

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Rapid.Tech + FabCon 3.D“

von Michael Kynast, Michael Eichmann und  
Gerd Witt (Hrsg.)

Print-ISBN: 978-3-446-46223-6  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46244-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46223-6>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

## Table of Contents

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

Greeting .....	7
Advisory Council & Review Committee .....	8

### Part 1: Forum Medical, Dental & Orthopaedic Technology

Direkter Aligner für Kieferorthopädie, der eine hohe Zähigkeit aufweist und nicht gelb wird High toughness and yellowing-free Direct Aligner for Orthodontics Hiroaki Okamoto .....	<b>U</b>   11
---	------------------------

### Part 2: Forum Automotive Industry

Additive Fertigung bei TMG - vom Windkanalmodell in den Motorsport zur Kleinserie Additive manufacturing at TMG – from wind tunnel models to motorsports to small scale production Alexander Liebold.....	<b>U</b>   23
Additiv-Guss ein neuartiger Hybridansatz für automobile Anwendungen Additive-Casting a novel hybrid approach for automotive application Markus Oettel, Sebastian Flügel, Stefan Polenz, Andreas Kleine, Mathias Gebauer, Bernhard Müller .....	<b>U</b>   34
Additive Fertigung sicherheitsrelevanter Bauteile in der Automobil-industrie – wie stabil ist die Prozesskette? Additive Manufacturing of safety-relevant Components in the Automotive Industry – how stable is the process chain? Alexander Klose.....	<b>U</b>   49

### **Part 3: Forum Design**

Potenzial- und Kostenabschätzung für die pulverbettbasierte additive Fertigung auf Basis von Entwurfsvariablen Appraisal of potential and cost for powder-bed additive manufacturing based on design draft variables <u>Michael Süß</u> , Bernhard Richter, Christine Schöne, Ralph Stelzer.....	<b>S</b>      61
Bereitstellung von Lösungsprinzipien für die additive Fertigung zur Unterstützung der Bauteilkonzeption in der industriellen Praxis Provision of design principles for additive manufacturing to support conceptual design in industrial practice <u>S. Kuschmitz</u> , H.Watschke, F.Schumacher, T. Vietor .....	<b>S</b>      75
Rahmen und Strategien für den Leichtbau von additiv gefertigten Zahnrädern für die Automobilindustrie Framework and strategies for the lightweight construction of AM gears for the automotive industry <u>Matthias Schmitt</u> , Deniz Jansen, Andreas Bihlmeir, Jakob Winkler, Christine Anstätt, Georg Schlick, Thomas Tobie, Karsten Stahl, Gunther Reinhart .....	<b>S</b>       89
Möglichkeiten der Topologieoptimierung für additiv gefertigte Raumfahrtbauteile Potential of topology optimization for additive manufactured spacecraft structures <u>Robin Willner</u> , Stefan Lender, Andreas Ihl, Christoph Wilsnack, Samira Gruber, Ana Brandão, Laurent Pambaguian, Mirko Riede, Elena López, Frank Brueckner, Christoph Leyens .....	<b>S</b>       103
Der Einsatz von Oberflächen im Kontext des LBM The use of surfaces in the context of LBM <u>E. Garrelts</u> , D. Roth, H. Binz, J. Reichart .....	<b>S</b>      118
Verbindungsmöglichkeiten additiv aufgetragener Geometrien auf Spritzgusselemente im FLM-Verfahren Joining possibilities of additive applied geometries on injection molded parts using the FLM process <u>David Kessing</u> , Manuel Löwer, Alina Richter, Fabian Fischer, Lukas Pelzer, Franz Wieck .....	<b>S</b>       131

Prozessentwicklung zur Herstellung feiner Gitterstrukturen per Schmelzschichtung	<b>U</b>
Development of a Process for the Production of fine Grid Structures by the use of Fused Filament Fabrication	
<u>Hanna Siebert</u> , Dieter Spiehl, Vinzenz Nienhaus, Marcel Krauße, Edgar Dörsam .....	
	148

#### **Part 4: Forum Software & Processes**

Verbesserung der digitalen Prozesskette in der Additiven Fertigung: Softwareunterstützte Bauteilidentifikation als wichtiges Element einer AM Strategie	<b>U</b>
Improvement of the digital process chain in additive manufacturing: Software-supported component identification as an important element of an AM strategy	
Kaj Führer .....	
	163

