

Wissenschaft und Forschung zur additiven Fertigung an der Hochschule Mittweida

Hagen Bankwitz, Jörg Hübler, Claudius Petzold
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Additive Fertigung, auch generische Fertigung oder 3D-Druck, ist eine der Schlüsseltechnologien der nächsten Jahre bzw. Jahrzehnte. Sie findet dort Anwendung, wo konventionelle Fertigungstechnologien an ihre Grenzen stoßen, wo nur kleine Stückzahlen oder kostenintensive Materialien benötigt werden. Diesem Thema widmet sich auch die Hochschule Mittweida seit vielen Jahren in Lehre und Forschung. Einen kurzen Überblick über die erzielten Forschungsergebnisse in den Bereichen Lasermikrosintern, Selective Laser (Micro) Melting, (Hochrate) Micro Cladding, Laserauftragschweißen, FDM-Druck (leitfähiger) Strukturen auf Textilien und Entwicklung eines Hochgeschwindigkeits-Rotationsdruckverfahrens soll dieser Beitrag geben.

1. Einleitung

Additive Fertigung, auch generische Fertigung oder 3D-Druck, ist eine der Schlüsseltechnologien der nächsten Jahre bzw. Jahrzehnte. Sie findet dort Anwendung, wo konventionelle Fertigungstechnologien an ihre Grenzen stoßen, wo nur kleine Stückzahlen oder kostenintensive Materialien benötigt werden. Vorteile dieser Technologie sind u. a. der ressourcen-schonende Einsatz des Materials, eine Gestaltungsfreiheit der zu fertigenden Bauteile mit nahezu keinen Einschränkungen, ein hochautomatisiertes Verfahren und eine hohe Flexibilität der Fertigung. Bei einigen Technologien sind auch unterschiedliche Materialien in einem Fertigungsschritt herstellbar. Die Herausforderungen die es noch zu lösen gilt sind u. a. die Erhöhung der Fertigungsgeschwindigkeit, Reduktion der Materialkosten und die Eliminierung der Nacharbeit bei manchen Technologien. Die Hochschule Mittweida widmet sich bereits seit Jahren diesem Thema in Forschung und Lehre. Durch Entwicklung neuer Technologien werden neue Anwendungen entwickelt und Probleme reduziert. Einige Beispiele der erzielten Forschungsergebnisse der letzten Jahre in diesen Bereichen soll dieser Beitrag geben.

2. FDM-Druck auf Textilien

Mit dem an der Hochschule entwickelten Verfahren, können mittels eines FDM-Druckers leitfähige thermoplastische Kunststoffe auf Textilien gedruckt werden. Mit diesen gedruckten Strukturen können z. B. Sensoren und einfache Schaltkreise hergestellt werden. Aufgrund der Elastizität der Textilien, ist die Fixierung des Textils auf dem Druckbett eine der Herausforderungen des Verfahrens, welche in einem Forschungsprojekt untersucht und eine optimale Lösung hinsichtlich der Druckqualität und der Unversehrtheit der Struktur des Textils gefunden wurde.

Weiterhin wurde die Haftung zwischen Textil und gedrucktem Kunststoff optimiert. Dies erfolgt durch Parameteroptimierung und aufbringen eines Haftvermittlers, welcher als zweite Komponente im 3D-Druck in das

Verfahren integriert wurde. Die Ablösekräfte der unterschiedlichen Varianten wurden mit dem Rollschälversuch ermittelt, vgl. Abbildung 1.

