



TECHNOLOGIE REPORT

08 | Additive Fertigung



Autoren: Prof. Dr. Michael F. Zäh, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb der Technischen Universität München
Dr. Christian Seidel, Mitglied der Leitung des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb der Technischen Universität München
und Leiter Additive Fertigung bei Fraunhofer IGCV
Dr. Dirk Sellmer, Vice President Research and Development MAPAL Dr. Kress KG

Einleitung

Einleitung

Die Additive Fertigungsbranche hat in den vergangenen Jahren ein erhebliches Wachstum von durchschnittlich etwa 30 Prozent pro Jahr erlebt. Dies ist maßgeblich auf den zunehmenden Einsatz der Technologien für das sogenannte Direct Manufacturing, also die Additive Fertigung von Endprodukten [1], zurückzuführen. Wurden Additive Fertigungsverfahren in den 1990er-Jahren noch nahezu ausschließlich für die Herstellung von Prototypen verwendet, lag der Umsatzanteil des Direct Manufacturing im Jahr 2017 bereits bei 33 Prozent [2]. Die entscheidenden Vorteile der Schichtbauverfahren liegen dabei neben der schnellen Verfügbarkeit von Prototypen

- in der realisierbaren Gestaltungsfreiheit, die es ermöglicht, funktionsoptimierte Produkte herzustellen,
- in der Verkürzung von Lieferketten bei der Ersatzteilversorgung,
- in den Individualisierungsmöglichkeiten von Produkten, da bei Additiven Prozessketten der Bedarf an formgebenden Werkzeugen gering ist sowie
- im Potenzial zur Verkürzung von Reparaturkosten und -dauern.

Mit einem Gesamtmarktvolumen im Jahr 2017 von etwa 7,3 Milliarden US\$ [2] ist die Additive Fertigungsbranche heute noch als Nischenbranche zu bezeichnen. Die von zehn unabhängigen Institutionen gemittelte jährliche Wachstumsrate beträgt allerdings für die kommenden Jahre 31 Prozent [3]. Daran ist erkennbar, dass dieser Nischenbranche zukünftig eine hohe Bedeutung zugeschrieben werden kann. Es ist daher davon auszugehen, dass Additive Fertigungsverfahren mittelfristig branchenübergreifende Relevanz als Produktionstechnologien gewinnen werden.

Besondere Aufmerksamkeit wird heute der Additiven Fertigung metallischer Bauteile gewidmet. Industriell am weitesten verbreitet ist dabei das Laser-Strahl-Schmelzen, das auch unter Markennamen wie beispielsweise Selective Laser Melting (SLM) oder Direktes Metall-Laser-Sintern (DMLS) bekannt ist. Daneben existiert eine Reihe weiterer Verfahren zur Additiven Herstellung von Metallbauteilen, wie beispielsweise das Elektronenstrahlschmelzen, das Metall-Binder-Jetting, die Extrusionsverfahren, das Laser-Pulver-Auftragsschweißen, das Laser-Draht-Auftragsschweißen oder auch das Draht- und Lichtbogen-basierte Additive Fertigen. Für den Werkzeugbau hat heute das Laser-Strahl-Schmelzen die höchste Relevanz. Nach einer Studie von Ernst & Young [5] ist davon auszugehen, dass der Gesamtmarkt der metallverarbeitenden Fertigungsverfahren in den kommenden Jahren deutlich an Bedeutung gewinnen wird.

Index

INDEX

Motivation	3
Grundlagen – Grundprinzip der Additiven Fertigung	3
Werkzeugherstellung mittels Additiver Fertigung	6
Herausforderung der Additiven Fertigung bei der Werkzeugherstellung	8
Zusammenfassung	10
Literaturverzeichnis	11
Impressum	11

Motivation

Auch bei der Herstellung von Präzisionswerkzeugen werden Additive Fertigungsverfahren eingesetzt. Die fertigungstechnischen Restriktionen, die bei der konventionellen Produktion von Werkzeugen zu Einschränkungen führen, wie der Bedarf an Maschinenaufspannungen oder die Beschränkung auf bestimmte fertigbare Geometrien, entfallen bei der Additiven Fertigung weitestgehend. Dadurch werden größere Freiheiten bei der Gestaltung

möglich. Konstruktion und Auslegung der Werkzeuge können überdacht werden und somit zu einer neuen Werkzeugengeneration führen. Potenzial gibt es vor allem bei der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, der Einsparung von Material beziehungsweise von Masse durch Leichtbau und der Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit und die Funktionalität durch Hybridbauweise zu optimieren.

Motivation

Grundlagen – Grundprinzip der Additiven Fertigung

Mit Hilfe der Additiven Fertigungsverfahren werden Bauteile element- oder schichtweise aufgebaut [1]. So liegt im Vergleich zu subtraktiven Verfahren in der Regel ein verringerter Werkstoffbedarf vor, da Bauteile endkonturnah generiert werden. Das Schichtbauprinzip der Additiven Fertigung basiert auf der Zerteilung des Bauteils in virtuelle Schnitte, die durch ein Additives Fertigungsverfahren in physische Schichten übertragen und einzeln aufeinander gelegt werden, sodass ein dreidimensionales Bauteil entsteht. Die Geometrie wird direkt aus Computerdaten oder über 3D-Scanner gedruckt.

Ein weitverbreitetes Format sind STL-Daten (Surface Tesselation Language) [6, 7]. Die Entwicklung geht aber hin zu anderen Formaten wie AMF (Additive Manufacturing File)- oder 3MF (3D Manufacturing Format), die beispielsweise Farb- oder Werkstoffinformationen über das Bauteil enthalten können. Das Prinzip der Additiven Fertigung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Grundlagen –
Grundprinzip der
Additiven Fertigung

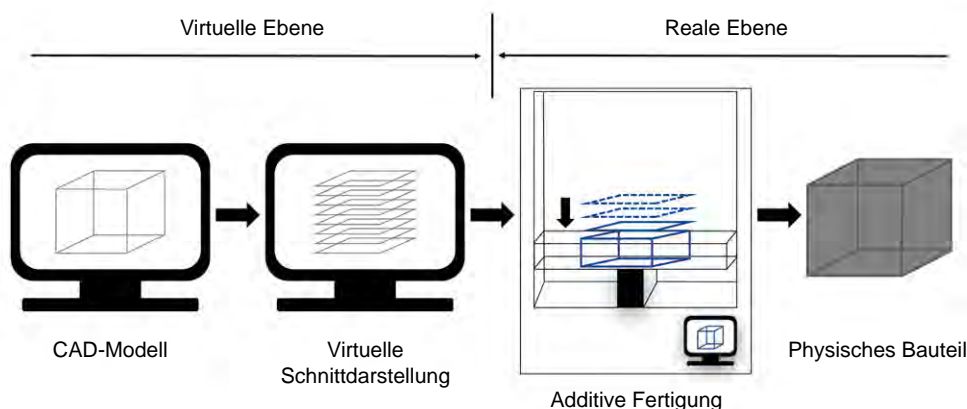


Abb. 1: Prinzip der Additiven Fertigung nach Gebhardt [7].