#### **Part 5: Forum AM Science**

Mechanisches Verhalten lasergesinterter PA12 Bauteile bei variierenden statischen Belastungsgeschwindigkeiten und -dauern	<b>S</b>
Mechanical properties of lasersintered PA12 parts at varying static load speeds and durations	
<u>Andreas Wörz</u> , Sebastian Hertle, Dietmar Drummer .....	
	170
Einfluss von Belichtungsparametern und -strategien auf die Bruchdehnung während des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen	<b>S</b>
Influence of exposure parameters and strategies on elongation at break during laser powder bed fusion of metals	
<u>Sebastian Platt</u> , Stefan Kleszczynski, Gerd Witt .....	
	183
Schlieren- und Schattengrafie zur Visualisierung der Schutzgasdynamik im Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)	<b>S</b>
Schlieren- and Shadowgraphy for Visualization of the Shielding Gas Dynamics in Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)	
<u>Birk Hoppe</u> , Sebastian Enk .....	
	197

Charakterisierung lasergesinterter Bauteile aus aluminium- verstärktem Polyamid 12 am Beispiel von Schiffsmodellpropellern Characterisation of Laser Sintered Parts made of Aluminium-Reinforced Polyamide 12 for Usage in a Model Testing of Marine Screw Propellers <u>Anna Tarasova</u> , Andreas Wegner, Livia C. Wiedau, Gerrit Aßbrock, Benjamin Friedhoff, Jan Sehrt, Gerd Witt ..... 211	<b>S</b>
Einflussuntersuchung von verschiedenen Nachbehandlungs- methoden auf die Oberflächentopologie von laser-gesinterter Polyamid 12 Proben Examination of the influence of various post-treatment methods on the surface topology of laser sintered polyamide 12 samples <u>Livia C. Wiedau</u> , Lars Meyer, Andreas Wegner, Gerd Witt ..... 228	<b>S</b>
Analyse der Temperaturführung in der roboterbasierten Materialextrusion mit Polypropylen Analysis of the temperature control in extrusion-based additive manufacturing of polypropylene <u>Sebastian Hertle</u> , Andreas Wörz, Dietmar Drummer ..... 244	<b>S</b>
Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im FLM- Verfahren durch lokale Laservorerwärmung und Endlosfaser- verstärkung Improving the mechanical properties in FLM-processing by locally laser-preheating and continuous fiber reinforcement <u>Cornelius Kühn</u> , Bernd Niese, Gerd Witt ..... 258	<b>S</b>
Interaktion der Ausgangspulverkennwerte und der Belichtungsparameter im selektiven Laserstrahlschmelzen von Kunst- stoffen auf resultierende Bauteileigenschaften The interdependency of powder properties and exposure parameters in selective laser beam melting of polymers on part properties <u>Andreas Jaksch</u> , Katrin Wudy, Dietmar Drummer ..... 274	<b>S</b>
Pulverpartikel-Design im Laser-Sintern: Materialoptimierung von technischem Kunststoffpulver Powder particles design in laser sintering: Material optimization of technical plastic powder <u>Markus Piechotta</u> , Andreas Wegner, Timur Ünlü, Gerd Witt ..... 287	<b>S</b>

Geometriespezifische Prozessführung zur Steigerung der Effizienz beim Laser Powder Bed Fusion (LPBF)	<b>S</b>
Geometry-specific process control to increase the efficiency of Laser Powder Bed Fusion (LPBF)	
<u>Tobias Pichler</u> , Johannes Henrich Schleifenbaum .....	303

Mikroskopisches Stützdesign für die nass-chemische Nachbearbeitung von LPBF-gefertigten Bauteilen aus AISi10Mg	<b>S</b>
Microscopic support design for the wet-chemical post processing of LPBF manufactured parts made of AISi10Mg	
<u>Tobias Schmithüsen</u> , Johannes Henrich Schleifenbaum, Thomas Laag .....	318

**Part 6: Forum Tool, Mould & Jig Construction**

Additive Fertigung von verschleißbeständigen Werkstoffen	<b>U</b>
Additive Manufacturing of wear-resistant materials	
<u>M. Jurisch</u> , P. Kluge, J. Boes, B. Klöden, T. Weißgärber, B. Kieback.....	336

**Part 7: Forum Plastics**

Methodik zur Qualifizierung des Lasersinter Prozesses für die Serienfertigung	<b>U</b>
Methodology for Qualification of Laser Sintering Serial Production	
<u>Helge Klippstein</u> , Hans-Joachim Schmid .....	350