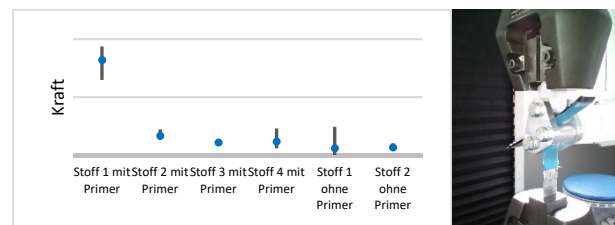


Abbildung 1: Haftkraftermittlung mittels Rollschälversuch

Für eine fehlerfreie Übertragung der Signale der gedruckten Sensoren oder Schaltkreise ist die Verbindung der im Textil befindlichen elektrischen Leiter mit den gedruckten Strukturen von großer Bedeutung. Sie beeinflusst die Störanfälligkeit, die Vibrationsfestigkeit und den Übergangswiderstand. Hierfür wurde ein optimaler Leiter im Projekt gefunden, mit dem es möglich ist Signale von gedruckten Sensoren zu Auswerteeinheiten zu übermitteln.

Im Weiteren wurden zwei Sensoren exemplarisch für das 3D-Druck-Verfahren entwickelt. Es können so z. B. einfache resistive Sensoren in einem Arbeitsgang hergestellt und mit den im Textil liegenden elektrischen Leitern kontaktiert werden. So wurde beispielsweise ein Temperatursensor entwickelt, der in einem Messbereich von bis zu 60°C funktionsfähig ist. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur ist in der Abbildung 2 dargestellt. Es ist ein nichtlinearer Verlauf zu sehen. Dieser kann allerdings sehr gut mit einem Polynom approximiert werden, sodass ein Bestimmtheitsmaß von über 99% erreicht werden kann.

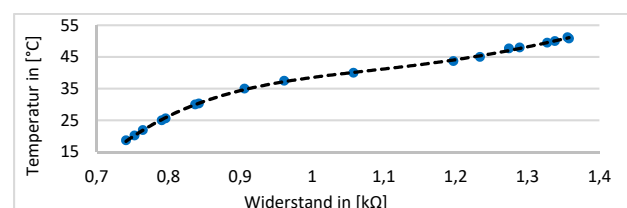


Abbildung 2: Temperatur-Widerstandsverlauf des gedruckten Sensors

Weiterhin wurde ein resistiver Berührungssensor, siehe Abbildung 3, für das Verfahren entwickelt und getestet, der als Schalter auf Textilien Anwendung finden kann.



Abbildung 3: gedruckter Berührungssensor [2]

In einem weiteren Projekt wird durch lokales aufbringen einer Schuppenstruktur auf ein Textil die Schutzwirkung gegen Stich und Schneideeinwirkung verbessert. Durch die FDM-Technologie kann diese Schutzstruktur individuell, je nach Kundenwunsch, auf das Textil aufgebracht werden. Während des Forschungsprojektes werden die Parameter der Fertigung optimiert und mögliche Materialien hinsichtlich ihrer Funktion untersucht.

Lasermikrosintern

Das Lasermikrosintern ist ein am Laserinstitut Hochschule Mittweida entwickeltes additives Fertigungsverfahren, was sich gegenüber den SLM-Verfahren durch einige Besonderheiten auszeichnet: Um sehr hohe Auflösungen von bis zu 15 µm zu erreichen, wird sowohl mit gepulster Laserstrahlung als auch mit sehr feinen Pulvern (Korngröße < 10 µm) gearbeitet, die mit einer neuartigen Ringrakel in verschiedenen Modifikationen aufgetragen werden. Dabei werden sehr kleine Schichtdicken bis unter 1 µm erreicht. Durch verschiedene Bearbeitungsstrategien kann die Materialdichte je nach Anwendungszweck im Bereich 40 % bis 99 % variiert werden, auch selektiv im Bauprozess. Es können sowohl Metalle als auch verschiedene keramische Materialien verarbeitet werden. Gemische in Form von Cermets sind ebenfalls in großer Vielfalt erzeugbar. Dadurch ergeben sich vielfältige Möglichkeiten zur Herstellung von Mikro-3D-Bauteilen, die anderweitig nicht herstellbar sind.

