



Handlungsfelder

Additive Fertigungsverfahren

April 2016

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Was sind additive Fertigungsverfahren?	4
3	Was leisten additive Fertigungsverfahren heute?	6
4	Wer nutzt additive Fertigungsverfahren?	9
4.1	Luft- und Raumfahrtindustrie	9
4.2	Werkzeug- und Formenbau	9
4.3	Elektro- und Elektronikindustrie	10
4.4	Automobilindustrie	10
4.5	Gießereitechnik	11
4.6	Automatisierungstechnik, Maschinen- und Anlagenbau	11
4.7	Montagetechnik	12
4.8	Prothetik	13
4.9	Medizinische Hilfsmittel	13
4.10	Dentaltechnik	13
4.11	Medizinische Ausbildung und Operationsvorbereitung	14
4.12	Spielwarenindustrie und Fertigung von Sammlerstücken	14
4.13	Architektur	14
4.14	Film und Unterhaltung	15
4.15	Kunst	15
4.16	MINT-Unterricht	16
5	Wofür kann ich die additiven Fertigungsverfahren in meinem Betrieb nutzen?	17
5.1	Typische Einsatzgebiete	17
5.2	Wirtschaftliche Aspekte	21
5.3	Systemisches Arbeiten	22
5.4	Neue Geschäftsmodelle	24
6	Handlungsfelder	26
6.1	Technologische Weiterentwicklungen	26
6.2	Arbeitssicherheit	31
6.3	Fortbildung und Schulung	31
6.4	Applikationsforschung	32
6.5	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	32
6.6	Rechtliche Rahmenbedingungen	32

7	Regenerative Medizin und Tissue Engineering: Bioprinting	43
8	Im Bereich „additive Fertigungsverfahren“ aktive Verbände	45
8.1	Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.	45
8.2	Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS	46
8.3	DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.	46
8.4	Fachverband Pulvermetallurgie e.V.	47
8.5	VDMA	47
9	Aktivitäten des VDI	49
9.1	VDI-Fachausschuss „Additive Manufacturing“	49
9.2	Überblick VDI-Richtlinien	50
9.3	Der VDI als Netzwerker	50
10	VDI-Richtlinien in der internationalen Standardisierung	51
	Autoren	53
	Schrifttum	54
	ISBN 978-3-931384-82-1	

1 Einleitung

Mit der Gründung des Fachausschusses „Rapid Prototyping“ im Jahr 2003 und der Veröffentlichung der Richtlinie VDI 3404 im Jahr 2009 als erste technische Regel weltweit zum Thema additive Fertigungsverfahren haben wir, die ehrenamtlichen Mitarbeiter im VDI-Fachausschuss „Additive Manufacturing“, Pionierarbeit geleistet.

Hier in Deutschland haben Universitäten, Forschungseinrichtungen und junge Unternehmen das Potenzial der additiven Fertigungsverfahren sehr früh erkannt und daraus marktfähige Anlagen entwickelt, die von ihren Anwendungen im Prototypenbau den Weg in die Fertigung von Endprodukten gefunden haben. Es ist ein neuer Wirtschaftszweig entstanden, der mit der gesamten Wertschöpfungskette von der Werkstoffherstellung über den Anlagenbau, den additiven Fertigungsverfahren als Dienstleistung und der Integration von additiv gefertigten Bauteilen in neue Produkte in viele Branchen ausstrahlt.

Additive Fertigungsverfahren sind bereit, ihren Platz in den Fertigungshallen neben Mehrachs-Bearbeitungsmaschinen und Spritzgussanlagen einzunehmen. In einigen Unternehmen haben sie diesen Platz heute schon gefunden. Wir zeigen hier das Potenzial der additiven Fertigungsverfahren insbesondere für die mittelständische Industrie in Deutschland auf. Bei der Herstellung von qualitativ hochwertigen Produkten in kleinen Stückzahlen helfen die additiven Fertigungsverfahren, die Produktentwicklungszeiten drastisch zu verkürzen und schneller am Markt zu sein.

Doch wir wollen nicht verleugnen, dass es bei den additiven Fertigungsverfahren noch viel zu verbessern gibt und fassen die wichtigsten „Baustellen“ zusammen. Dabei gehen wir nicht nur auf technische Aspekte zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit ein, sondern auch auf rechtliche. Auch hinsichtlich der Aus- und Fortbildung derjenigen, die additive Fertigungsverfahren nutzen könnten, gibt es noch viel zu tun. Die Frage „Wofür kann ich die additiven Fertigungsverfahren in meinem Betrieb nutzen?“ kann

allzu oft alleine deshalb nicht beantwortet werden, weil Informationen fehlen. Hier geben wir erste Anhaltspunkte zur Orientierung und verweisen auf Quellen, die belastbare Fakten liefern. Hier spielen technische Regeln wie VDI-Richtlinien eine wichtige Rolle.

Die Richtlinien der Reihe VDI 3405 „Additive Fertigungsverfahren“ beschreiben die verschiedenen Technologien allgemein verständlich, erfassen den Stand der Technik und helfen, mit klar definierten Begriffen zu kommunizieren und Leistungsmerkmale zu vergleichen. Wir stellen die bereits veröffentlichten VDI-Richtlinien zu den additiven Fertigungsverfahren vor, berichten über Richtlinienprojekte, die wir aktuell bearbeiten und geben einen Ausblick auf Themen, die wir zukünftig behandeln werden.

Wir, die Forscher, Entwickler und Nutzer der additiven Fertigungsverfahren, stehen vor der Herausforderung, unsere langjährige Erfahrung und unsere hervorragende Wettbewerbsfähigkeit heute zu nutzen, um in diesem Wachstumsmarkt international führend zu bleiben. Durch Verfahrensoptimierungen werden die additiven Fertigungsverfahren für immer mehr Aufgaben wirtschaftlich – daran arbeiten wir. Wir sind überzeugt, dass die additiven Fertigungsverfahren heute schon häufiger in der industriellen Produktion eingesetzt werden können, als dies in Deutschlands Werkshallen praktisch der Fall ist.

Wir möchten den Einstieg in die additiven Verfahren erleichtern und das Interesse an der weiteren Entwicklung dieser Technologie wecken. Wir hoffen, dass diese Publikation dabei eine gute Hilfe ist.



Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt
Vorsitzender des VDI-Fachausschusses
FA 105 „Additive Manufacturing“

2 Was sind additive Fertigungsverfahren?

„Rapid Prototyping“ und „3-D-Druck“ – unter diesen Namen sind die additiven (generativen) Fertigungsverfahren in der Öffentlichkeit bekannt geworden. Unter „additiv“ werden alle Herstellverfahren zusammengefasst, bei denen der Werkstoff zur Erzeugung eines Bauteils schichtweise hinzugefügt wird. Das steht im Gegensatz zu den klassischen subtraktiven Fertigungsverfahren wie Fräsen, Bohren und Drehen, bei denen Material abgetragen wird, um das endgültige Bauteil zu erzeugen. Das Schichtbauprinzip ermöglicht es, geometrisch komplexe Strukturen herzustellen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur aufwendig realisiert werden können.

Rapid Prototyping ist eine Anwendung der additiven Fertigungsverfahren, mit der Modelle und Prototypen hergestellt werden. Diese können bereits wichtige Merkmale und Eigenschaften wie mechanische Festigkeit oder Farbe des späteren Endprodukts haben (Bild 1).



Bild 1. Weiterhin wichtig für eine effiziente Produktentwicklung: die additiven Fertigungsverfahren im Prototypenbau (Quelle: alphacam)

Bei den Extrusionsverfahren Fused Layer Manufacturing (FLM)/Fused Deposition Modelling (FDM) wird ein Kunststoffdraht durch eine beheizte Düse aufgeschmolzen und geometrisch definiert abgelegt. Das Bauteil wächst zusammen, indem punktgenau einzelne Materialstränge Schicht für Schicht dort dosiert werden, wo weiteres Material für das endgültige Bauteil benötigt wird. Dies ist das mit Abstand am weitesten verbreitete Verfahren und findet sowohl bei Privatanwendern/Heimdruckern als auch für den professionellen Einsatz Verwendung.