**Part 8: Forum Metal**

Komplette Produktionslinie zur Herstellung metallischer und Multimaterial – Bauteile	<b>U</b>
Complete production line for metallic and multimaterial components	
Uwe Lohse .....	367

Mechanisches Verhalten L-PBF-gefertigter Gitterstrukturen	<b>U</b>
Mechanical Properties of L-PBF-made Lattice Structures	
<u>Lena Farahbod-Sternahl</u> , Yasin Ugur, Christian Läßig, Anna Schulze, Tobias Thiede, Christoph Haberland, Sebastian Piegert, Martin Leary, Heinz Voggenreiter, Gerd Witt.....	389

**Part 9: Forum Aviation**

Industrialisierung der Nachbearbeitung für Ti6Al4V additive gefertigte Bauteile	<b>U</b>
Industrialization of post-processing for Ti6Al4V additive manufacturing parts	
Viviane Kettermann Fernandes .....	404

Wellenlängenabhängige Herstellung keramischer Werkstoffe für Luft- und Raumfahrtanwendungen mittels Lasertechnologie	<b>U</b>
Wavelength Dependent Laser Processing of Ceramic Materials for Aerospace and Space Applications	
<u>S. Polenz</u> , W. Kunz, M. Rößler, E. López, F. Brückner, C. Leyens .....	418

**Part 10: Forum Standardisation & EHS**

Anwendersicherheit beim Laser-Strahlschmelzen von Metallpulvern im Rahmen der VDI-Richtlinie 3405	<b>U</b>
User Safety of Laser Beam Melting of Metal Powder within VDI 3405	
<u>Christian Bay</u> , Alexander Mahr.....	431

## **Part 1:**

Forum Medical, Dental &  
Orthopaedic Technology



## **Direkter Aligner für Kieferorthopädie, der eine hohe Zähigkeit aufweist und nicht gelb wird**

### **High toughness and yellowing-free Direct Aligner for Orthodontics**

Hiroaki Okamoto  
*Okamoto Chemical Ind. Co. Ltd,*

#### **Kurzfassung**

Aligner for Orthodontics erstellt derzeit ein Gebissmodell mit einem 3D-Drucker und darauf befindlichen Thermoplasten, um einen Aligner zu erstellen. Um den Prozess zu rationalisieren, haben verschiedene Unternehmen lichthärtbare Harze für die direkte Herstellung (Direct Aligner) unter Verwendung von 3D-Druckern vorgeschlagen, aber es gibt immer noch nicht genügend befriedigende Elemente wie Zähigkeit und Farbe mit Biokompatibilität.

Photopolymer besteht aus Monomermaterialien und Initiatorsystem. Grundsätzlich verwenden wir kein Monomermaterial wie Bisphenol A, das lebende Organismen beim Design beeinflusst, aber nur sicheres Material wurde als photohärtbares Harz entwickelt. Dem neuen lichthärtbaren Harz gelang es, Zähigkeit zu verleihen, indem ein neues Urethanmonomer neu entworfen wurde und das neue Ausgangssystem gefunden wurde, das Licht absorbiert und die Reaktion initiiert. Eine starke Stabilität der Klarheit (Gelbfärbung) wird durch Überprüfung aller Monomere zur Anpassung der Verbindung zur Strukturierung der Struktur gegen Gelbfärbung und durch Einführung eines Antigelbungsinitiatorsystems erreicht. Es ist uns gelungen, die Gelbfärbung des Formkörpers extrem zu unterdrücken.

Es ist uns gelungen, ein Aushärtungsharz für den direkten Aligner zu schaffen, der sicher ist, eine hohe Zähigkeit und eine hohe Stabilität der Klarheit aufweist. Ich werde andere Eigenschaften dieses direkten Aligners beschreiben, indem ich den chemischen und physikalischen Gesichtspunkt verwende.

#### **Short Abstract**

Aligner for Orthodontics currently produces a dentition model using a 3D printer and thermoplastics on it to create an aligner. In order to streamline the process, various companies have proposed light curable resins for directly manufacturing (direct aligner) using 3D printers, but there are not still enough satisfying items such as toughness and color with biocompatibility.