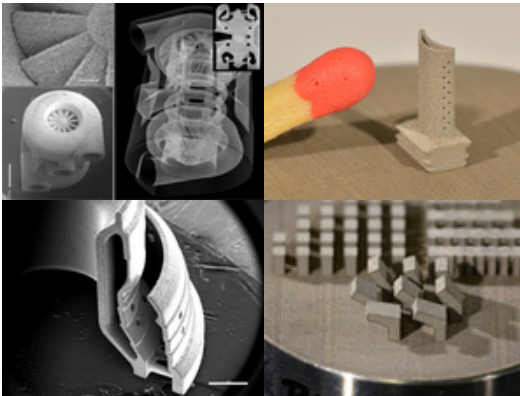


Abbildung 4: Anwendungsbeispiele Mikrosintern [3]
Selective Laser Micro Melting

Mikro-SLM ist ein pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren für die Herstellung von Mikrobauteilen

aus Metall. Das Verfahren basiert auf dem Prinzip des selektiven Laserstrahlschmelzens (engl. Selective Laser Melting – SLM oder Laser Powder Bed Fusion – L-PBF), jedoch mit einigen Besonderheiten. Dazu gehören die Verwendung von sehr feinen Pulvern mit Korngrößen < 10 µm, Fokusdurchmessern < 30 µm und einer Verdichtung des Pulvers mit einer eigens entwickelten Rakeleinheit. Durch die Anpassungen lassen sich maximale Strukturauflösungen lateral bis zu 40 µm und vertikal bis zu 5 µm erzielen. Des Weiteren weisen die Bauteile eine geringe Oberflächenrauheit von $Ra \leq 3 \mu m$ auf. Durch Nachbehandlungsschritte wären sogar Ra-Werte kleiner 1 µm möglich. Die bisher getesteten Metalle sind Edelstahl, Molybdän und Wolfram. Die Aufbauraten und damit auch die Produktivität sind aufgrund der höheren Strukturauflösung im Vergleich zum kommerziellen SLM jedoch deutlich geringer. Daher ist das Verfahren derzeit eher für Mikrobauteile geeignet, was sich im kleineren Bauraum widerspiegelt. Neuste Forschungen befassen sich daher auch mit der Steigerung der Produktivität. Hierzu wird die Laserleistung von wenigen 10 W auf mehrere 100 W erhöht. Um jedoch die hohen Laserleistungen im Mikrometerbereich umsetzen zu können bedarf es auch einer Erhöhung der Scangeschwindigkeit. Dafür kommt ein am Laserinstitut Hochschule Mittweida entwickelter Polygonspiegelscanner zum Einsatz. Während herkömmliche Scansysteme den Laserstrahl nur mit wenigen Metern pro Sekunde ablenken können, schafft der Polygonspiegelscanner über 1 Kilometer pro Sekunde. Erste Untersuchungen für die Verfahren Hochrate Mikro-SLM zeigten bereits, dass die Laserleistung ohne Verluste der Detailauflösung um das 10-fache gesteigert werden konnte. Mit der Steigerung der Laserleistung erhöht sich im fast gleichen Verhältnis auch die Produktivität, was zukünftig die Herstellung von Mikrobauteilen deutlich kostengünstiger macht. Durch die Steigerung der Produktivität wäre erstmals auch die Fertigung von größeren Bauteilen mit gesteigerter Detailauflösung wirtschaftlich realisierbar.

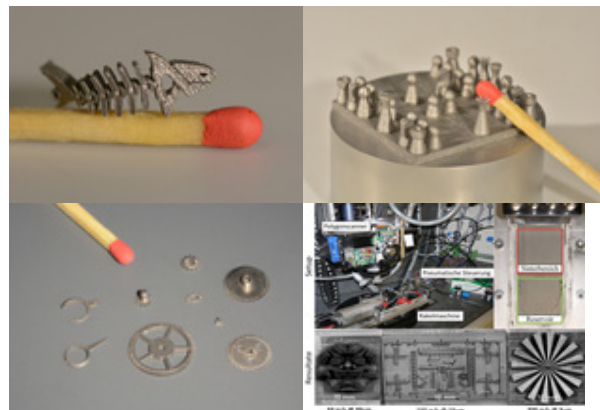


Abbildung 5: Anwendungsbeispiele Mikro-SLM [4]