Bei den pulverbasierten Prozessen wird pulverisiertes Ausgangsmaterial in einer dünnen Schicht auf die Arbeitsfläche auftragen. Beim anschließenden punktgenauen Aufschmelzen mit einem Laser wächst das

aufgeschmolzene Material beim Wiedererstarren mit den darunter liegenden Strukturen und der direkten Nachbarschaft zusammen. Wenn eine Schicht fertig ist, wird wieder eine dünne Schicht frisches Pulver aufgetragen und der Vorgang beginnt von neuem. So wächst das Bauteil aus dem Pulver zusammen (Bild 2).

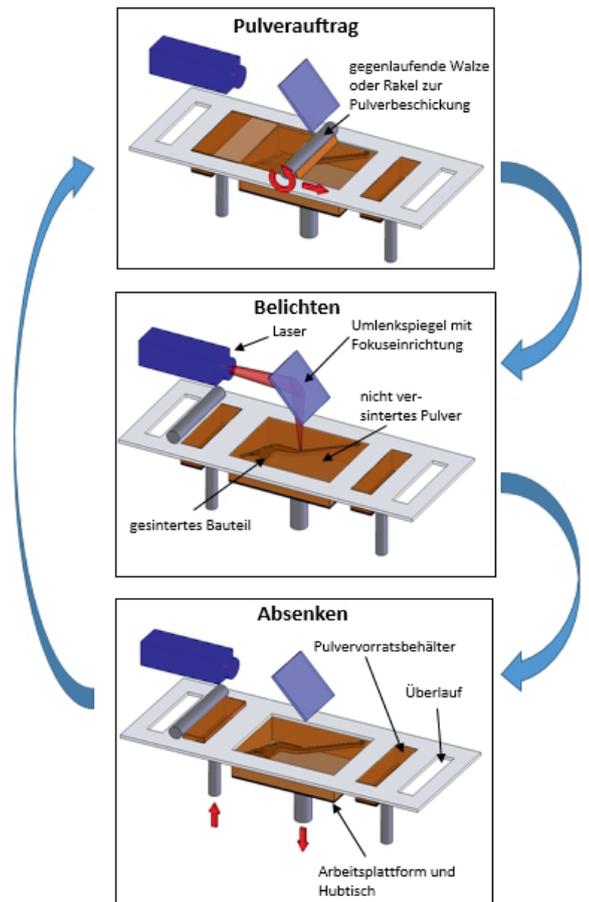


Bild 2. Prinzip der pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren am Beispiel des Laser-Sinterns (Quelle: RTC Universität Duisburg-Essen)

Der Vorteil des Laser-Verfahrens ist, dass es nicht nur mit Kunststoffen funktioniert. Die Verarbeitung von Metallen wird Laser-Strahlschmelzen und die von Kunststoffen Laser-Sintern genannt. Die Bauteile, die so hergestellt werden, weisen so gute mechanische Eigenschaften auf, dass sie als finale Produkte verwendet werden können (Bild 3). Der Prozess wird daher auch „Rapid Manufacturing“ genannt.

Wie schon erwähnt, werden in den Medien oft alle additiven Fertigungsverfahren als 3-D-Druck zusammengefasst. Experten verstehen darunter aber oft nur

ein spezielles Verfahren, bei dem wie bei den pulverbasierten Prozessen loses Partikelmaterial gleichmäßig auf die gesamte Baubreite aufgetragen wird. Wo das Bauteil entstehen soll, wird hier per Druckkopf Bindemittel aufgetragen, das die jeweils zuletzt aufgetragene Schicht benetzt und mit der darunter liegenden verbindet. Es können unterschiedliche Werkstoffe, so auch Keramiken, mit diesem Verfahren verarbeitet werden. Industriell relevant ist die Möglichkeit, mit diesem Verfahren Sandformen für den Metallguss herzustellen.

Eine genaue Beschreibung der verschiedenen Prozesse und Verfahren, die unter dem Begriff „Additive Fertigungsverfahren“ zusammengefasst werden, findet sich in der Richtlinie VDI 3405.



Bild 3. Gebogener Schieber (links) aus Stahl mit innen liegender Küh-lung (rechts, skizziert) (Quelle: Gregor Jell Werkzeugelemente)

3 Was leisten additive Fertigungsverfahren heute?

Additive Fertigungsverfahren sind im industriellen Umfeld mit Kunststoffen und Metallen als Werkstoff Stand der Technik. Gussformen oder Formen für andere Abformverfahren werden ebenfalls additiv hergestellt. Keramiken und andere Werkstoffe können additiv verarbeitet werden, doch ist deren Bedeutung für die industrielle Produktion derzeit noch verhältnismäßig gering.

Die auf die Pulverbettverfahren Laser-Strahlschmelzen und Laser-Sintern spezialisierten Anlagenhersteller aus Deutschland wie EOS, Concept Laser und SLM Solutions [1; 2; 3] sind bei der Verarbeitung von metallischen Werkstoffen international führend. Additiv gefertigte Bauteile aus Metall sind für industrielle Anwendungen besonders gut geeignet. Mit metallischen Werkstoffen können additiv Geometrien realisiert werden, die anders nicht herstellbar sind.

Die Richtlinie VDI 3405 Blatt 2 beschreibt die Eigenschaften von metallischen Bauteilen, die mit dem Strahlschmelzen hergestellt wurden, detailliert. Außerdem beschreibt sie Methoden zur Qualitätssicherung und gibt im Anhang Materialkenndaten vom Werkzeugstahl 1.2709 (Bild 3) an. VDI 3405 Blatt 2.1 ergänzt Materialkenndaten von AlSi10Mg (Bild 4).



Bild 4. Kühler aus dem Werkstoff AlSi10Mg.
Quelle: citim GmbH

Das in Bild 5 gezeigte Bauteil ist ein Mischer für Flüssigkeiten, der auch zum Homogenisieren und Wärmetauschen eingesetzt werden kann.



Bild 5. Die Herstellung von geometrisch hoch komplexen Bauteilen mit additiven Fertigungsverfahren wird auch als Dienstleistung angeboten. (Quelle: Gregor Jell Werkzeugelemente)

Laser-Strahlschmelzen und Laser-Sintern sind aber nicht die einzigen Technologien, auf die Unternehmen hierzulande setzen. Die Firma voxeljet [4] ist einer der Marktführer für den 3-D-Druck im industriellen Umfeld. Mit dem ersten kontinuierlich arbeitenden 3 D-Drucker weltweit, den großen Bauräumen (Bild 6) und den hohen Baugeschwindigkeiten sieht sich das Unternehmen in seinem Marktsegment international als Technologieführer.

Beim Arburg Kunststoff-Freiformen [5] bilden handelsübliche, kostengünstige Kunststoffgranulate die Grundlage – einer der Vorteile gegenüber anderen Verfahren der additiven Fertigung. Das Granulat wird ähnlich wie beim Spritzgießen zunächst in einem Plastifizierzylinder aufgeschmolzen. Eine starre Austragseinheit mit spezieller Düse trägt kleinste Kunststofftropfen auf den Bauteilträger auf.

Der bewegliche Bauteilträger wird so positioniert, dass jeder Tropfen auf die vorher berechnete Stelle gesetzt wird. Dabei verbinden sich die winzigen Tropfen beim Abkühlen von selbst. So entsteht Schicht für Schicht das gewünschte dreidimensionale Bauteil.

Das Verfahren ermöglicht Systemlösungen zum Individualisieren von Großserienteilen durch Kombination von Spritzgießen, Ident-Technologien und additiver Fertigung. Bild 7 zeigt als Technologiebeispiel eine Schere, deren Kunststoffgriffe an die Edelstahlklingen gespritzt wurden. Im Anschluss wird ein eindeutiger Code zur Bauteilidentifikation aufgelasert und ein individueller Schriftzug, im Beispiel der Schriftzug „John“ additiv aufgebracht.