Photopolymer is composed of monomer materials and initiator system, we basically do not use monomer material such as bisphenol A which affects living organisms in designing, but only safe material was designed as a photocurable resin. The new light curable resin was succeeded in giving toughness by using newly designing a special urethane monomer and by finding the new starting

system which absorbs light and initiates the reaction. Strong stability of clearness (anti-yellowing) is acquired by reviewing all the monomers for adapting anti-yellow structure-taking compound, and by introducing anti-yellowing initiator system. We succeeded in extremely suppressing the yellowing of the shaped object.

We succeeded in creating curing resin for direct aligner which is having safe, having heavy toughness and strong stability of clearness. And I will describe other characteristics of this direct aligner by using chemical and physical view point.

## **1 Langfassung**

### **A) Introduction**

#### **History of 3D printers in general<sup>1)</sup>**

Mr. Hideo Kodama of Nagoya City Industrial Research Institute in 1980 applied for a patent for a 3D printer in the photofabrication method using a photocurable resin (Photopolymer). This is a method (SLA) of slicing an object in the Z-axis and curing the slice by light on a stage in a bathtub container of a Photopolymer, and the world's first 3D printer concept and experiment was published. However, because no request for examination of this patent was made, American patent holder Chuck Hal, who will launch 3D Systems, will obtain a patent. Therefore, until now, when making the object, it has been made by scraping the raw material, but this method is a completely new loading method.

#### **Feature of 3D printer**

Shaped object by the 3D printer's is characterized by the additional processing that repeats the lamination in comparison to the conventional removal processing and deformation processing, but the other major characteristic is that it is possible to jump in time and place if data is installed. For example, data taken out in Europe can be processed in Asia, can be shaped in Africa, data can be stored semi-permanently, also data can be taken out at any time, and data can be formed in any place by 3D printer.

#### **Applied to medical and dental care fields**

With the progress of computers, especially with the speeding up of graphic processing speed, three-dimensional data obtained from medical imaging equipment such as X-ray CT equipment and MRI are projected three-dimensionally on a display, and this image is used for diagnosis and surgery assistance. Furthermore, at the time of planning an operation plan Using this 3D data, 3D printer was used to create a

## **Pulverpartikel-Design im Laser-Sintern: Materialoptimierung von technischem Kunststoffpulver**

### **Powder particles design in laser sintering: Material optimization of technical plastic powder**

Markus Piechotta<sup>1</sup>, Andreas Wegner<sup>1,2</sup>, Timur Ünlü<sup>3</sup>, Gerd Witt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lehrstuhl Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen*

<sup>2</sup>*AM Polymer Research GmbH, Willich*

<sup>3</sup>*ROWAK AG, Zürich*

### **Kurzfassung**

Im Kontext des Laser-Sinterns beschreibt das Pulverpartikel-Design die Materialoptimierung von Kunststoffpulverpartikeln mit spratziger oder kantiger Form. Die kantige Form von Kunststoffpartikeln wird durch den Herstellungsprozess der Vermahlung hervorgerufen. Die Vermahlung ist im Vergleich zur chemischen Fällung weniger komplex, ermöglicht jedoch nicht die prozessseitig geforderte Partikelgröße, -morphologie und -sphärizität einzelner Pulverpartikel. Durch spezielle mechanische Nachbehandlung können verbesserte Pulvermaterialeigenschaften erreicht werden. Diese Materialeigenschaften beeinflussen entscheidend die Fließigenschaften des jeweiligen Pulvers, das Auftragsverhalten im Laser-Sinter-Prozess sowie die mechanischen Bauteileigenschaften.

In diesem Beitrag werden rheologische Ergebnisse von Kunststoffpulvermaterialien vorgestellt, die zeigen, in wie fern ein gemahltes Ausgangsmaterial durch eine Anlage zum Pulverpartikel-Design für das Laser-Sintern verbessert werden kann. Die Resultate zeigen nach der Partikel-Abrundung positive Effekte wie z. B. Steigerungen der Schüttdichte bis zu 23 % und bessere Fließigenschaften bei Polyamid 6 auf. Neben den klassischen Analysen zur Materialcharakterisierung wurden zusätzlich dynamische Pulver-Rotations-Analysen durch den „Revolution Powder Analyzer“ durchgeführt. Die vorhandene Geräteausführung ist mit einem Heizmodul ausgestattet, das eine prozessnähere Erfassung von rheologischen Pulverparametern bei höheren Temperaturen ermöglicht.