(Hochrate) Micro Cladding

Micro Cladding ist eine Modifikation des klassischen Laser-Pulver-Auftragschweißens zum flexiblen Generieren

von Mikrostrukturen auf beliebig gekrümmten Oberflächen. Möglichkeiten zum Einsatz des Rapid-Micro-Verfahrens bieten sich vor allem in der Mikrosystemtechnik, z. B. zur Mikrostrukturierung und Texturierung von Oberflächen, bei der Reparatur bzw. Maßkorrektur von Mikroteilen oder beim Rapid-Microtooling.

Die Besonderheit der speziellen Verfahrensvariante Micro Cladding am Laserinstitut Hochschule Mittweida liegt in der Nutzung eines gepulsten Faserlasers in Verbindung mit einer schnellen Strahlablenkung. Das bietet den Vorteil den Energieeintrag im Mikrometerbereich gezielt zu steuern und die thermische Belastung des Substrates sowie der aufzutragenden Struktur gering zu halten. Für die Umsetzung der hohen Ablenkgeschwindigkeiten des Laserstrahls kann die Pulverdüse nicht wie im klassischen Laserpulverauftragsschweißen relativ zum Substrat mitgeführt werden, sondern muss während des Bauprozesses statisch bleiben. Mittels Pulverstrahl wird ein kontinuierliches Pulverbett auf dem Substrat erzeugt in dem sich der Laserstrahl bewegt. Durch Wechselwirkung mit der fokussierten Laserstrahlung werden die Pulverpartikel am Bearbeitungsort aufgeschmolzen und ein Materialauftrag erzielt. Eine weitere Besonderheit stellt die gezielte Mikrostrukturierung während des Aufbauprozesses dar. Damit konnte ein erheblicher Sprung in der Erhöhung der Baurate erzielt werden. Mit der Möglichkeit der Generierung von 2,5D-Strukturen bietet das Laser Micro Cladding eine Alternative zum Lasermikrosintern. Einen entscheidenden Vorteil stellt das kontinuierlich erneuerte Pulverbett dar. Im Gegensatz zum Lasermikrosintern, fällt dadurch die Belichtungspause bei jeder neuen Bauteilschicht für den Pulverbeschichtungsprozess weg und spart viel Zeit. Hochrate Micro Cladding ist eine Weiterentwicklung des Micro Cladding Verfahrens vom Laserinstitut Hochschule Mittweida. Hierfür kommen derzeit zwei verschiedene Strahlquellen und Strahlablenksysteme zum Einsatz. Zum einen werden ein kurzgepulster Hochleistungsfaserlaser und ein Hochleistungs-Galvanometer-Scanner verwendet, zum anderen ein cw-Hochleistungsfaserlaser in Verbindung mit einem akustooptischen Modulator (AOM) und einem Polygonspiegelscanner. Damit ließen sich bisher extrem hohe Bauraten von bis zu 3.900 mm³/h (Steigerung: Faktor 20 gegenüber Micro Cladding) bei Ablenkgeschwindigkeiten bis 100 m/s erzielen. Für die Generierung von großflächigen Mikrostrukturen stehen außerdem ein großer Bearbeitungsraum mit 3-Achssystem und ein Zyklonabscheider zur Pulverrückgewinnung zur Verfügung. Weiterhin wurde eine Flachstrahldüse entwickelt, die einen homogenen Pulverstrahl mit einem Querschnitt von 0,5 x 200 mm² erzeugt. Damit lassen sich ohne Achsenbewegung 200 mm lange lineare Mikrostrukturen generieren. Mit dem Verfahren sind auch Mikrostrukturen mit variablem Wandquerschnitt erzeugbar, wie zum Beispiel Mikro-Schneiden. Zudem können durch eine gezielte Umschmelzung der Oberflächen der generierten Mikrostrukturen auch Hinterschneidungen realisiert werden.