Bild 6. Mit additiven Fertigungsverfahren können auch große Objekte realisiert werden. Hier im Bild eine Design-Säule von Sam Welham & Richard Beckett. (Quelle: voxeljet)



Bild 7. Veredelung von Serienprodukten durch Individualisierung mittels additiver Fertigung. (Quelle: Arburg)

DMG MORI kombiniert das additive Laseraufbauverfahren in eine vollwertige 5-Achs-Fräsmaschine [6]. Diese Hybridlösung kombiniert die Flexibilität des Laser-Auftragschweißens (siehe DVS 3215) mit der Präzision der spanenden Bearbeitung und ermöglicht somit die additive Herstellung kompletter Bauteile mit höchster Präzision in Fertigteilqualität. Bei dem Verfahren wird ein Auftragsprozess mittels Metallpulverdüse verwendet, der eine Komplettbearbeitung ohne Prozesskammer ermöglicht und bis zu 10-mal schneller ist als das Generieren im Pulverbett. Darüber hinaus ist die Herstellung überhängender Konturen ohne Stützstruktur möglich. Die Kombination des Laser-Auftragschweißens mit der spanenden

Bearbeitung auf einer Maschine ermöglicht völlig neue Anwendungs- sowie Geometriemöglichkeiten. Auch große Bauteile lassen sich mit dieser Hybridlösung kostengünstig herstellen.

Der flexible Wechsel zwischen Laser- und Fräsbearbeitung ermöglicht die direkte Finishing-Bearbeitung von Bereichen, die am Fertigteil später nicht mehr erreichbar sind. Bild 8 zeigt eine Anlage vom Typ Lasertec 65 3D beim Laser-Auftragschweißen.



Bild 8. Beim Laser-Auftragschweißen wird Metallpulver vom Laser aufgeschmolzen. Die Metalltropfen verbinden sich mit dem darunter liegenden Bauteil. (Quelle: DMG MORI)

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt HERMLE mit seinem MPA-Auftragsverfahren. Hier erfolgt der Materialaufbau über eine Düse, aus der mit hoher Geschwindigkeit Metallpulver und Trägergas ausströmen. Trifft das Metallpulver auf die Oberfläche, entstehen hohe Temperaturen und Drücke. Dadurch verbindet sich das Metallpulver mit der Oberfläche. Anschließend wird auch hier über Zerspannung überflüssiges Material wieder abgetragen. Der Hersteller gibt an, dass folgende Materialien mit diesem Verfahren verarbeitet werden können [7]: 1.2344 Warmarbeitsstahl (H13), 1.2367 Warmarbeitsstahl, 1.4404 Rostfreier Stahl (316L), Reinkupfer, Bronze, Titan und Aluminium.

Auch Luxexcel aus den Niederlanden hat die Grenzen dessen, was additiv herstell- und verarbeitbar ist, neu definiert. Das Unternehmen stellt Linsen und andere komplexe optische Elemente direkt additiv her (Bild 9). Das besondere hierbei ist, dass der verarbeitete Kunststoff für die Anwendung transparent und homogen genug ist. Die optisch aktiven Oberflächen werden direkt perfekt glatt gefertigt, sodass kein Nachpolieren erforderlich ist. Der Hersteller bietet die Fertigung von individuellen Optiken über seinen Webshop [8] an. Bauteile mit neuen optischen Funktionen stehen so innerhalb von Tagen zur Verfügung und können die Entwicklung neuer Produkte beflügeln.



Bild 9. Additiv gefertigte Optikelemente.
Quelle: Luxexcel

Die Extrusionsverfahren FDM/FLM werden, was den professionellen Einsatz angeht, von Unternehmen wie Stratasys [9] aus den USA dominiert. Die unzähligen Unternehmen aus aller Welt, die derzeit 3-D-Drucker für den Heimanwender anbieten, runden das Angebot nach unten ab.

Einen Überblick über die verschiedenen additiven Fertigungsverfahren, deren Funktionsweise und die typischen Einsatzgebiete gibt die Richtlinie VDI 3405.

4 Wer nutzt additive Fertigungsverfahren?

In einer Studie hat das Direct Manufacturing Research Center (DMRC) an der Universität Paderborn [10] untersucht, welche Wirtschaftszweige von den additiven Fertigungsverfahren profitieren können. In den folgenden Abschnitten stellen wir viele davon mit Praxisbeispielen vor.

4.1 Luft- und Raumfahrtindustrie

Bei Fluggeräten bewirken Gewichtseinsparungen über den verringerten Treibstoffverbrauch erhebliche Einsparungen bei den Betriebskosten. Da die Kunden typischerweise die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership) betrachten, sind sie bereit, höhere Anschaffungskosten zu akzeptieren, wenn diese nachweislich die Betriebskosten senken. Konstruktiv auf Leichtbau optimierte und additiv hergestellte Bauteile wie der in Bild 10 gezeigte Halter sind hinsichtlich der Konstruktions- und Herstellkosten sicherlich nicht günstiger als ihre konventionell konstruierten und gefertigten Vorgängertlösungen. Jedoch werden damit Treibstoffeinsparungen ermöglicht. Diese realisieren nicht nur Kostenvorteile, sondern senken so auch den Ressourcenverbrauch. Bild 11 gibt einen Überblick, wo in modernen Flugzeugen bereits additiv gefertigte Bauteile eingesetzt werden.

4.2 Werkzeug- und Formenbau

Im Werkzeug- und Formenbau werden typischerweise Einzelstücke oder Kleinserien gefertigt. Dadurch, dass additiv gefertigte Bauteile schneller zur Verfügung stehen als konventionell gefertigte, stehen auch die damit hergestellten Produkte eher zur Verfügung und können mit einem Zeitvorsprung auf den Markt gebracht werden. Indem die Möglichkeit genutzt wird, Geometrien zu fertigen, die bisher praktisch nicht herstellbar waren, kann außerdem die Performance der Werkzeuge verbessert werden.



Bild 10. Bionisch optimierter Halter für das Crew Rest Compartment im Airbus A350 XWB. (Quelle: VDI e.V.)

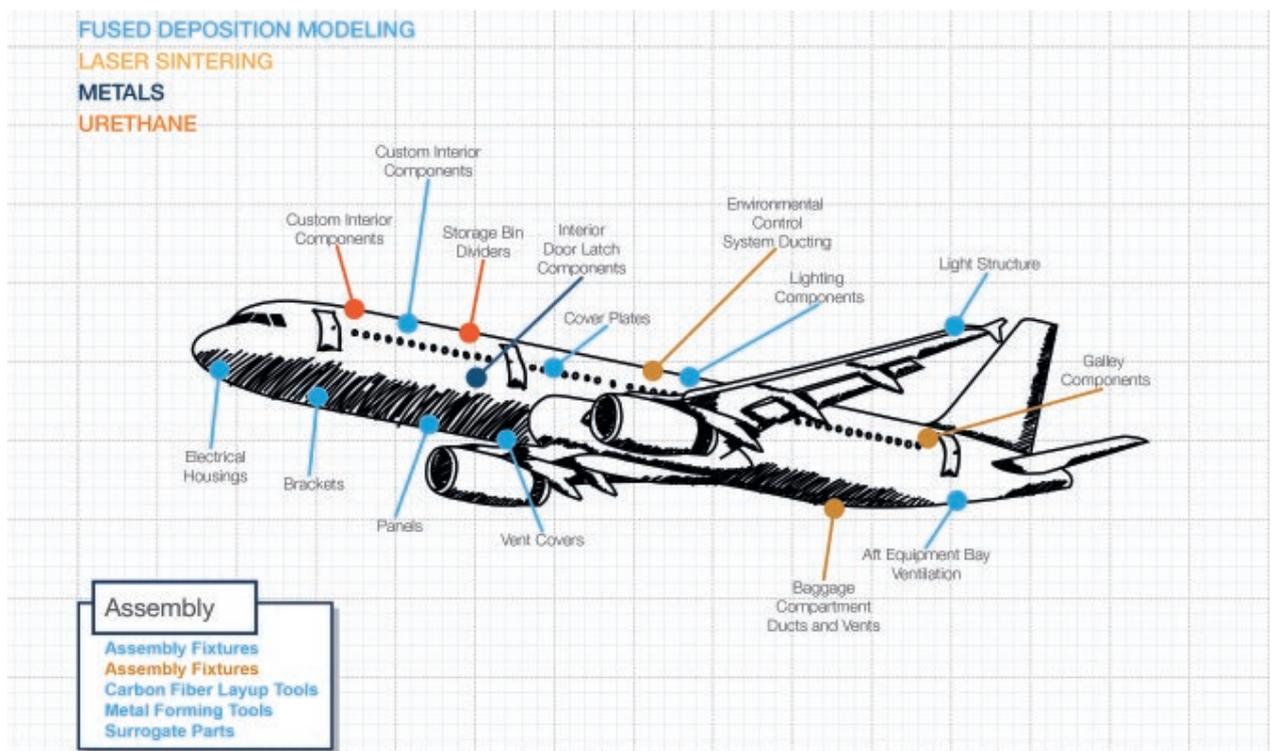


Bild 11. Einsatz additiv gefertigter Flugzeugbauteile. (Quelle: Stratasys)

Bild 3 zeigt einen gebogenen Schieber, der in einer Spritzgussmaschine eingesetzt wird. Durch die besondere Bauform wird die Zykluszeit bei gleichzeitiger Steigerung der Produktqualität gesenkt. Auch mit dem in Bild 12 gezeigten Kern mit Spiralkühlung wird eine verkürzte Zykluszeit ermöglicht.