### **Short Abstract**

In the context of laser sintering, the powder particle design describes the material optimization of plastic powder particles with a spattered or edged shape. The edged shape of plastic particles is caused by the manufacturing process of grinding. Compared to other manufacturing processes like chemical precipitation grinding is less complex but does not produce the particle size, morphology and sphericity of individual powder particles required by the process. Material properties can be improved by special mechanical post-treatment. These material properties decisively influence the flowability properties of the respective powder and influence the layering behaviour in the laser sintering process as well as the mechanical properties of generated parts.

In this paper, rheological results of plastic powder materials are presented, showing how far a source material can be optimized for laser sintering using a powder particle design machine. The results show positive effects after the rounding process i.e. increases in bulk density up to 23 % and better flowability properties for polyamide 6. In addition to classical analyses for material characterization, dynamic powder rotation analyses were executed by the "Revolution Powder Analyzer". The available device set up includes a heating module which enables process-related detection of rheological powder properties at higher temperatures.

## Langfassung:

### 1 Einleitung

Kunststoffverarbeitende additive Fertigungsverfahren wie das pulverbettbasierte Laser-Sintern (LS) haben sich bereits in der Herstellung von Prototypen (Rapid Prototyping) und individualisierten Endprodukten (Rapid Manufacturing) industriell etabliert. LS differenziert sich, neben dem 3D-Printing, von allen anderen additiven Fertigungsverfahren dadurch, dass bei diesem Verfahren generell keine Stützstrukturen erforderlich sind und sich somit jegliche Konstruktions- und Fertigungsfreiheit bietet [1, 2]. Dies eröffnet ferner großes Potential in der Herstellung von bionischen Freiformen, welche in vielen produzierenden Branchen durch Kundenwünsche gefragt sind. Heutzutage werden diese Verfahren z. B. in der Produktion von Spezialteilen mit Leichtbaustrukturen für die Luft- und Raumfahrt oder Automobilindustrie angewendet [3, 4]. Im Zuge dessen steigen die Anforderungen, sowohl an die additiv gefertigten Produkte, als auch an die dafür benötigten Materialien [3, 5]. Die Überführung in die Serienproduktion von weiteren Produktfeldern erschwert derzeit noch vor allem die begrenzte Verfügbarkeit von Materialien, insbesondere im Bereich von LS-Polymerpulvern, mit prozessstabiler Verarbeitbarkeit [6, 7].

Dies kann auf das Vorhandensein einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussgrößen beim LS und deren Wechselwirkungen zurückgeführt werden, welche Auswirkungen auf die robuste Prozessführung und Bauteilqualität haben [8]. In Bezug auf die Einflussgrößen sind generell zwei Hauptgruppen zu unterscheiden: Prozess- und Materialeigenschaften. Zu den wesentlichen Größen, die die Prozesseigenschaften beeinflussen, zählen die technischen Laserspezifikationen, Belichtungsparameter und -strategien, die thermischen Umgebungsbedingungen im Bauraum und die Bauteileigenschaften des schichtweisen zu produzierenden Produkts. [9] Auf diese Parameter wird im weiteren Verlauf nicht detaillierter eingegangen, da der Fokus dieses Beitrages auf dem LS-Pulvermaterial sowie dessen Verbesserung hinsichtlich der Fließfähigkeit mittels mechanischer Sphäroidisierung liegt. Die Materialeigenschaften werden in drei untergeordnete Kategorien unterteilt. Dazu zählen zum einen die thermischen Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit, -kapazität oder die Schmelzviskosität eines jeweiligen Thermoplasts. Zum anderen kommen optische Eigenschaften wie Absorption oder Reflexion in Betracht. Ferner stellt die Pulverbeschaffenheit, die durch die Herstellungsart, chemische Zusammensetzung, Feuchtigkeit, elektrostatische Aufladung, Schüttdichte und das Alterungsverhalten charakterisiert wird, einen bedeu-

tenden Einfluss auf die Verarbeitbarkeit dar. Daneben beeinflussen zusätzlich die Partikeleigenschaften bezüglich der Partikelgrößenverteilung, -form, -oberfläche und Korngröße das Materialverhalten. [9 bis 11] Die zuvor genannten Faktoren beeinflussen die Pulverfließfähigkeit, welche für die Applizierung bzw. einen homogenen Auftrag des Pulvermaterials beim LS von großer Relevanz ist [5, 7, 12]. Rietzel zufolge wird beim LS eine hohe Schüttdichte zur Erreichung einer hohen Festigkeit, Dichte und Maßhaltigkeit von gesinterten Bauteilen benötigt und sollte zugleich eine möglichst gute Fließfähigkeit der Pulver mit sich bringen. Dies ist allerdings ein Widerspruch hinsichtlich der Anforderungen, da bei vielen Pulvermaterialien die Fließfähigkeit anti-proportional zur Schüttdichte ist. [13]