Das kann zum Beispiel genutzt werden, um eine mechanische Verankerung für schlecht haftende Schichten zu erzielen. Die derzeitigen Untersuchungen befassen sich, neben der Überführung des Verfahrens in industrielle Anwendungen, mit der Möglichkeit zur schnellen Flächenbeschichtung mit Schichtdicken im Mikrometerbereich. Erste Ergebnisse zeigen, dass homogene Schichtdicken zwischen 1 µm und 10 µm gezielt eingestellt werden können. Die maximale Flächenrate liegt derzeit bei 242 cm²/min bei einer Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls von 200 m/s. Mit der neuartigen Methode können auch temperaturempfindliche Substrate beschichtet werden.

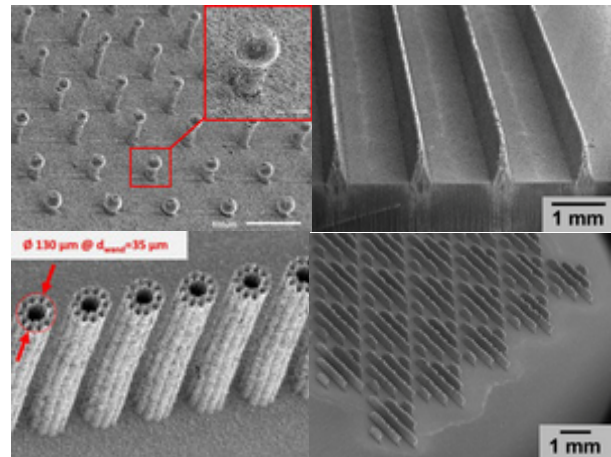


Abbildung 6: Beispiele Micro Cladding [5]

Laserauftragschweißen

Das Laserauftragschweißen findet schon in Reparaturprozessen, für die additive Fertigung sowie für den Verschleiß- und Korrosionsschutz vielfältige wirtschaftlich nutzbare Anwendungen. Am Laserinstitut Hochschule Mittweida erfolgt dabei die Spezialisierung im Bereich des Aufbringens hochwertiger Gleit- und Verschleißschutzschichten auf beliebig geformten funktionellen Bauteilen. Anwendungsfelder finden sich in der Automobilindustrie zur Steigerung der Haltbarkeit von Getriebebauteilen oder auch in der Mäh- und Zerkleinerungstechnik zur Verstärkung von Industrieschneidmessern sowie der Optimierung von Brems scheiben. Spezielle Anlagentechnik ermöglicht es weiterhin, anwendungsbezogene Schichtsysteme zu generieren, um z. B. den Verschleißvorgang durch Gradientenschichtsysteme gezielt zu steuern.

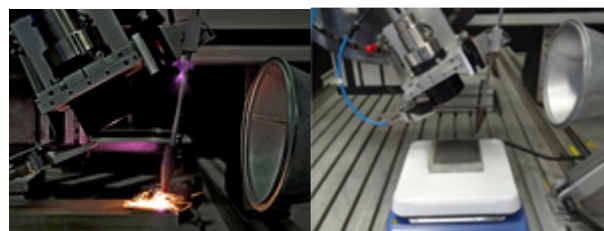


Abbildung 7: Beispiele Laserauftragschweißen [6]

Entwicklung eines Hochgeschwindigkeits-Rotationsdruckverfahrens

Zielstellung des Projekts war es einen Hochgeschwindigkeits-3D-Drucker, basierend auf dem FDM-Verfahren, zu entwickeln. Als Haupteinsatzgebiet eines solchen Druckers ist die Orthopädietechnik angedacht. Speziell der Bereich Prothesen- und Orthesenbau. Diese orthopädischen Hilfsmittel müssen passgenau, für die individuellen Bedürfnisse des jeweiligen Patienten, gefertigt werden. Um eine optimale Hilfsstellung im Alltag und einen möglichst hohen Tragekomfort zu gewährleisten. Es handelt sich hierbei um eine Einzelfertigung bzw. Kleinstserienfertigung, wodurch sich der 3D-Druck als optimales Fertigungsverfahren darstellt.