Bild 12. Zeichnung eines Korns mit innen liegender Kühlung (oben) und Foto der additiv gefertigten Bauteile vor und nach der Politur (unten) (Quelle: Gregor Jell Werkzeugelemente)

4.3 Elektro- und Elektronikindustrie

Auch in der Elektro- und Elektronikindustrie ist eine unzureichende Kühlung oft der entscheidende Grund, warum kompaktere Bauformen oder leistungsfähigere Geräte nicht realisiert werden können. Mithilfe der additiven Fertigungsverfahren können maßgeschneiderte Kühlsysteme realisiert werden, die die Wärme aufnehmen, wo sie entsteht.

Die Leistungselektronik beispielsweise moderner Elektro- und Hybridfahrzeuge zeichnet sich durch ihre hohe Integrationsdichte auf kleinstem Bauraum aus. Durch die hohen lokal anfallenden und abzuführenden Verlustleistungen in Form von Abwärme wird die Kühlung der Elektronik heute in der Regel aktiv über ein in das Gehäuse integriertes Kühlsystem ausgeführt. Heutige in Serie produzierte Leistungselektronikgehäuse in Aluminium-Druckguss stoßen allerdings bei der Funktionsintegration und dem erzielbaren Leichtbaugrad aufgrund der fertigungstechnischen Restriktionen, z. B. Mindestwandstärken oder Entformungsschrägen, schnell an ihre Grenzen. Eine Alternative sind die additiven Fertigungsverfahren. Diese sind allerdings wegen der vergleichsweise langsamen Aufbauraten für eine Großserienproduktion von voluminösen metallischen Bauteilen noch zu kostenintensiv.

Vor diesem Hintergrund wurden hybrid gefertigte Gehäuse für On-Board-Ladegeräte entwickelt. Ein

von EDAG und dem LZN Laser Zentrum Nord (Hamburg) entwickeltes Gehäuse ist beispielsweise über 50 % leichter als die gegossene Referenz (Bild 13). Ansatz war dabei, nicht das komplette Gehäuse mit Laser-Strahlschmelzen herzustellen, sondern nur die konzept- und wirkungsgradrelevanten Funktionselemente, bei denen die additive Fertigung ihre Vorteile voll ausspielen kann. Herzstück des hybrid gefertigten Gehäuses ist eine monolithische, additiv gefertigte Aluminium-Kühlstruktur. Mit ihren speziell auf den Wärmedurchgang der Elektronik angepassten Kühlkanälen und filigranen Kühlrippen erzielt das Aluminiumbauteil höchste Kühlleistungen auf kleinstem Raum bei minimalem Gewicht.



Bild 13. Demonstrator eines On-Board-Ladegeräts für Elektrofahrzeuge mit einem hybrid gefertigten Leistungselektronikgehäuse und additiv gefertigter Kühlstruktur (Quelle: EDAG)

4.4 Automobilindustrie

Die additive Fertigung findet im Automobilbau im Bereich des Prototyping seit vielen Jahren eine weite Verbreitung und gewinnt darüber hinaus zusehends auch im Bereich der Kleinserienfertigung, insbesondere bei Konzeptfahrzeugen und im Motorsport, immer größere Bedeutung. Je nach Bauteilgröße und -anforderungen werden beispielsweise die additiven Fertigungsverfahren selective Laser Melting (SLM), Laser Metal Deposition (LMD), Selektives Lasersintern (SLS), Stereolithografie (SLA) und Fused Deposition Modelling (FDM) eingesetzt, durch die eine Bereitstellung der Bauteile innerhalb weniger Tage gewährleistet werden kann.

Die Richtlinie VDI 3405 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren.

Verfahrenstechnische Vorteile, die hierbei genutzt werden, sind die hohe geometrischen Freiheit, die

eine nahezu restriktionslose Optimierung des Bauteils hinsichtlich beispielsweise Gewicht und Strömungsführung zulässt. Ein Beispiel zeigt Bild 14.



Bild 14. Additiv gefertigtes Wasserpumpenrad zum Einsatz in Hochleistungsfahrzeugen (Quelle: BMW Group Presseclub [11])

Das Wasserpumpenrad wird in der Rennserie DTM in den BMW M4-, sowie in BMW Z4-GT3-Kundenfahrzeugen eingesetzt und wurde bereits mehr als 500-mal aus dem Leichtmetall Aluminium gefertigt. Seit der Einführung im Jahr 2010 gab es bei den verbauten Wasserpumpenrädern bis zum heutigen Tage keinen Ausfall – und das unter höchsten Lastbedingungen: Im Rennensatz laufen die Hochleistungsmotoren bis zu 70 % der Betriebszeit unter Volllast!

Die Vorteile der additiven Fertigungsverfahren konnten bei der Weiterentwicklung der für Serienfahrzeuge zweiteilig geclipsten Kunststoffvariante durch die investitions- und werkzeuglose Fertigung wirtschaftlich umgesetzt werden. Dabei entstand ein strömungstechnisch optimales Bauteil, in dem alle konstruktiven Feinheiten realisiert werden konnten.

4.5 Gießereitechnik

Ein Bereich, in dem sich additive Fertigungsverfahren bereits einen festen Platz erarbeitet haben, sind Sandkerne und -formen für den Sandguss und verlorene Modelle für den Feinguss.

Bei konventioneller Fertigung müssen die Konstruktionen den Anforderungen des Abformprozesses genügen. So müssen Ausformschragen angebracht werden. Die Kerne müssen sich in einem Kernkasten herstellen und vor allem aus ihm entformen lassen. In der Praxis führt das zu unerwünschten Einschränkungen.

Der 3-D-Druck von Sandformen ist keine billige Technologie. So hergestellte Teile kosten oft das

10- bis 100-Fache von konventionell abgeformten Gießkästen, geschossenen Kernen oder gespritzten Wachsmoellen. Durchgesetzt hat sich schon länger, bei Einzelteilen oder Kleinserien zu vergleichen, ob der Werkzeugbau oder der 3-D-Druck für ein Projekt günstiger sind. Enge Toleranzen, dünne Wandstärken und extrem komplexe Geometrien, die eine Vielzahl von Einzelkernen erfordern würden, führen zu Gießwerkzeugkosten im mittleren sechsstelligen Bereich, sodass für Jahresstückzahlen bis etwa 10.000 der 3-D-Druck zumindest von Teilen der Gießwerkzeuge eine wirtschaftliche Alternative geworden ist.

Wenn Konstrukteure additiv denken und die Freiheitsgrade des 3-D-Drucks nutzen, um ihr Erzeugnis mit einem Zusatznutzen für ihre Kunden zu optimieren, fällt die Entscheidung zugunsten der additiven Fertigungsverfahren häufiger.

Ein gutes Beispiel für ein solches Gussteil sind Integralkrümmen. Bei ihnen ist der Abgaskrümmen und der antriebsseitige Teil des Turboladers in einem Bauteil integriert. Derartige Bauteile halten extremen Druck- und Temperaturschwankungen stand und machen Dichtungen zwischen Abgaskrümmen und Turbolader überflüssig. Mit hochlegierten Stählen sind Betriebstemperaturen deutlich über 1.000 °C möglich. Damit kann die Effizienz und Leistung von Motoren gesteigert werden.

