 2).

Table 2: Chemical composition of used Ti6Al4V powder

Element	Measured values	DIN 17851 (min-max) [5]
Al	6.35%	5.50-6.75%
V	4.05%	3.50-4.50%
Fe	0.20%	-0.30%
C	0.003%	-0.08%
N	0.006%	-0.05%
O	0.14%	-0.20%
H	0.002%	-0.015%
Ti	remaining	remaining

Figure 4-2 shows the volume-weighted distribution as well as an SEM image of the powder particles. The volume-weighted distribution is measured using a Morphologi G3 by Malvern Instruments. The measurement is based on an array of images taken by an automated microscope. In order to filter overlapping particles, a solidity filter with a value of 0.958 is used. The SEM used is a LEO 1455VP, and in order to reduce electrical charging, the particles are spread onto an electrically conductive adhesive plate. The powder is spherical with few spattered particles. Cross sections do not reveal internal pores within the powder.