Der Umfang der verschiedenen Fertigungsverfahren kann zu Verwirrung führen. Viele Hersteller haben spezifische Prozess- und Materialbezeichnungen etabliert, um sich abzugrenzen und begriffliche und somit vermeintliche Alleinstellungsmerkmale zu schaffen. Trotzdem basieren die Additiven Fertigungsprozesse auf dem grundsätzlich gleichen Ablauf. Aus digitalen Daten wird element- oder

schichtweise ein Bauteil kreiert. Auch die Materialfamilien, die verwendet werden, sind die gleichen. Deshalb wurden die unterschiedlichen Additiven Verfahren nach ISO/ASTM 52900 (Abbildung 2) in sieben Prozessklassen eingeteilt [8].

Grundlagen –
Grundprinzip der
Additiven Fertigung

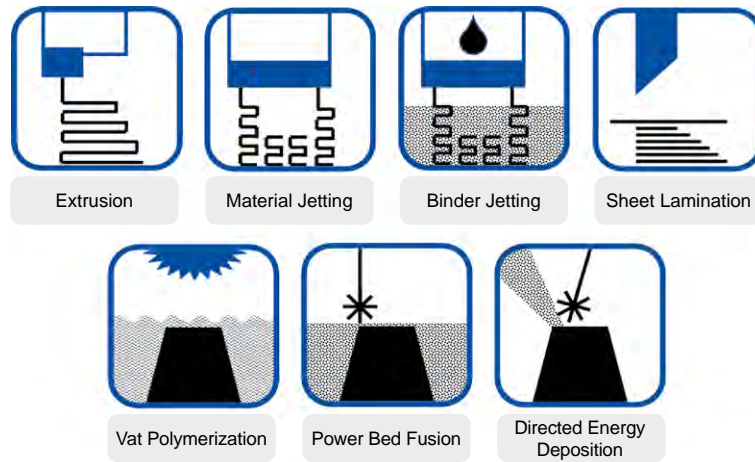


Abb. 2: Die unterschiedlichen Additiven Verfahren sind nach ISO/ASTM 52900 in sieben Prozessklassen unterteilt [Fraunhofer IGCV [9]].

Eingesetzt werden kann die Additive Fertigung zu ganz unterschiedlichen Zwecken. So unterteilen sich die Einsatzgebiete in Rapid Prototyping, Direct Manufacturing und Rapid Tooling. Das Prototyping bezieht sich vor allem auf die Entwicklung von Modellen und Prototypen. Dabei entstehen additiv gefertigte Bauteile, die eine eingeschränkte Funktionalität besitzen, bei denen jedoch spezifische Merkmale ausreichend gut ausgeprägt sind. Beim Direct Manufacturing entsteht das fertige Endprodukt. Die Herstellung von Werkzeugen, also das Rapid Tooling, ist die Anwendung der Additiven Verfahren für

den Bau von Endprodukten, die als Werkzeuge, Formen oder Formgeometrien verwendet werden [6].

Im Bereich des Werkzeugbaus, sowie bei der Herstellung von Endprodukten wird häufig das Laser-Strahl-Schmelzen (LBM von Laser Beam Melting) angewandt. LBM ist ein pulverbettbasierter Prozess, bei dem das Pulver selektiv mittels eines Laserstrahls aufgeschmolzen wird, um dichte Bauteile zu erzeugen. Der Aufbau des Bauteils erfolgt von unten nach oben. Das Fertigungsprinzip ist in Abbildung 3 dargestellt.

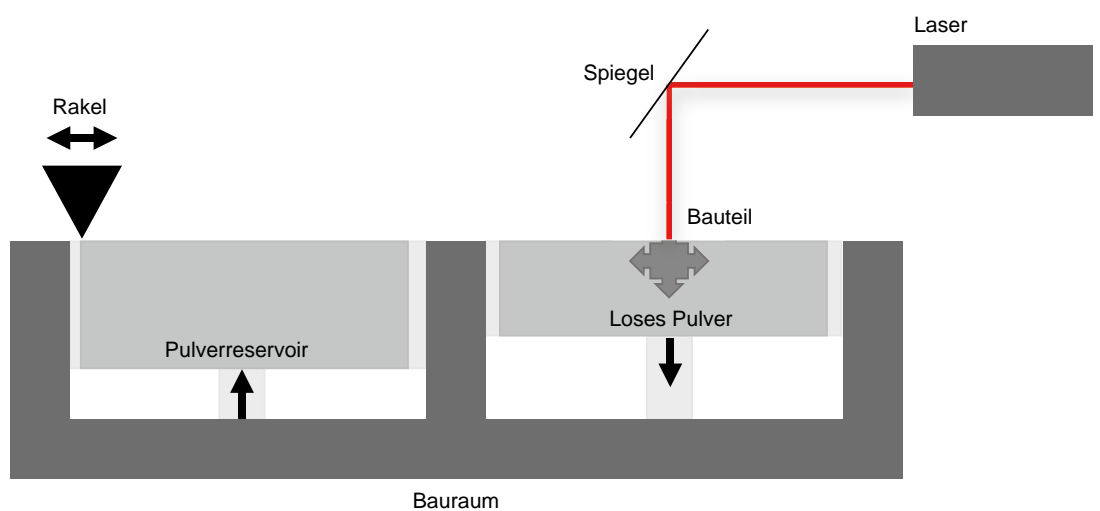


Abb. 3: Prinzip des LBM-Prozesses nach [26].

Bei der Laserführung stehen verschiedene Belichtungsstrategien zur Verfügung. Typischerweise werden die in Abbildung 4 gezeigten Strategien verwendet. Bei der Standardstrategie (a) wird die Schicht in einfachen Vektoren abgefahren, beginnend in einer Ecke des Bauteils. Bei der Streifenstrategie (b) wird die zu belichtende Fläche

in einzelne Streifen eingeteilt. Die auch in Abbildung 5 gezeigte Strategie nennt sich Schachbrettbelichtung (c). Dabei werden die einzelnen Schichten in Quadrate unterteilt, die in einer Schicht statistisch verteilt aufgeschmolzen werden.