Demzufolge besteht die Notwendigkeit, ein adäquates Verhältnis zwischen Pulverfließfähigkeit und Schüttdichte für ein jeweiliges LS-Pulvermaterial zu ermitteln. Derzeit ist die kommerzielle Verfügbarkeit von LS-Pulvermaterial mit den geforderten Eigenschaften noch relativ begrenzt und die Produktionsprozesse sind materialspezifisch aufgrund unzureichender Pulvereigenschaften immer noch nicht zuverlässig genug, um den industriellen Ansprüchen zu genügen. LS-Pulvermaterialien können durch verschiedene, chemische oder mechanische Verfahren hergestellt werden, z. B. durch direkte Polymerisation, chemisches Ausfällen [6, 14] oder Schmelzemulgierung [15]. Je nach Verfahren ist die Erzeugung von gut rieselfähigen Pulvern mit nahezu perfekt sphärischen Partikeln möglich. Andererseits sind diese Prozesse verfahrenstechnisch komplex und mit brennbaren und explosiven Lösemitteln verbunden, welche ein hohes Prozess-Know-how erfordern. [5, 13]

Zu den mechanischen Verfahren zählt das Nassmahlen oder kryogene Zermahlen [16]. Schmidt zeigt in [17] für verschiedene Materialien, dass mittels des Nassmahlens handelsübliche Polymergranulate in Mikropartikel-Pulver überführt werden können. Auf diese Weise erfolgt die Herstellung von Pulvermaterialien aus Polystyrol (PS), Polybutylenterephthalat (PBT), Polyoxymethylen (POM) und Polyetheretherketon (PEEK) und weitere hergestellt. Kryogenes Zermahlen ermöglicht ebenfalls die Produktion von Polymerpulvern, wobei das Granulat heruntergekühlt und im spröden Zustand zermahlen wird. Einige dieser Polymerpulver wurden bereits für den LS-Prozess auf ihre Verarbeitbarkeit hin untersucht [18]. Im Gegensatz zu chemischen Verfahren sind mechanische Verfahren mit einer geringeren Komplexität verbunden und ermöglichen zudem die Pulverherstellung von nahezu allen Polymeren. Gemahlene Polymerpulver sind durch scharfkantige und nicht-sphärische Mikropartikel gekennzeichnet. Diese weisen eine geringe Fließfähigkeit auf und führen zu einem instabilen Auftragsverhalten während des LS-Prozesses [5, 17]. Aufgrund dessen werden zur Verbesserung der Fließfähigkeit sowie Verarbeitbarkeit auf LS-Anlagen Rieselhilfen als Additive zu den gemahlenden LS-Pulvermaterialien hinzugefügt [13].

Neben dem Einsatz von Rieselhilfen besteht ferner die Möglichkeit, die Fließfähigkeit von LS-Pulvern durch Sphäroidisierung zu verbessern. Das Thema der Pulverpartikelmodifikation mittels Sphäroidisierung bzw. Ab- oder Verrundung gewinnt zunehmend in der LS-Branche an Bedeutung [19 bis 23]. Diesbezüglich existieren Verfahrensmöglichkeiten, durch die sphärische Teilchen aus nicht-sphärischen Primärteilchen erzeugt werden können. Derartige Modifikationsmöglichkeiten des Pulverpartikel-Designs zur Sphäroidisierung von gemahlenden Polymerpulverpartikeln werden im folgenden Kapitel thematisiert.