Diese Vorteile können auch bei gegossenen Turbinenschaufeln genutzt werden. Die Kontur der additiv gefertigten Form kann dem strömungsmechanisch erforderlichen folgen, sodass der Wirkungsgrad der Turbine optimiert wird.

Anspruchsvolle Kerne wie Wassermäntel für einen modernen Verbrennungsmotor werden konventionell gefertigt teilweise aus zahlreichen Einzelteilen zusammengesetzt. Das erfordert ein Montagespiel, erhöht die Gesamt toleranzen und stellt ein Qualitätsrisiko dar. Daher werden Wandstärken höher festgelegt, als eigentlich erforderlich. Die größere Masse wirkt sich auf die Fahrdynamik und den Treibstoffverbrauch ungünstig aus. Mithilfe additiv an einem Stück gefertigter Gussformen können diese Sicherheitszuschläge bei Dimensionen bis zu 1,8 m × 1,0 m × 0,6 m entfallen.

4.6 Automatisierungstechnik, Maschinen- und Anlagenbau

Die Beweggründe, additive Fertigungsverfahren in der Automatisierungstechnik sowie dem Maschinen-

und Anlagenbau einzusetzen, sind ähnlich wie beim Werkzeug- und Formenbau. Auch hier beschleunigen kurze „Wartezeiten“ zwischen Fertigstellung der Konstruktion und dem Vorliegen des realen Bauteils die Projektlaufzeiten. Bild 15 zeigt einen Greifer, der ausgehend von einer Standardkonstruktion anwendungsspezifisch modifiziert und dann in einem Fertigungsschritt span- und werkzeuglos kurzfristig gefertigt wird. Bei diesem Greifer werden die Potenziale, die die additiven Fertigungsverfahren bieten, genutzt: Seine Bestandteile entstehen bei der Fertigung nicht als Einzelteile, die später zusammengefügt werden müssen. Stattdessen werden sie in richtiger Anordnung zueinander quasi als ein Bauteil „fertig montiert“ additiv gefertigt. Dadurch entfallen Logistikkosten durch die Verwaltung und Bevorratung vieler Einzelteile sowie Montagekosten.

Die Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 gibt Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen und hilft damit, „additiv“ zu denken und bei den Konstruktionen die neuen Möglichkeiten zu nutzen, um Mehrwert zu schaffen.



Bild 15. Additiv gefertigter adaptiver Greifer (Quelle: Festo)

Wenn Vakuumsauger zur Handhabung von Bauteilen eingesetzt werden, können die entsprechenden Greifer mithilfe der additiven Fertigungsverfahren wesentlich einfacher realisiert werden: Das Greifergestüt wird einfach aus einem Stück und innen hohl gefertigt. So kann das Vakuum ohne zusätzliche Leitungen direkt durch das Gerüst geführt werden. Die Anschlüsse für die Sauger und die Vakuumversorgung können direkt integriert werden. Bei Bedarf können die Saugerpositionen und -winkel optimal passend zum jeweiligen Bauteil konstruiert werden.

4.7 Montagetechnik

Wenn die Handhabung von Bauteilen nicht vollautomatisch stattfinden soll, und die Geschicklichkeit und Flexibilität von Menschen bei der Montage genutzt wird, können die additiven Fertigungsverfahren helfen, die Mitarbeiter optimal zu unterstützen. Bild 16 zeigt oben ein Beispiel aus der Fahrzeugmontage bei BMW.



Bild 16. Einsatz der additiven Fertigung in der Automobilindustrie zur optimalen Unterstützung der Mitarbeiter in der Fahrzeugmontage (oben) und Detailaufnahme der Daumenunterstützung (unten) (Quelle: BMW Group Presseclub [11])

Im Rahmen eines Pilotprojekts im Jahr 2014 wurde für die Produktionsmitarbeiter in der Fahrzeugmontage ein ergonomisches Hilfswerkzeug entworfen. Konkret handelt es sich dabei um eine individuell anpassbare flexible Daumenunterstützung, durch welche die übermäßige Belastung der Daumengelenke verhindert

wird. Bild 16 zeigt die Montagehilfe im Einsatz (oben) und in Detailaufnahme (unten). Die individuelle Anpassung des Hilfsmittels ist hierbei durch einen 3-D-Scan der Hand des jeweiligen Produktionsmitarbeiters und die nachfolgende Fertigung im SLS-Verfahren (siehe VDI 3405 Blatt 1) möglich. Der hierbei verwendete Werkstoff ist ein eigens dafür entwickeltes thermoplastisches Polyurethan. Ein Vorteil des neuen, nun marktreifen Werkstoffs ist die Möglichkeit, über die Prozessparameter des Fertigungsprozesses mechanische Eigenschaften gezielt einzustellen, quasi maßzuschneidern. Erste Praxistests der Montagehilfe sind positiv verlaufen, sodass nun eine flächendeckende Verwendung im Produktionsalltag geprüft wird.

4.8 Prothetik

Mit additiven Fertigungsverfahren lassen sich auf Grundlage von patientenspezifischen 3-D-CT- oder 3-D-MRT-Daten individuell angepasste Prothesen realisieren. Das alleine ist schon ein wesentlicher Beitrag zum Behandlungserfolg. Additive Fertigungsverfahren können hier jedoch einen Zusatznutzen generieren:

An der Schnittstelle zwischen Prothese und Knochen kann die Oberfläche der Prothese offenporig gestaltet werden. Das ermöglicht es dem Gewebe, mit der Prothese zu verwachsen. Es entsteht eine dauerhafte und den Patienten möglichst wenig beeinträchtigende Verbindung zwischen dem Knochen und der Prothese. Bild 17 zeigt ein Beispiel.

Individuell an den Patienten angepasste Produkte fördern in der Medizin den Behandlungserfolg.



Bild 17. Für einen Patienten individuell additiv gefertigter Beckenteilersatz aus einer biokompatiblen Titanlegierung mit offenerporiger Struktur an der Knochen-Implantat-Schnittstelle (Quelle: implantcast)

Additiv werden derzeit Knie-, Hüft- und Bandscheibenprothesen, aber auch Prothesen zum Ausgleich größerer Knochendefekte wie etwa im Schädelbereich nach schweren Unfällen oder Krankheiten hergestellt.

4.9 Medizinische Hilfsmittel

Medizinische Hilfsmittel, die extern am Körper genutzt werden, wie Prothesen, Orthesen, Hörhilfen, Schienen und orthopädische Fußeinlagen, werden schon häufig maßgeschneidert mittels additiver Fertigung hergestellt. Hierbei werden handelsübliche Geräte und für diese herstellerseitig verfügbare Materialien eingesetzt. Wesentliche Gesichtspunkte sind hierbei mechanische Eigenschaften im Hinblick auf den beabsichtigten Einsatzzweck, aber auch Fragen wie die Körpervertägbarkeit (z. B. Hautverträglichkeit). Eine zunehmend wichtige Frage bildet die Entwicklung von Materialien mit höherer Flexibilität und Elastizität. Derartige Materialien stehen bisher kaum zur Verfügung, da diese Eigenschaften bei der additiven Fertigung bisher keine signifikante Rolle gespielt haben.

4.10 Dentaltechnik

In der Dentalprothetik werden additive Fertigungsverfahren schon seit einigen Jahren in nennenswertem Umfang für Brücken, Kronen, Schienen, Schablonen, Abdrucklöffel usw. eingesetzt. Als Materialien kommen vorwiegend Polymere, Keramiken bzw. Hybridmaterialien, teilweise auch Gold meist auf



Bild 18. Mithilfe additiver Fertigungsverfahren hergestellte passgenaue Brackets zur Kieferkorrektur (Quelle: 3M Orthodontic Products)

Laser-Strahlschmelz [12] oder DLP (Digital Light Processing)-Maschinen zum Einsatz. Heutzutage nutzt hierbei schon eine nennenswerte Anzahl von Zahnärzten diese Technologie, wobei meist die Fertigung von spezialisierten Dienstleistern oder sogar von den Maschinenherstellern selbst übernommen wird. Zunehmend kommen in diesem Bereich auch kleinere und preisgünstigere Geräte auf den Markt, die erwarten lassen, dass zukünftig derartige Geräte unmittelbar in Zahnarztpraxen eingesetzt werden können, sofern hierfür entsprechend geschultes Personal zur Verfügung steht.