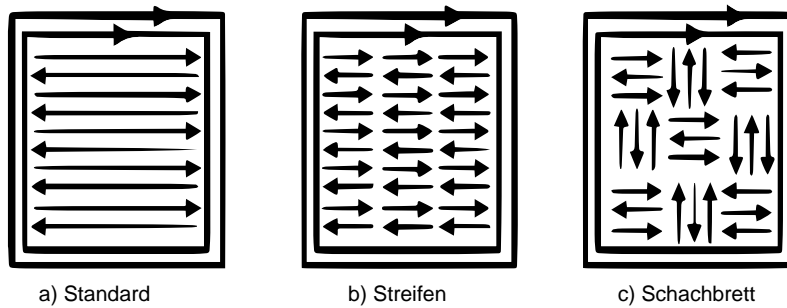


Abb. 4: Typische Belichtungsstrategien [10].

Der verwendete Belichtungstyp hat maßgeblichen Einfluss auf das Gefüge des Bauteils. Streifen- und Schachbrettbelichtung haben den Vorteil, dass in der Regel, im Vergleich zur Standardbelichtung, geringere Eigenspannungen in das Bauteil eingebracht werden. Die Vertei-

lung der Wärme in das Bauteil verhindert zudem, dass der Wärmeeintrag zu stark auf einen Bereich des Bauteils konzentriert wird. Die Belichtungszeit bleibt selbst bei geänderter Bauteilgeometrie konstant [11].

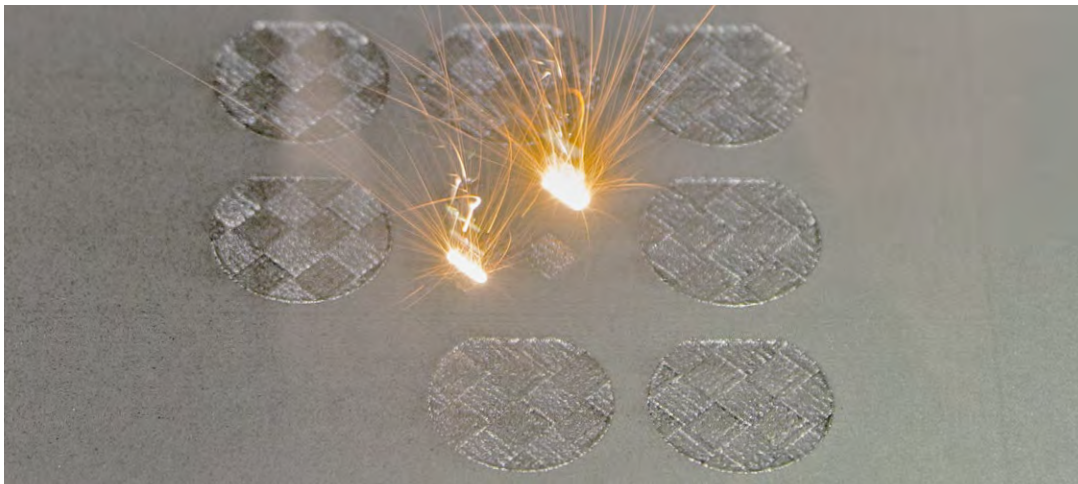


Abb. 5: Darstellung der Schachbrettbelichtung bei der Fertigung des Schneidplattenbohrers QTD von MAPAL. Die Flächen, die aufgeschmolzen werden, sind in Quadrate unterteilt, um den Wärmehaushalt zu kontrollieren.

Außerdem werden verschiedene Parametereinstellung für die Außenkonturen und die Innenbereiche verwendet, da sich die Wärmeleitbedingungen in diesen beiden Bauteilbereichen aufgrund der stark verringerten Wärmeleitfähigkeit des Pulverwerkstoffs unterscheiden. Nach einem Bauprozess kann ein Großteil des nicht aufgeschmolzenen Pulvers wiederverwendet werden, sodass der Werkstoffverlust begrenzt ist.

Bei vielen Additiven Fertigungsverfahren ist der Bauraum beschränkt. Allerdings können heute beim LBM-Prozess Bauraumgrößen von meist bis zu 800 x 400 x 500 mm³ realisiert werden [12].

In den Anfängen der Additiven Fertigung dominierten vor allem Polymere den Markt. Heute sind auch Metalle und Keramiken prozessierbar und dringen immer weiter in den industriellen Standard vor [13]. Viele Metalle gelten als, mittels Laser-Strahl-Schmelzen, kommerziell verar-

beitbar, so dass davon ausgegangen werden kann, dass relative Dichten von bis zu 100 Prozent erreicht werden können [8].

Handelsübliche Legierungen sind begrenzt, aber die Auswahl wird kontinuierlich erweitert. Typische verwendete metallische Werkstoffe und Legierungen sind beispielsweise:

- reines Titan und Ti6Al4V,
- verschiedene Stähle: 316L (Edelstahl), 17-4PH (Edelstahl) und 18Ni300 (Werkzeugstahl)
- Aluminiumlegierungen: AlSi10Mg, AlSi7Mg, AlSi9Cu3, Scalmalloy® und AlSi12CuNiMg
- Cobalt-Chrom-Legierungen: CoCrMo und CoCr
- Nickelbasislegierungen: Hastelloy x, Haynes 282, Inconel 718 und Inconel 625.

Auch Edelmetalle wie Gold, Silber oder Platin lassen sich mittels Laser-Strahl-Schmelzen verarbeiten [14, 15].

Werkzeugherstellung mittels Additiver Fertigung

Werkzeugherstellung mittels Additiver Fertigung

Während bei konventionellen Fertigungsverfahren die Werkzeugherstellung oft durch Maschinenaufspannungen, Werkzeuge oder Fertigungsmittel beeinträchtigt wird, bietet die Additive Fertigung in diesem Bereich viele Vorteile und Freiheiten. Bauteile werden nahezu ohne den Einsatz von Werkzeugen gefertigt, wodurch ganz neue Möglichkeiten bei der Herstellung entstehen. So sind komplexe Geometrien gestaltbar und die Flexibilität der Formgebung steigt. Bei Bohrern können beispielsweise gewendelte Kühlkanalbohrungen sowie Wechsel zwischen gewendelten und geraden Kühlkanälen realisiert werden. Auch die Einbringung von Kühlkanälen bei kleineren Werkzeugdurchmessern ist möglich. Außerdem kann durch eine angepasste Konstruktion masseärmer produziert werden. Andere Vorteile sind das Potenzial zur Fertigung von hybriden Bauteilen, die Umsetzung von innerem Wuchten sowie die genauere Verteilung des Materials und das Durchführen von Reparaturen an existierenden Bauteilen.