## **Anwendersicherheit beim Laser-Strahlschmelzen von Metallpulvern im Rahmen der VDI-Richtlinie 3405**

### **User Safety of Laser Beam Melting of Metal Powder within VDI 3405**

Christian Bay<sup>1</sup>, Alexander Mahr<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Universität Bayreuth – Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik*

<sup>2</sup> *Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)*

## **1 Kurzfassung**

Bei der Anwendung des additiven Fertigungsverfahrens Laser-Strahlschmelzen (LBM) entspricht die Anwendersicherheit aufgrund der Unsicherheit über die Relevanz der Anwendbarkeit geltender Vorschriften und Richtlinien keinen industriellen Standards. Der Fachausschuss „FA 105.6 Additive Manufacturing – Sicherheit beim Betrieb additiver Fertigungsanlagen“ befasst sich mit einem einheitlichen Vorgehen, um den sicheren Betrieb der additiven Fertigungsanlagen zu gewährleisten. Dazu wurde die VDI 3405 Blatt 6.1 „Additive Fertigungsverfahren; Anwendersicherheit beim Betrieb der Fertigungsanlagen; Laser-Strahlschmelzen von Metallpulvern“ entwickelt. In dieser werden relevante technische Regeln, Vorschriften und Gesetze zusammengestellt und Handlungsempfehlungen gegeben, wie diese bei den unterschiedlichen Arbeitsschritten des LBM praktisch umgesetzt werden können.

Für eine Implementierung und dem sicheren Betrieb von LBM-Anlagen müssen diese Handlungsempfehlungen konkretisiert sowie auf die vor allem baulichen und technischen Rahmenbedingungen und Gegebenheiten des Anwenders adaptiert werden.

Aufbauend auf einer ganzheitlichen Bewertung der LBM-Prozesskette wurden an der Universität Bayreuth anlagen- und werkstoffspezifische Konzepte zur Pulverhandhabung entwickelt und bewertet. Der Fokus liegt auf der anwendersicheren Handhabung des reaktiven Werkstoffs Ti6AlV4 aufgrund seiner hohen spezifischen Festigkeit. Hierfür wurde eine Umsetzungsstrategie erarbeitet und eine Laborumgebung aufgebaut. Basierend auf den Erkenntnissen wurde ein praxisorientiertes Vorgehen zur anwendersicheren Umsetzung der LBM-Prozesskette, insbesondere für die Pulverhandhabung von reaktiven Pulvermaterialien, abgeleitet. Dabei werden sowohl die geltenden Vorschriften und Richtlinien berücksichtigt als auch die einzelnen Arbeitsschritte der LBM-Prozesskette durch eine entsprechende Arbeitsplatzgestaltung erleichtert sowie die Produktivität gesteigert.

## **2 Short Abstract**

In the application of the additive manufacturing process laser beam melting (LBM), user safety does not meet industrial standards due to a lack of knowledge and relevance of the applicability of existing regulations and guidelines. The

technical committee "FA 105.6 Additive Manufacturing – Safety during operation of additive manufacturing facilities" deals with a uniform procedure to ensure the safe operation of additive manufacturing facilities. VDI 3405 Sheet 6.1 "Additive manufacturing processes; user safety during operation of manufacturing facilities; laser beam melting of metal powders" has been founded for this purpose. The guidelines will comply relevant technical rules, regulations and laws such as give recommendations as to how these can be practically implemented in the various operational steps of laser beam melting.

These recommendations must be specified and adapted to the structural and technical framework conditions of the user. Based on a holistic evaluation of the process chain of laser beam melting, facility- and material-specific concepts for powder handling were developed and evaluated at Bayreuth University. Thereby the focus is on the user-safe handling of the reactive material Ti6AlV4. For this purpose, an implementation strategy has been developed, implemented and validated in a laboratory environment. Based on the validation, a practice-oriented procedure was derived for the user-friendly implementation of the LBM process, in particular for the powder handling of reactive powder materials.

### **3 Langfassung**

#### **3.1 Einleitung**

Mit der Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren steigt auch die Relevanz der Arbeitssicherheit in diesem Kontext an. Dieser Trend zeigt sich in der nachfolgenden Abbildung 1, die den Verlauf der Beliebtheit der Suchbegriffe „Additive Manufacturing“ und „Safety 3D Printing“ für die Jahre 2004–2019 bei der Internet-Suchmaschine Google<sup>1</sup> aufzeigt.

Bei der Anwendung jedes additiven Fertigungsverfahrens gilt es, die material- und verfahrensspezifischen Gefährdungen zu beachten. Insbesondere dies stellt einen kritischen Erfolgsfaktor zur Industrialisierung der additiven Fertigungsverfahren dar. Dies reicht von erhöhten Arbeitsplatzkonzentrationen flüchtiger und gesundheitsschädlicher Gase beim Strangablegeverfahren (Fused Layer Modeling, FLM) bis zu erhöhten Brand- und Explosionsgefährdungen beim Laser-Strahlschmelzen von metallischen Werkstoffen (Laser Beam Melting, LBM) [2]. Im Folgenden wird die Anwendersicherheit beim LBM fokussiert.