Doch es gibt auch andere Möglichkeiten, Gold zu verwenden, ohne dieses direkt additiv zu verarbeiten: Für die in Bild 18 gezeigten Brackets wurden Wachsgussformen 3-D gedruckt [13].

4.11 Medizinische Ausbildung und Operationsvorbereitung

Die Fertigung von Anschauungsobjekten als typische Form des Rapid Prototyping stellte schon in den Anfängen die erste Form der Nutzung additiver Herstellungsverfahren in der Medizin(-technik) dar. Modelle z. B. von Organen können leicht mit Standardgeräten und Standardmaterialien – in der Regel Gips oder Kunststoffe – hergestellt werden. Im Zuge der deutlichen Technologie- und Qualitätsfortschritte in den letzten Jahren hat die Bedeutung von 3-D-Objekten zur Unterstützung der medizinischen Ausbildung etwa durch anatomische Modelle oder der Vorbereitung von Operationen sowie der Unterstützung der Diagnostik anhand von Modellen auf der Basis realer Patientendaten zugenommen. An maßgerechten 3-D-Herzmodellen beispielsweise können die Technik des Herzkatheters eingeübt oder krankhafte Veränderungen in einer realen 3-D-Sicht besser als in CT-, MRT- oder oft auch 3-D-Daten am Computer erkannt werden, die de facto doch zweidimensional wahrgenommen werden. Operationen etwa in der Orthopädie können zunächst an realen 3-D-Modellen geprobt werden, die aus Daten des jeweils betroffenen Patienten gefertigt werden; 3-D-gefertigte Schablonen können ebenfalls in vielen Fällen den Operationsverlauf unterstützen.

4.12 Spielwarenindustrie und Fertigung von Sammlerstücken

360°-3-D-Modelle von Menschen können mithilfe von Fotos, die von allen Richtungen gemacht wurden, rekonstruiert werden. Bild 19 zeigt eine Anlage der Firma botspot. Hier nehmen viele handelsübliche

digitale 2-D-Kameras gleichzeitig ein Bild der Person auf, die sich in die Mitte der Anlage stellt. Aus diesen Bildern wird dann ein 3-D-CAD-Modell berechnet, das Ausgangspunkt für die additive Fertigung des farbigen Modells ist. Bild 20 zeigt so hergestellte Figuren.



Bild 19: 3-D-Kameras der Firma botspot für 3-D-Modelle von Menschen. (Quelle: VDI e.V.)



Bild 20: Von der Firma botspot additiv gefertigte Figuren der Mitglieder der deutschen Judo-Nationalmannschaft. (Quelle: VDI e.V.)

Wenn man bedenkt, dass die Figuren und Szenen von aktuellen Computerspielen und animierten Spielfilmen ohnehin in einer 3-dimensionalen Repräsentation vorliegen, kann man sich gut vorstellen, dass beliebige Posen der digitalen Helden additiv gefertigt werden könnten. Die technischen Voraussetzungen für individuelle Sammlerstücke oder von den Kunden mitgestaltete Spielzeuge sind vorhanden. Es liegt an der Bereitschaft der Industrie, diese anzubieten und der Kunden, die Kosten zu akzeptieren und die Angebote zu nutzen.

4.13 Architektur

Die Präsentation ihrer Entwürfe und Modelle ist für Architekturbüros von entscheidender Bedeutung.

Immer mehr Architekten setzen dabei auf additiv gefertigte Architekturmodelle.

Die detailreichen und maßstabsgetreuen Kunststoffmodelle stehen für höchste Professionalität in der Darstellung und vermitteln den Bauherren ein realistisches Bild von Bauwerken oder Gebäudekomplexen (Bild 21).



Bild 21. Additiv gefertigtes Architekturmodell (Design: Architekt W. Schmidt, Quelle: voxeljet)

4.14 Film und Unterhaltung

Das anspruchsvolle Filmpublikum verlangt nach realistischer Darstellung von Filmkulissen und Actionszenen. Führende Filmstudios und Modellbauer in aller Welt nutzen dabei die Möglichkeiten der additiven Fertigungsverfahren.

Mit hochauflösenden Anlagen lassen sich konkrete Objekte wie der Dienstwagen von James Bond oder komplette Scheinwelten schnell und kostengünstig, maßstabsgetreu und fotorealistisch mit maximaler Detailtreue erstellen. Das in Bild 22 gezeigte Beispiel wurde in einem gemeinsamen Projekt von Propshop Modelmakers Ltd und voxeljet erstellt.

4.15 Kunst

Künstlern und Designern eröffnen die additiven Fertigungsverfahren bis dato ungeahnte Möglichkeiten [12]. Mit der innovativen Technologie lassen sich Kunstwerke, Skulpturen und Designobjekte aus unterschiedlichen Werkstoffen direkt nach CAD-Daten herstellen. Visionen und Ideen werden damit in einem Schritt zur Realität – einfach, schnell und unkompliziert (Bild 23). Spezielle Fertigungsanlagen für wertvolle Rohstoffe wie Gold helfen, die Ideen praktisch zu realisieren.

Die Bedeutung der Schmuckindustrie als Wirtschaftszweig ist mit geschätzten 30.000 Unternehmen mit weniger als 250 Beschäftigten und 180.000 Beschäftigten in den größten 200 Betrieben unumstritten.



Bild 22. Additiv gefertigtes Karosseriemodell eines Aston Martin (oben) und fertig aufbereitetes Modell (unten) für eine Filmproduktion. (Quelle: Propshop Modelmakers)

Die Kunden in Europa und in anderen hoch entwickelten Wirtschaftsräumen haben sich – quer über alle Wirtschaftszweige – an ständige Neuerungen und innovative Produkte gewöhnt. Die europäische Schmuckindustrie steht mit ihren qualitativ hochwertigen Produkten mit anderen Branchen im Wettbewerb um die Gunst der Kunden. Man kann davon ausgehen, dass im Segment des hochwertigen Schmucks der Wunsch nach personalisierten Einzelstücken mit individueller Gestaltung vor diesem Hintergrund zunehmen wird. Die Wertschätzung des innovativen Designs gewinnt gegenüber dem Wert der verarbeiteten Rohstoffe zunehmend an Bedeutung. Mit additiven Fertigungsverfahren können neue Designs und individuelle Produkte mit geringem Aufwand realisiert werden. Angesichts der aktuell hohen Edelmetallpreise sind die Möglichkeiten zum Leichtbau, insbesondere zur Fertigung von Hohlräumen, bei großvolumigen Schmuckstücken von besonderem Nutzen.



Bild 23. Die Designer und Künstler haben die additiven Fertigungsverfahren schon für sich entdeckt (Design: Tesni Odonnell Winch, Quelle: School of Jewellery, Birmingham City University).

4.16 MINT-Unterricht

Im Abschnitt „Fortbildung und Schulung“ gehen wir unter der Überschrift „Handlungsfelder“ noch ausführlich darauf ein, dass Konstrukteure, die bislang für andere Fertigungsverfahren konstruiert haben, umdenken müssen, wenn sie die Potenziale der additiven Fertigungsverfahren ausschöpfen wollen.

In diesem Abschnitt geht es darum, darzustellen, welche Vorteile die additiven Fertigungsverfahren im Schulunterricht haben können. In diesem Kontext werden typischerweise Anlagen eingesetzt, die mit den Strangablegeverfahren FDM/FLM (siehe VDI 3405) arbeiten.

Additive Verfahren in Lehr-Lern-Kontexten bieten vielfältige Möglichkeiten des Wissenstransfers, des Erfahrens von Prozessketten und der Entwicklung von Fach- und Querschnittskompetenzen. Gruppenarbeit mit der Zielsetzung der additiven Objektherstellung ermöglicht es, Lernprozesse der Schüler von der

ersten Idee bis zum Endprodukt zu unterstützen. Weiterhin fördern solche Projekte Kompetenzen und Fähigkeiten wie das räumliche Vorstellungsvermögen, die Kreativität, aber auch Problemlösekompetenzen und Kooperationsfähigkeiten [14].