Die Umsetzung der Vorteile lässt sich durch die LBM-Technologie bereits im großen Maße realisieren. So werden Werkzeuge heute schon oftmals serienreif additiv gefertigt.

Eine Integration von Funktionen und die Optimierung des Werkzeugs demonstriert das Beispiel des Schneidplattenbohrers QTD (Abbildung 6). Üblicherweise wird bei den Werkzeuggrundkörpern mit konstanter Spiralsteigung für Schneidplattenbohrer das Kühlmittel zentral nach vorne geführt und über eine Ypsilon-Gabelung an die Schneiden verteilt. Je kleiner der Grundkörper ist, desto mehr beeinträchtigt diese Kühlmittelführung die Leistungsfähigkeit des Werkzeugs. Denn durch die zentrale Führung wird der Kern des Bohrers geschwächt und somit instabil. Darüber hinaus müssen die Kühlkanäle zunehmend kleiner ausgeführt werden, was einen abnehmenden Durchfluss des Kühlmittels bis nach vorne an die Schneide zur Folge hat. Dank der Additiven Fertigung können diese Bohrer nun auch in kleineren Durchmessern, als es konventionell bislang möglich war, gefertigt werden. Die Kühlkanäle werden gewendelt angeordnet. In Verbindung mit von der Kreisform abweichenden Kühlkanalprofilen kann der Kühlmitteldurchfluss sogar noch gesteigert werden. Bei den additiv gefertigten Bohrern wird der Körper mittels LBM auf einen konventionell gefertigten Zylinderschaft aufgesetzt [28].

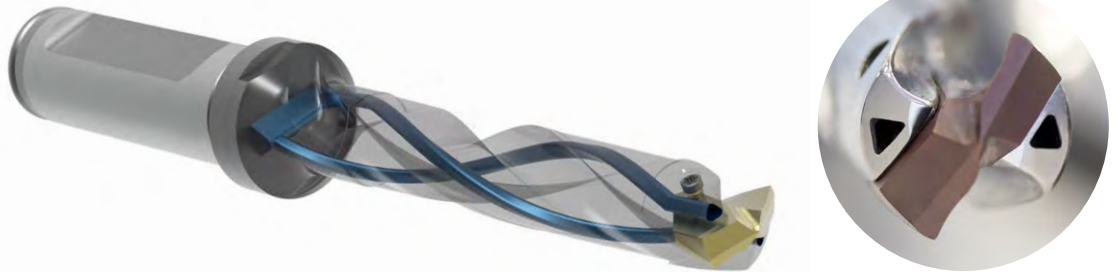


Abb. 6: Schneidplattenbohrer QTD von MAPAL mit von der Kreisform abweichendem Kühlkanalprofil zur Steigerung des Kühlmitteldurchflusses und gewendelten Kühlkanälen.

Auch der Faktor der Massereduktion ist für die Serienanwendung bereits etabliert. Ist beispielsweise eine Außenreibahle zu schwer, kann dies ihre Funktionalität beeinflussen. Zu viel Masse des Werkzeugs resultiert in Trägheit und führt somit zu einer Einschränkung der Schnittgeschwindigkeiten. Deshalb trägt eine Werkstoffeinsparung zur Produktivitätssteigerung des Werkzeugs bei, denn die Werkzeugführung kann dadurch deutlich

schneller und mit höherer Genauigkeit erfolgen. Besonders bei der Bearbeitung von Wellen mit kleinen Durchmessern ist somit eine verbesserte Produktivität erreichbar. Durch die in Abbildung 7 gezeigte Rippenstruktur kann die Masse der Außenreibahle, im Vergleich zu konventionell gefertigten Reibahlen, um mehr als die Hälfte reduziert werden [16].



Abb. 7: Massenreduktion einer MAPAL-Außenreibahle von 390 g auf 172 g durch speziell entwickelte Rippenstruktur im Inneren des Werkzeugs.

Auch bei der Hydrodehnstechnologie kann die Additive Fertigung zu einer Steigerung der Funktionalität beziehungsweise zu einem erweiterten Einsatzfeld führen. Spannfüter stellen die Verbindung zwischen Maschine und Werkzeug her. Hierbei müssen viele verschiedene Anforderungen erfüllt werden. Die optimale Verbindung zwischen Genauigkeit, Prozesssicherheit und Flexibilität sowie Wirtschaftlichkeit zu finden, ist nicht trivial. Es existieren verschiedene Lösungsansätze für diese unterschiedlichen Problemstellungen. Hydrodehnspannfutter liegen vor allem in Bezug auf die Genauigkeit vorn. Allerdings stellt die Lötverbindung, die bei der konventionellen Herstellung dieser Spannfutter als Verbindung zwischen Grundkörper und Dehnbuchse bislang erforderlich war, einen limitierenden Faktor für die Temperaturbeständigkeit und die Drehmomentübertragung dar.

Die Betriebstemperatur der Hydrodehnspannfutter liegt aufgrund der Lötstelle bei maximal 50 °C. Treten höhere Temperaturen auf, führt dies zu einem Anstieg des Drucks im Futter. Der Ausdehnungskoeffizient des Öls im Inneren ist um das 50-fache höher als der Ausdehnungskoeffizient von Stahl. Dadurch entsteht ein Überdruck im Inneren, der die Lötverbindung zerstört.

Durch die Herstellung eines in Abbildung 8 dargestellten, additiv gefertigten Hydrodehnspannfutters, das HighTorque Chuck mit schlanker Kontur (HTC), erweitert sich das Anwendungsspektrum und es verbessert die Prozesssicherheit. Durch die Additive Fertigung kann man auf die Lötverbindung verzichten. Die Dehnbuchse kann direkt „eingedrückt“ werden. Damit erhöht sich die maximale Betriebstemperatur.