Aktuell nimmt die Herstellung einer Orthese oder Prothese 2-3 Werkzeuge in Anspruch. Der Herstellungsprozess soll auf mindestens einen Arbeitstag reduziert werden. Von der Abnahme der Maße bis zum fertigen orthopädischen Hilfsmittel. Um dies zu realisieren wird die aufwendige Modellerzeugung mittels Gipsabdrücken und anschließender Modellierung der Gipsabdrücke durch 3D-Scan, mittels Handscanner ersetzt. Mit den Scandaten des Patienten werden dann in der Modellierungssoftware die orthopädischen Hilfsmittel passgenau erzeugt und für den 3D-Druck vorbereitet. Neben einer sauberen und schnelleren Modellerzeugung könnten so Lagerkapazitäten und Arbeitsraum freigemacht werden.

Die wichtigsten Merkmale des Druckers sind eine rotierende, beheizte Bauplattform und 4 separat verfahrbare, aber simultan arbeitende Druckköpfe. Zusätzlich werden Extruder verwendet die einen hohen Volumenstrom aufweisen. Diese Kombination gewährleistet einen hohen und konstanten Materialfluss. Durch die rotierende Bauplattform eignet sich der Drucker eher für runde, hohlzylindrische Objekte. Es wurde ein Rahmengestell konstruiert an dem die horizontalen Achsen mit den Extrudern befestigt sind. Die Extruder sind jeweils 90° versetzt und fahren auf den Mittelpunkt der Bauplattform zu. Es ist jedoch nur einem Extruder möglich über den Mittelpunkt der Bauplattform hinweg zu fahren. Die Bauplattform rotiert, angepasst an die langsamste Achse des gesamten Druckers, entsprechend schneller oder langsamer. Zu Beginn des Druckprozesses steht die Bauplattform direkt unter den Extrudern und senkt sich im Prozess um die jeweiligen Schichthöhen ab. So ist ein stabiler Fertigungsprozess möglich.

Da dieser Aufbau eines 3D-Druckers unüblich ist, musste neben der Hardware auch eine eigene Software entwickelt werden. Sogenannte Slicingprogramme erzeugen mit den Objektdaten des Druckmodelles die Bewegungsbahnen der Extruder, die Geschwindigkeiten der Achsen und diverse andere Einstellungen für den Druckprozess. Slicingprogramme für herkömmliche 3D-Drucker, die mit kartesischen Koordinatensystemen arbei-

ten, gibt es auch als Freeware zum kostenlosen Download. Der Hochgeschwindigkeits-Rotations-3D-Drucker basiert jedoch auf einem Zylinderkoordinatensystem, was eine eigene neue Slicingsoftware unumgänglich macht.

Im Laufe des Projektes wurden zwei Demonstratoren gefertigt. Der erste Demonstrator diente der Untersuchung des Druckprozesses auf eine rotierende Bauplattform. Druckparameter und Steuerungslösungen wurden hiermit erarbeitet. Der Zweite Demonstrator ist ein Komplettaufbau mit allen eingangs erwähnten Spezifikationen. Mit diesem Demonstrator wurden erste Hilfsmittel gedruckt. Bei den Hilfsmitteln handelt es sich um orthopädische Helmschalen, welche bei Patienten mit Schädeldeformationen oder im Zuge der Rehabilitation nach einer Operation zum Einsatz kommen. Die Geometrie der Helmschalen ist relativ einfach und eignet sich somit gut um den Druckprozess und die Slicingsoftware zu erproben und diese entsprechend anzupassen.