Zu Beginn der Projektarbeit in einer Schülergruppe muss – wenn das herzustellende Objekt noch nicht feststeht – über dieses in der Gruppe verhandelt werden. Haben sich die Schüler auf eine Idee geeinigt, muss diese skizziert werden. Dies fördert Fähigkeiten des technischen Zeichnens, aber auch kreative sowie gegebenenfalls künstlerische Kompetenzen. Die Skizze wird dann mit einer 3-D-Software modelliert und somit in ein digitales Modell umgewandelt. Schnelle Erfolge bei der Nutzung der CAD-Programme fördern bei Schülerinnen und Schülern das Technikinteresse, zumal mathematische, naturwissenschaftliche, technische, aber auch kreative Fähigkeiten gleichzeitig gefördert werden.

Praxisprojekte haben hier gezeigt, dass auch bei Mädchen ein deutliches Interesse an Technik und den MINT-Fächern (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft, Technik) entwickelt werden kann.

Von besonderer Bedeutung sind jedoch die Lernerfahrungen, die Schüler in diesen Projekten sammeln:

- Die Lernerfahrung startet mit der eigenen Imagination. Die Möglichkeit eine kreative Idee in die Realität umsetzen zu können, ist in höchstem Maße motivierend.
- Die Lernerfahrungen sind realitätsnah, da sie wie bei beruflichen Projekten in ihrer Entwicklung nicht vorhersehbar sind: Sie erfordern kontinuierliches Reflektieren, Überprüfen, Evaluieren und Adaptieren der Lern- und Arbeitsschritte an veränderte Bedingungen.
- Die Schüler werden durch das hohe Maß an eigener Beteiligung motiviert, müssen aber auch mit Frustration und Misserfolg umgehen und sich immer wieder motivieren, um ihr Ziel zu erreichen. Hierbei sammeln sie auch Erfahrungen im Umgang mit der Dynamik von Gruppen.
- Die tatsächliche Bauteilherstellung ermöglicht weiterhin auch interdisziplinäres Arbeiten und das Übertragen von Wissen in unterschiedlichste Kontexte. Diese Erfahrungen sind nicht nur abstrakt (z. B. in der Modellierung), sondern anschließend auch praktisch und plastisch erfahrbar.

Damit erfüllt die Nutzung der additiven Verfahren in der Schulausbildung viele Randbedingungen, die das gute und nachhaltige Lernen fördern, ganz abgesehen von dem Erfolgserlebnis, „am Ende des Tages“ etwas selbst Geschaffenes in den Händen zu halten.

5 Wofür kann ich die additiven Fertigungsverfahren in meinem Betrieb nutzen?

Wer an dieser Stelle einen Link zu einer Website erwartet, auf der man ein paar Kennzahlen eintippt und anschließend sieht, wie viel Geld und natürliche Ressourcen durch additive Fertigungsverfahren im Unternehmen oder in einem konkreten Projekt eingespart werden können, den müssen wir enttäuschen. Wir kennen keinen, der einen solchen Wirtschaftlichkeitsrechner für additive Fertigungsverfahren anbietet. Und wenn es ein solches Angebot gäbe, würden wir es kritisch betrachten. Denn es gibt viele, schwer quantifizierbare Einflussgrößen:

- Wie gut ist das eigene Unternehmen mit seinen Partnern bei den konventionellen Fertigungsverfahren aufgestellt?
- Gibt es schon im eigenen Unternehmen oder bei Partnern Erfahrung bei der Nutzung der additiven Fertigungsverfahren?
- Gibt es in der Nähe Dienstleister mit additiven Fertigungseinrichtungen, mit denen man gemeinsam Projekte durchführen kann?
- Soll die Fertigung eines bestehenden Produkts umgestellt, oder ein neues entwickelt werden?

Grundsätzlich muss zwischen dem Einsatz von additiven Fertigungsverfahren im eigenen Betrieb und der Verwendung von additiv gefertigten Bauteilen unterschieden werden: „Make or Buy“.

Bei den Bauteilen ist noch zwischen dem Einsatz zur Fertigung von Komponenten bzw. Bauteilen als Bestandteil eigener Produkte und der Herstellung von Fertigungsmitteln zu differenzieren.

Die Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile unterscheiden sich teilweise sehr von denen konventionell gefertigter Bauteile. Die Vorteile solcher Bauteile, wie Leichtbauweise, gesteuerte Materialeigenschaften und gestalterische Freiheiten, sind auch gleichzeitig deren Nachteile: Die Eigenschaften sind in der Regel weitgehend unbekannt.

Dabei ist zu berücksichtigen, was die Erwartungen an die additiven Fertigungsverfahren und additiv gefertigte Bauteile sind. Additive Fertigungsverfahren können beispielsweise helfen, die folgenden Ziele zu erreichen:

- Kosten- und Ressourceneinsparung bei der Herstellung
- Kosten- und Ressourceneinsparung beim Betrieb der Produkte
- Verringerung der Lagerhaltung und Verbesserung des Ersatzteilmanagements
- Verbesserung der Produkte hinsichtlich Haltbarkeit, Wartbarkeit und Funktionalität
- Beschleunigung der Produktentwicklung oder der Projektabwicklung

Wie andere Fertigungsverfahren auch, hat jedes einzelne additive Fertigungsverfahren und die damit hergestellten Bauteile und Komponenten spezifische Stärken und Schwächen. Entsprechend ist für jeden Anwendungsfall zu prüfen, welche Ziele mit einem konkreten additiven Fertigungsverfahren erreicht werden können, welche Anforderungen an die Bauteile gestellt werden und welche Nachteile sich dadurch womöglich ergeben.

5.1 Typische Einsatzgebiete

Die herausragenden Merkmale der additiven Fertigungsverfahren sind, dass zur Herstellung von individuellen Produkten keine speziellen Werkzeuge benötigt werden, geometrische Restriktionen (Beispiel: Hinterschnitte) konventioneller Fertigungsverfahren entfallen, durch Teilezusammenfassung eine Montagekomplexität reduziert und Funktionen wie Leichtbaustrukturen bereits im additiven Fertigungsprozess in die Produkte integriert werden können. Die in Abschnitt 4 „Wer nutzt additive Fertigungsverfahren“ gezeigten Beispiele zeigen entsprechend, auch wenn sie aus ganz unterschiedlichen Branchen stammen, Gemeinsamkeiten beim Anforderungs- und Nutzungsprofil auf:

- Fertigung von Einzelstücken, Kleinserien, Pilotserien oder Ersatzteilen
- Verkürzung der Entwicklungszeiten
- Realisierung von
 - Leichtbaukonzepten
 - komplexen Geometrien
 - individuell angepassten Produkten

Die in Bild 24 gezeigte künstliche Libelle, die den Insektenflug technisch nachbildet, erfüllt die typischen Randbedingungen, unter denen die additiven Fertigungsverfahren sinnvoll sind: komplizierte, bionische Geometrien, die Leichtbau ermöglichen und in geringen Stückzahlen gefertigt werden.



Bild 24. Die additiven Fertigungsverfahren sind für den bionisch optimierten Leichtbau besonders geeignet (Quelle: Festo)

5.1.1 Kleine Stückzahlen und/oder kundenspezifisch angepasste Produkte

Werkzeuge – wie beispielsweise für den Spritzguss – werden zur Massenfertigung genutzt; sie selber sind jedoch Einzelstücke.

Fertigung nach Bedarf

Wenn der Erfolg einer Entwicklung nicht sicher vorhersehbar ist, ist eine additive Pilotfertigung eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative. Anfangsinvestitionen werden dadurch minimiert und das Produkt kann schnellstmöglich auf den Markt gebracht werden. Wenn das Produkt erfolgreich ist, wird auf massentaugliche Fertigungsverfahren mit niedrigeren Stückkosten umgestellt. „Production on Demand“ bei Kleinserien verringert Lagerkosten und verhindert obendrein, dass Überproduktionen Ressourcen verbrauchen und entsorgt werden müssen.