Optimaler Rundlauf, da der Spannbereich nahe an der Futterspitze positioniert ist

Hohe Drehmomentübertragung und Temperaturbeständigkeit

Verjüngung von 3° in der Außenkontur ermöglicht Bearbeitungen im konturkritischen Bereich

Alles aus einem Guss – keine Lötverbindung zwischen Buchse und Grundkörper

Hohe Biegefestigkeit trotz schmaler Bauweise

Einfaches und schnelles Spannen dank Sechskantschraube

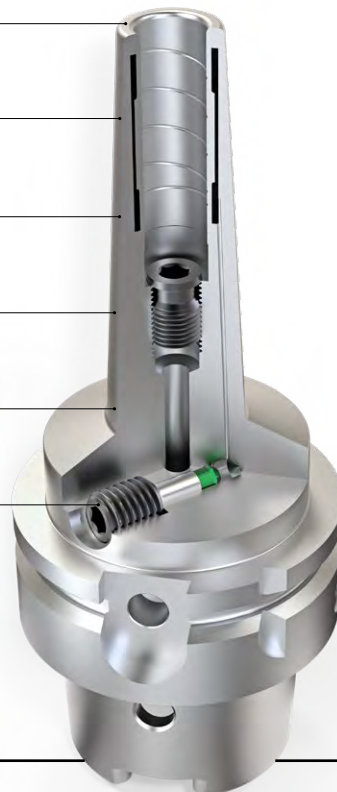


Abb. 8: HTC-Futter von MAPAL mit optimierter Funktion.

Außerdem kann durch die Additive Fertigung die lange, schlanke Kontur des HTC mit einer Verjüngung von drei Grad verwirklicht werden. Diese Kontur war bisher Schruppfuttern vorbehalten. Dadurch wurde das Anwendungsgebiet von Hydrodehnspannfuttern erweitert, beispielsweise im Bereich konturkritischer Bearbeitungen und schwieriger Zugänglichkeiten bei der Zerspanung.

Die Kontur bietet zudem den Vorteil, dass in vielen Fällen auf Sonderwerkzeuge mit langer Auskrägung verzichtet werden kann. In kürzerer Standardausführung sind die

Werkzeuge günstiger und durch die kurze Schaftlänge können höhere Schnittwerte gefahren werden. Außerdem verringert sich die Schwingungsneigung, was zu einer verbesserten Oberflächengüte führt. Auch die Werkzeugstandzeit wird erhöht.

Es ist also schon heute möglich, die Additive Fertigung in der Serienproduktion zu verwenden und optimierte Werkzeuge mit neuer Auslegung oder integrierten Funktionen herzustellen.

Herausforderung der Additiven Fertigung bei der Werkzeugherstellung

Herausforderung der Additiven Fertigung bei der Werkzeugherstellung

Die Herausforderungen der Additiven Fertigung beziehen sich nicht nur auf die neuartige Auslegung von Bauteilen, es existieren zudem Grenzen, die es zukünftig zu überwinden gilt. Vor allem die Qualität der additiv gefertigten Bauteile bietet Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Oberflächengüte, Anisotropieeffekten und Einschränkungen in der Maßhaltigkeit. Aufgrund des Schichtbauprinzips entstehen Stufen in z-Richtung. Je flacher der Aufbau ist, desto ausgeprägter zeigt sich dieser Effekt. Wird die Schichtdicke reduziert, kann der sogenannte Treppenstufeneffekt verringert werden. Eine komplette Beseitigung ist allerdings nicht möglich. Folglich ist bei höherer geforderter Oberflächengüte eine Nachbearbeitung notwendig. Diese kann entweder durch eine Oberflächenglättung oder durch eine Beschichtung erfolgen [6]. Zudem hat die Körnung des Pulvers Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit [7]. Beim Aufschmelzen des Pulvers kann es zum Anschmelzen von benachbartem Pulver kommen, das dann an der Oberfläche anhaftet. Dies erfordert ebenfalls eine Nachbearbeitung des Bauteils. Das element- oder schichtweise Aufbauen in eine Richtung führt zu Anisotropieeffekten bezüglich der mechanischen Eigenschaften und der Gefügestruktur. So ist die Festigkeit in z-Richtung (Aufbauichtung) in der Regel am geringsten [17]. Je höher die Anzahl der Schichten ist, desto größer ist das Potenzial für eine fehlerhafte Schichtaufbringung oder unzureichenden Pulverauftrag. Auch ein homogenes Gefüge kann aufgrund des vorgegebenen Temperaturgradienten nur eingeschränkt erzeugt werden [18].

Ebenso zeigt der Prozess an sich einige Einschränkungen. So ist die Bauteilgröße durch den Bauraum begrenzt und die Werkstoffeigenschaften beeinflussen den Prozess. Mehrere Faktoren spielen hierbei eine Rolle. Die Schweißbarkeit und Gießbarkeit der Metalle muss in der Regel gegeben sein, nur dann ist der metallische Werkstoff erfolgreich mittels Laser-Strahl-Schmelzen verarbeitet [14]. Zudem sollte das Pulver in sphärischer Form und in einer bestimmten Größenverteilung vorliegen. Um eine gute Schüttdichte des Pulvers zu gewährleisten, ist eine bimodale Partikelgrößenverteilung anzustreben. Eine enge Partikelgrößenverteilung sorgt allerdings für eine bessere Fließfähigkeit des Pulvers [19]. Die Schmelzzone im Bauteil während des LBM-Prozesses ist signifikant kleiner als das fertige Endprodukt (typischerweise 10^2 bis 10^4 mal). Diese lokalen heißen Bereiche stehen im direkten Kontakt mit dem kälteren Ausgangspulver. Dies führt zu thermischen Gradienten und damit zu Eigenspannungen und Verzug sowie zu einer unregelmäßigen Mikrostruktur [14]. Dies wirkt sich negativ auf die Maßhaltigkeit von Bauteilen aus. Auch beim Aufschmelzen von geraden Flächen spielen der Temperatureintrag und die Temperaturgradienten eine Rolle. Die Folge ist der sogenannte Temperaturgradientenmechanismus. Dabei wölbt sich der schon abgekühlte Teil des Werkstücks dem noch warmen Teil entgegen und das

gesamte Bauteil verzieht sich [11]. Um thermischem Verzug entgegenzuwirken, kann die Bauplattform vorgewärmt werden. Dies erhöht die Prozesssicherheit und verbessert die Bauteilqualität und die Maßhaltigkeit. Außerdem kann bei der Verwendung einer Vorheizung auf einen Teil der Stützstrukturen verzichtet werden, was zur Reduktion der Prozesszeit, des Nachbearbeitungsaufwands und des Werkstoffverbrauchs führt. Die gewünschte Vorwärmtemperatur hängt vom Werkstoff ab und variiert zwischen 150 und 1800 °C. Heute sind allerdings erst Anlagen mit Vorwärmtemperaturen von typischerweise 500 °C industriell verfügbar [20].