Das Projekt endete am 31.12.2020. Es wurde ein funktionsfähiger Hochgeschwindigkeits-Rotations-3D-Drucker entwickelt, welcher die orthopädischen Helmschalen innerhalb von 2 Stunden druckt. Handelsübliche 3D-Drucker benötigen für das gleiche Modell 13 Stunden.

Gefördert wurde das Projekt vom BMWi im Rahmen des „zentralen Innovationsprogramm Mittelstand“. Neben der Hochschule Mittweida waren folgende Firmen am Projekt beteiligt. Das Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH, saXcare GmbH, Jenaer Antriebstechnik GmbH, Ehnert Maschinenbau GmbH & Co. Kg, ATZ GmbH Industrieautomation und CADsys Vertriebs- und Entwicklungsgesellschaft mbH. Organisiert und koordiniert wurde das Forschungsprojekt von der FGMD GmbH.

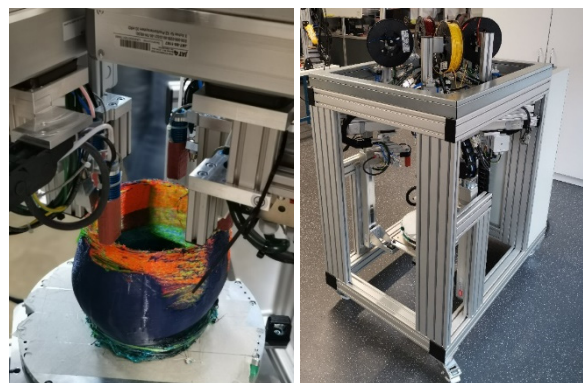


Abbildung 8: Hochgeschwindigkeits-Rotationsdrucker

Danksagung

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes.



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.

EFRE

Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



Literaturverzeichnis

- [1] H. Bankwitz: Additiv gefertigte Sensoren auf technischen In: Textilien. 7. Mitteldeutsches Forum Rapid Technologien, 26. Oktober 2020, Merseburg. (2020)
- [2] H. Bankwitz, J. Hübler: Herstellung elektrisch leitfähiger Strukturen auf technischen Textilien mittels Freiformtechnologie In: 25. Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida. ISSN 1437-7624 (2018)
- [3] M. Erler, S. Gronau, F. Heinrich, R. Ebert, A. Streek: 3D-Druck von metallischen Mikrobauteilen mittels Lasermikrosintern, In: Innovative Verfahren der Lasermaterialbearbeitung, 12. Jenaer Lasertagung, DVS-Berichte Band 367, Düsseldorf: DVS Media, ISBN: 978-3-96144-132-7, S. 151-160 (2021)
- [4] J. Drechsel, M. Erler, R. Ebert, H. Exner: Pulver- und Prozessuntersuchung für die generative Fertigung von Edelstahlbauteilen mittels Mikro-SLM, In: Scientific Reports, 11. Mittweidaer Lasertagung, S. 125-129 (2019)
- [5] M. Erler, R. Ebert, M. Horn, S. Gronau, S. Klötzer, H. Exner: High Speed Drucken von Mikrostrukturen aus Metall mit Micro Cladding, In: 3D-Druck in der Anwendung: 3. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung, Merseburg: Hochschule Merseburg, Tagungsband, ISBN: 978-3-942703-51-2, S. 380-405 (2016)
- [6] M. Erler, S. Klötzer, M. Heinrich, L. Hartwig, R. Ebert, B. Steiger, H. Exner: Untersuchungen zum Mikropulverauftragschweißen mittels gepulster Faserlaserstrahlung, In: Tagungsband der 8. WTK TU Chemnitz, Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik, S. 222-228 (2009)
- [7] J. Matthes, C. Petzold: Hochgeschwindigkeits 3D-Druck zur Herstellung von Prothesenelementen, In: Scientific Reports 2018, Digitalisierung in Industrie und Gesellschaft - Arbeiten und Leben im Umfeld der 4. Industriellen Revolution (2018)