---

<sup>1</sup> Die Daten sind normiert und werden auf einer Ordinate von 0 bis 100 angezeigt.



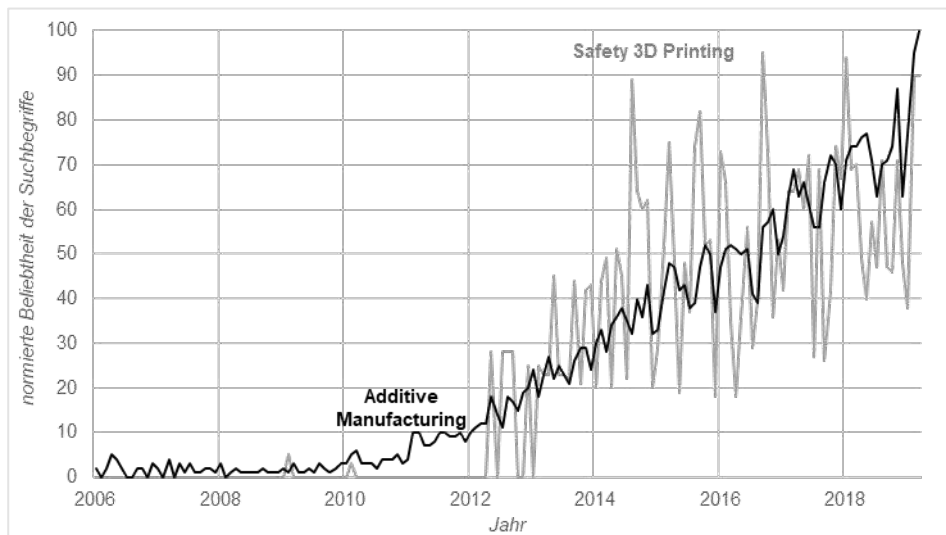


Abbildung 1: Normierte Beliebtheit der Suchbegriffe „Additive Manufacturing“ und „Safety 3D Printing“ weltweit zwischen 2004 und 2019, nach [1]

Die Ausgangswerkstoffe für das LBM sind Metallpulver, die aufgrund deren Partikelgrößenverteilung als einatembar und alveolengängig (E-Fraktion bzw. A-Fraktion) eingestuft werden [3, 4]. Dies gilt insbesondere für Metallpulver mit einer Partikelgröße unterhalb der gängigen Partikelgrößenverteilung zwischen 15 µm und 60 µm [5]. Hierfür gelten spezifische Grenzwerte der maximalen Akzeptanz- und Staubkonzentration [4, 6–8]. Zusätzlich sind die gängigen Metallpulver mit geringer Dichte, wie Titan, Aluminium sowie deren Legierungen, reaktiv. Weitere Metallpulver, wie Stähle oder andere nickelhaltige Legierungen, sind als Stoff mit kanzerogener, mutagener und reproduktionstoxischer Wirkung (KMR) eingestuft [7]. Für Tätigkeiten mit KMR-Stoffen wird ein risikobezogenes Maßnahmenkonzept nach TRGS 910 benötigt [2, 8, 9].

Bei der Anwendung des additiven Fertigungsverfahrens LBM in Unternehmen entspricht die Anwendersicherheit aufgrund von mangelndem Wissen über die Relevanz der Anwendbarkeit geltender Vorschriften keinen industriellen Standards. Zum einen sind die Gefährdungen, die von den zu verarbeitenden Metallpulvern ausgehen, nicht hinreichend bekannt. Zum anderen herrscht Unklarheit über die Relevanz und Anwendbarkeit bestehender Vorschriften und Richtlinien benachbarter Technologiefelder, wie dem Schweißen, der Pulvermetallurgie und der Verarbeitung von Nanopartikeln. Beim Betrieb additiver Fertigungsanlagen gibt es derzeit kein einheitliches Vorgehen, um den sicheren Betrieb der LBM-Anlagen und das sichere Pulverhandling zu gewährleisten.

Der Fachausschuss „FA 105.6 Additive Manufacturing – Sicherheit beim Betrieb additiver Fertigungsanlagen“ befasst sich mit einem einheitlichen Vorgehen, um den sicheren Betrieb additiver Fertigungsanlagen zu gewährleisten. Dazu wurde