Der Prozess beeinflusst zudem die erreichbare Genauigkeit. So begrenzen die Pulverkorngröße sowie die Strahlbreite des Lasers die Auflösung des Prozesses. Die Auflösung, also die Maß- und Formgenauigkeit, die bis jetzt erreicht werden kann, ist typischerweise größer als 50 µm [20]. Auch die Rauheit der Oberfläche ist vom Prozess beeinflusst. Aktuell ist beim Laser-Strahl-Schmelzen ein minimaler Rauheitswert R_a von etwa 10 µm erreichbar [20]. Dies ist aber zumeist unzureichend für Funktionsflächen oder Bereiche, die dynamisch belastet werden, da die Oberflächenrauheit Kerbwirkung bei der Belastung auslöst. Es existieren auch Geometrien, die generell nicht, beziehungsweise nur mit sehr viel Nachbearbeitung oder Aufwand, additiv gefertigt werden können. Gewinde, Passbohrungen und Passflächen bedürfen sehr stark der Genauigkeit und somit einer hohen Auflösung des Prozesses. Um die Anforderungen an solche Merkmale zu erfüllen, ist zumeist eine Nachbearbeitung erforderlich. Für Überhänge ab einem Winkel zwischen Aufbauichtung und der Bauplatte von häufig über 45° sind Stützstrukturen erforderlich. Diese sorgen zum einen für eine Abstützung der Überhangstrukturen und zum anderen gewährleisten sie die Anbindung des Bauteils an die Bauplattform. Dadurch können Bereiche ohne Anbindung befestigt werden und Wärme wird abgeführt, um Eigenspannungen und Wärmespannungen entgegenzuwirken und Verzug zu vermeiden. Sollten Reparaturen an Bauteilen notwendig sein, dann können diese nur von planaren Flächen aus realisiert werden.

Nicht nur die Genauigkeit ist beschränkt, sondern auch die Aufbauraten. Je besser die Oberflächenqualität sein soll, desto geringer muss die Schichtdicke gewählt werden. Dies verlangsamt wiederum die Aufbauraten. Auch die Beschränkung der Nutzung auf nur einen Laser hat langsamere Aufbauraten zur Folge. Die Verwendung von Mehrlasersystemen kann die Aufbauraten beschleunigen. Andererseits sind dabei die Maschinenstundensätze höher als bei den weit verbreiteten Ein-Laser-Systemen [25].

In der Regel können Additive Verfahren bei hohen zu produzierenden Stückzahlen nicht mit den Herstellkosten herkömmlicher und etablierter Produktionstechnologien für

Herausforderung der Additiven Fertigung bei der Werkzeugherstellung

die Massenproduktion konkurrieren. Um eine wirtschaftliche Anwendung dennoch zu garantieren, muss sichergestellt werden, dass ein Mehrwert bei der Additiven Produktion vorhanden ist. Ansätze dafür gibt es viele. Werden schwer zerspanbare oder wertvolle Werkstoffe verarbeitet, so steigt die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu herkömmlichen Zerspanungsprozessen an [6], da der Werkstoffverlust durch die Additive Bauweise verringert werden kann. Auch dann wenn Kleinserien oder Einzelstücke gefordert sind, kann die Additive Fertigung durch eine Reduktion oder eine Vermeidung extra hergestellter Werkzeuge oder Formen einen Vorteil erwirken (siehe Abbildung 9) [13]. Die höheren Kosten bei der Additiven Fertigung, die beispielsweise durch einen erhöhten Konstruktionsaufwand und neue Konstruktionsrichtlinien sowie die Nachbearbeitung

entstehen, können durch den Zuwachs an Funktionserfüllung der additiv gefertigten Teile kompensiert werden [21].

Die Wirtschaftlichkeit steigt oft erst während der Nutzungsphase oder nach dem Herstellungsprozess der Bauteile. Kostenintensive, additiv gefertigte Leichtbauelemente für die Luft- und Raumfahrttechnik können beispielsweise zu einer erheblichen Einsparung bei Kosten im Flugbetrieb führen [8]. Weitere Aspekte zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit können eine größere Auswahl von Werkstoffen, die bei hoch beanspruchten Bauteilen den Lebenszyklus verlängern oder das Wegfallen von aufwendigen Montagearbeiten sein. Durch Funktionsintegration verringert sich unter Umständen der Montageaufwand erheblich [22].

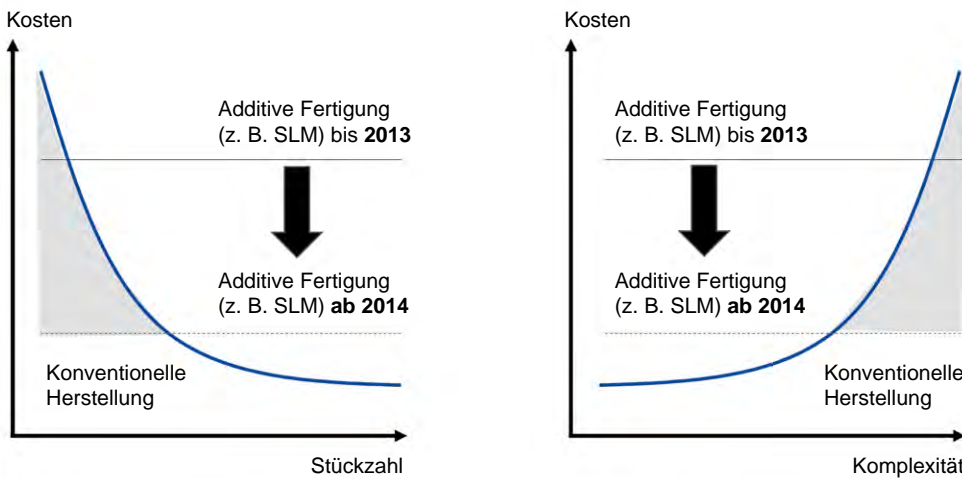


Abb. 9: Vergleich von konventioneller Herstellung und Additiver Fertigung in Bezug auf Kosten über Stückzahl und geometrische Komplexität des Bauteils nach Roland Berger [22] und [27].

Das vollständige Ersetzen der konventionellen Fertigungstechnologien durch die Additive Fertigung ist aus heutiger Sicht nicht zu erwarten. Eine Kombination aus Additiver und konventioneller Fertigung kann zum bestmöglichen Erreichen von wirtschaftlichen und funktionellen Zielen führen. So bietet die Hybridbauweise eine Möglichkeit, ein Bauteil aus einer konventionell und kostengünstig gefertigten Basis und dem Aufsatz eines additiv gefertigten komplexen Teils mit gezielter Funktionsintegration zu erzeugen.

Abbildung 10 Variante a zeigt ein Beispiel für die Hybridbauweise. Abgebildet ist das Hydrodehnspannfutter High-Torque Chuck mit schlanker Kontur (HTC). Der Grundkörper wird konventionell gefertigt. Die Futterspitze und damit der Funktionsbereich wird additiv mit dem LBM-

Prozess aufgetragen. Der Anteil des additiv gefertigten Bereichs des Bauteils beeinflusst die Wirtschaftlichkeit. Je größer der Anteil ist, desto mehr spielen Pulver- und Anlagenkosten eine Rolle. Ein Vergleich ist in Abbildung 10 dargestellt. Während bei Variante a die komplette Futterspitze additiv aufgebaut wird, ist bei Variante b nur der obere Teil additiv gefertigt. Durch diese Änderung am Bauteil wird das Bauvolumen für die Additive Fertigung verringert und es wird weniger Pulver benötigt. Die Anlagenhauptzeit reduziert sich von 22 auf sieben Stunden pro Fahrt. Dies hat wiederum positive Auswirkungen auf die Anlagenkosten und die mögliche Anzahl an Baujobs pro Tag. Insgesamt reduzieren sich die Kosten auf etwa ein Drittel für das Bauteil, die Wirtschaftlichkeit steigt, ohne dass die Funktionalität eingeschränkt wird.

Herausforderung der Additiven Fertigung bei der Werkzeugherstellung

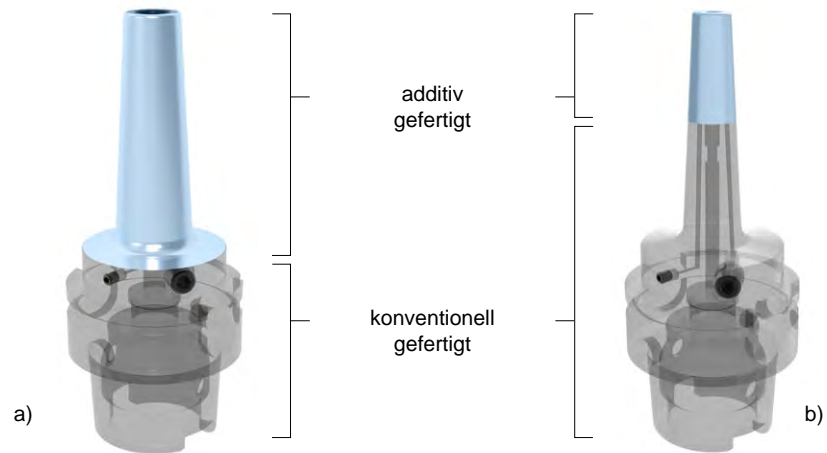


Abb. 10: Hybridbauweise eines von MAPAL hergestellten HTC-Futters. Das additiv gefertigte Teilstück wurde reduziert, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern ohne dabei die Funktionalität zu beeinträchtigen.

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Die Additive Fertigung wird zukünftig stark an Bedeutung im Umfeld der Entwicklung und Produktion gewinnen. Vor allem im Bereich der Werkzeugherstellung ist die Technologie der Additiven Fertigung bereits heute serientauglich. Konstruktiver Leichtbau, Funktionsintegration und inneres Wuchten können vorteilhaft bei der Herstellung von Werkzeugen umgesetzt werden. Stahlgrundkörper können inzwischen ohne Festigkeitsnachteile aufgebaut werden und die Fertigungsrahmenbedingungen sind erarbeitet und im Serieneinsatz erprobt. Im Vergleich zu konventionellen Fertigungstechnologien existieren noch Einschränkungen in Bezug auf Kosten und Qualität, aber der Mehrwert, den die Additive Fertigung bieten kann, wurde von der Industrie erkannt und ist teilweise bis zur Serienfertigung umgesetzt.

Es besteht allerdings nach wie vor an verschiedenen Stellen Verbesserungsbedarf. Flächen und Geometrielemente mit hohen Genauigkeitsanforderungen müssen konventionell nachgearbeitet werden. Auch für die Oberflächenbehandlung liegt bisher keine hinreichende industrielle Lösung vor, die eine aufwendige Nachbehandlung durch spanende Bearbeitung ersetzen kann. Allerdings gibt es Ansätze, wie das Laserpolieren, die die Nachbearbeitung von komplexen Bauteilen ermöglichen. Beim Laserpolieren wird eine dünne Randschicht des Bauteils umgeschmolzen und es erfolgt eine Glättung der Oberfläche aufgrund von Grenzflächenspannungen. So können Funktionsflächen ohne Materialabtrag umgesetzt werden [23].

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit ist es notwendig, Aufbauarten zu verbessern. Hierzu zählen auch die Entwicklung neuer und schnellerer Belichtungs- und Aufbaustrategien sowie der Ausbau von Mehrlaserkonzepten. Erste Hersteller

haben beispielsweise angekündigt, 12-Laser-Maschinen in den kommenden Jahren auf den Markt zu bringen [24]. Um den Anwendungsbereich der Additiven Fertigung auszuweiten, ist es außerdem wichtig, neue Werkstoffe prozesssicher zu qualifizieren und das Werkstoffspektrum somit zu erweitern. Ebenso stellt die Optimierung von der existierenden Prozessführung einen wichtigen Punkt dar. So soll erlangtes Wissen, beispielsweise über Machine-Learning-Ansätze, automatisiert in die Prozessauslegung für neue Bauteile einfließen und zur Verbesserung von Prozessparametern und somit auch zur Verbesserung der Bauteilqualität beitragen. Auch bezüglich der Maßhaltigkeit liegen Ansätze vor, die komplizierten Testdrucke zu reduzieren. So kann mittels Aufbauprozesssimulation das Temperaturfeld und das mechanische Antwortverhalten des Bauteils mit Einschränkungen prognostiziert werden. Mit den ermittelten Daten ist es teilweise möglich Bauteile mit Vordeformation zu konstruieren, die die vorgegebene Maßhaltigkeit erfüllen [24].

Neben den notwendigen technologischen Weiterentwicklungen in der Additiven Fertigung liegt es an den Technologienutzern selbst, die vorhandenen Potenziale bei der Neuentwicklung von Produkten besser zu berücksichtigen. Hierzu ist ein Umdenken bei der Konstruktion erforderlich. Für die Auslegung von Bauteilen müssen die Konstruktionsrichtlinien der Additiven Fertigung verinnerlicht werden, um einen Mehrwert generieren zu können.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Additive Fertigung die konventionellen Technologien auf absehbare Zeit nicht ersetzen, aber wertvoll ergänzen wird. Im Besonderen für die Herstellung von Präzisionswerkzeugen liegt großes Potenzial vor, das bis heute nur teilweise erschlossen wurde.

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen (Additive Manufacturing Processes, Rapid Manufacturing Basics, Definitions, Processes), Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [2] Wohlers, T.: Wohlers Report 2018, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Colorado, Wohlers Associates, 2018.
- [3] Seidel, C.: 2018, Additive Manufacturing – Market Development and Challenges of Technology Implementation, International VDI Conference – Additive Manufacturing, Talk Amsterdam, 25.04.2018
- [4] Seidel, C.: Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen, Diss., TU München, München, Utz, 2016.
- [5] Ernst & Young GmbH: How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain? EY's Global 3D printing Report 2016, [www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-3ddruck-studie-executive-summary/\\$FILE/ey-how-will-3d-printing-make-your-company-the-strongest-link-in-the-value-chain.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-3ddruck-studie-executive-summary/$FILE/ey-how-will-3d-printing-make-your-company-the-strongest-link-in-the-value-chain.pdf) [Stand: 16.07.2018]
- [6] VDI: Handlungsfelder – Additive Fertigungsverfahren, Online-Publikation, 2016. <http://www.vdi.de/HandlungsfelderAM> [Stand: 23.07.2018]
- [7] Gebhardt A.: Generative Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing) 4. Auflage, München, Carl Hanser, 2013.
- [8] Wohlers, T.: Wohlers Report 2017, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Colorado, Wohlers Associates, 2017.
- [9] Fraunhofer IGCV, Augsburg
- [10] Kranz, J.: Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen, Diss., TU Hamburg-Harburg, Hamburg, Springer Vieweg, 2017.
- [11] Krauss, H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung, Diss., TU München, München, Utz, 2017.
- [12] Concept Laser GmbH, <https://www.concept-laser.de/produkte/maschinen.html> [Stand: 20.07.2018]
- [13] Neugebauer, R.: Digitalisierung, Springer-Verlag GmbH, Berlin Heidelberg, 2017.
- [14] Bourell, D. et al.: Materials for additive manufacturing, CIRP Annals, 66. Jg., Nr. 2, S. 659-681, 2017.
- [15] citim GmbH, <http://www.citim.de/de/Additive-Fertigung-Metall> [Stand: 08.06.2018]
- [16] MAPAL Dr. Kress KG, <https://www.mapal.com/aktuelles/neuheiten-und-highlights/lasergeresinterte-aussenreibahlen/> [Stand:23.07.2018]
- [17] Kollenberg, W.: Prüfkonzepte in der Additiven Fertigung, WZR ceramic solutions GmbH, Rheinbach, 2016.
- [18] Sehrt, J., Witt, G.: Auswirkung des anisotropen Gefüges strahlgeschmolzener Bauteile auf mechanische Eigenschaftswerte, RTEjournal-Forum für Rapid Technologie, 2009.
- [19] Sander, J.: Selektives Laserschmelzen hochfester Werkzeugstähle, Diss., TU Dresden, Dresden, 2017.
- [20] Bever, E. et al.: WLT-Whitepaper: Generative Fertigung, 2012.
- [21] MAPAL, Additive Fertigung Präzisionswerkzeuge Neu Denken, Präsentation, Aalen, 2018.
- [22] Roland Berger Strategy Consultants GmbH, Additive Manufacturing – A game changer for the manufacturing industry?, München, 2013. https://www.rolandberger.com/de/Publications/pub_additive_manufacturing_2013.html [Stand: 20.07.2018]
- [23] Fraunhofer IIT, www.ilt.fraunhofer.de/cotent/dam/ilt/de/documents/.../HZ_JB13_65.pdf, 2014. [Stand: 08.06.2018]
- [24] Metal-AM, Pressemeldung 18.05.2018 SLM Solution reports new twelve-laser machine on track for 2019 launch, <http://www.metal-am.com/slm-solutions-reports-new-twelve-laser-machine-on-track-for-2019-launch/>, 2018. [Stand: 16.07.2018]
- [25] Wohlers, T.: Wohlers Report 2014, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Colorado, Wohlers Associates, 2014.
- [26] Hartmann, W. et al.: Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz optischer Messsysteme zur In-Line-Prüfung additiv gefertigter Bauteile, RTEjournal-Forum für Rapid Technologie, 2012.
- [27] RWTH Aachen, <http://www.produktionstechnik.rwth-aachen.de/cms/Produktionstechnik/Forschung/Demonstratoren/~gvto/Selective-Laser-Melting/> [Stand: 20.07.2018]
- [28] MAPAL Dr. Kress KG, https://www.mapal.com/fileadmin/00_PDF.../de/Schneidplattenboher_QTD-de.pdf [Stand:23.07.2018]

Literaturverzeichnis

Prof. Dr. Michael F. Zäh

ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwB der Technischen Universität München

Dr. Christian Seidel

ist Mitglied der Leitung des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwB der Technischen Universität München und Leiter Additive Fertigung bei Fraunhofer IGCV
info@iwB.mw.tum.de

Dr. Dirk Sellmer

ist Vice President Research and Development bei der MAPAL Dr. Kress KG.
dirk.sellmer@mapal.com

Impressum

Herausgeber:

MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG
Postfach 1520 | 73405 Aalen
Telefon 07361 585-0 | Telefax 07361 585-1029
info@mapal.com | www.mapal.com

Verantwortlich für den Inhalt: Andreas Enzenbach
© MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG
Nachdruck, auch auszugsweise, nur nach Genehmigung des Herausgebers.

Impressum



Bisher erschienen:

TECHNOLOGIE REPORT

- 01 | Interpolationsdrehen
- 02 | Energieeffizienz
- 03 | Minimalmengenschmierung
- 04 | Trochoides Fräsen
- 05 | Thermische Spritzschichten
- 06 | Volumenfräsen
- 07 | Feinbearbeitung von Funktionsflächen in Graugusswerkstoffen
- 08 | Additive Fertigung