Fertigung vor Ort

Bei der Fertigung vor Ort denken manche direkt an eine Mondbasis, die additiv aus Mondstaub hergestellt wird [15]. Doch bleiben wir auf der Erde: Die Idee, dass Produkte an allen Standorten einer Firma weltweit produziert werden und auf kurzen und schnellen Wegen zum Abnehmer kommen, hat auch für industrielle Anwender hier und heute Relevanz.

Fertigung von Ersatzteilen für ältere Serienprodukte

Die Kombination der Fertigung nach Bedarf und der Fertigung vor Ort erlaubt es, die Lagerhaltung von Ersatzteilen massiv zu reduzieren. Diese sind additiv herstellbar, wenn sie gebraucht werden. Das ist vor allem für die Unternehmen attraktiv, die für ihre Produkte eine lange Ersatzteilverfügbarkeit garantieren. Außerdem realisiert sich damit ein Traum aller Servicetechniker, die weltweit Industrieanlagen reparieren. Die Sorge, nicht die richtigen Ersatzteile dabei zu haben, entfällt mit additiv herstellbaren Bauteilen. Die Kunden profitieren von kürzeren Stillstandzeiten.

Der Ersatzbremshebel fürs Fahrrad aus dem heimischen 3-D-Drucker sollte aus guten Gründen ein Wunschtraum der Tüftler bleiben. Dahingegen zeigt Bild 25 einen mit dem Laser-Strahlschmelzen hergestellten und voll belastbaren Bremshebel sowie eine Fußraste aus Metall.



Bild 25. Bremshebel und Fußraste als laserstrahlgeschmolzene Ersatzteile (Quelle: RTC Universität Duisburg-Essen)

Was spricht also dagegen, dass zukünftig der Autovertragshändler vor Ort die Ersatzteile seltener Modelle mit zertifizierten Anlagen direkt fertigt? Das wird vor allem realistisch, wenn Konstrukteure die additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von Ersatzteilen direkt bei der Produktfreigabe als zweite zulässige Fertigungsoption berücksichtigen.

Fertigung von Werkzeugen und Hilfsmitteln

Dabei muss man nicht immer an die additive Fertigung des Bauteils selber denken. Manchmal reicht es auch, die Werkzeuge zu dessen Herstellung additiv zu fertigen. Bild 26 zeigt ein Beispiel.



Bild 26. Mittels FDM hergestelltes Kunststoffwerkzeug zur Herstellung eines einzelnen Ersatzteils für die Luftfahrtindustrie (Quelle: Stratasys/Boeing)

Reparatur hochwertiger Bauteile

Wenn großvolumige Bauteile aus wertvollen Rohstoffen im Betrieb nur partiell verschleiben, kann es sinnvoll sein, nur die verschlissenen Bereiche abzufräsen und anschließend auf das bestehenden Bauteil additiv wieder aufzubauen [16].

5.1.2 Verkürzung der Iterationszyklen bei der Produktentwicklung

Mit additiven Fertigungsverfahren wird die Zeit zwischen der Fertigstellung einer Konstruktionszeichnung, dem Produktionsbeginn und der Verfügbarkeit erster Produkte minimiert.

Ein Beispiel: In der Kunststoffverarbeitung ist es nicht ungewöhnlich, dass nach Fertigstellung der Konstruktionszeichnung drei Monate oder mehr vergehen, bis eine Spritzgussform bei einem entsprechenden Dienstleister angefragt, angeboten, beauftragt, konventionell gefertigt wird und einsatzbereit ist. Erst dann können erste Produkte praktisch getestet werden. Mit additiven Fertigungsverfahren liegen die Bauteile schon nach wenigen Stunden vor, wenn die entsprechenden Fertigungsmaschinen im eigenen Haus sind. Selbst wenn die Bauteile extern von einem Dienstleister gefertigt werden, reduziert sich die Zeit zwischen der Fertigstellung der Zeichnung und dem Vorliegen erster Produkte auf wenige Tage.

Iterationszyklen der Produktentwicklung lassen sich von Monaten auf Stunden oder Tage verkürzen.

5.1.3 Leichtbau

Mit additiven Fertigungsverfahren lassen sich filigrane Strukturen, wie sie im Leichtbau erforderlich sind, besonders effektiv realisieren (Bild 27).

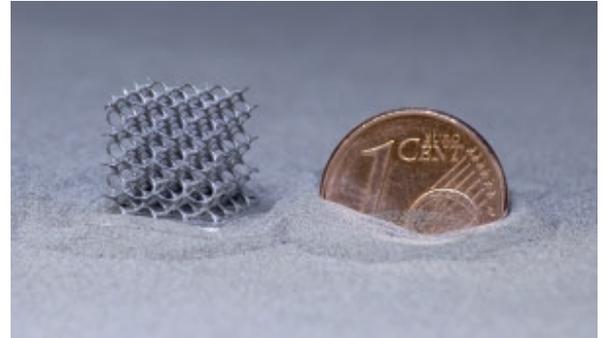


Bild 27. Mit additiver Fertigung können Leichtbaustrukturen realisiert werden, die anders nicht herstellbar sind (Quelle: RTC Universität Duisburg-Essen/Ralf Schneider)

Durch Topologieoptimierung (Bild 10) werden Bauteile materialeffizient und somit ressourcenschonend ausgelegt. Das Bauteil wird für den jeweiligen Belastungszustand berechnet und besteht nur dort aus Material, wo es für den Belastungszustand notwendig ist.

Dieses Konzept kann auch bei großen „Bauteilen“ eingesetzt werden, wenn additiv nur das gefertigt wird, was anders kaum herstellbar ist. Bild 28 zeigt ein Beispiel.



Bild 28. Konzeptfahrzeug mit bionischer Tragstruktur (Quelle: EDAG)

Die Konzeptstudie eines Kompaktsportwagens hat eine bionisch gestaltete und additiv hergestellte Fahrzeugstruktur, die mit einer Außenhaut aus wetterbeständigem Textil überzogen wurde. Die Kombination von additiv gefertigter Skelettstruktur und Stoff ermöglichte die Integration eines neuartigen Beleuchtungskonzepts, das erstmals das ganze Fahrzeug mit einbezieht. Das LED-Hinterleuchtungssystem macht nicht nur die Struktur des Concept Cars EDAG Light

Cocoon sichtbar; vielmehr macht es das Fahrzeug zur Leinwand.

Der aus dem Concept Car abgeleitete Technologiedemonstrationsobjekt eines zukünftigen Spaceframe Vorderwagenkonzepts zeigte die Möglichkeit, die hohe Flexibilität skalierbarer Fertigungsprozesse (Verkettung der laseradditiven Fertigung mit dem Profilieren sowie Biegen und Endenbearbeitung mit Laser) in einer variantenintensiven und bionischen Karosserie umzusetzen. Zugrunde liegt hierbei ein Laststufenkonzept mit jeweils punktgenau in der CAE ausgelegten Karosserievarianten und maßgeschneidert gefertigten Knoten.

Die Knoten können dank additiver Fertigung hochflexibel und multifunktional gestaltet werden, um z. B. unterschiedliche Fahrzeugvarianten ohne zusätzliche Werkzeug-, Betriebsmittel und Anlaufkosten in einer hochflexiblen Produktionszelle „on demand“ produzieren zu können. Als Verbindungselemente dienen Profile aus Stahl- oder Aluminium. Auch diese können durch unterschiedliche Wandstärken und Geometrien individuell den vorgegebenen Laststufen angepasst werden. Bild 29 zeigt einen dieser Knoten im Detail.



Bild 29. Der Space-Frame in Bild 28 wurde durch Kombination der additiven Fertigungsverfahren mit konventionellen realisiert (Quelle: EDAG)

5.1.4 Komplexe Geometrien

Bionisch oder FEM-optimierte Geometrien weisen oft komplexe Geometrien mit z. B. variablen Durchmesser von Verstrebungen und unregelmäßigen Abständen dazwischen auf (Bild 10). Dadurch, dass keine Werkzeuge gefertigt und keine Fräsmaschinen programmiert werden müssen, lassen sich diese additiv ohne Mehraufwand fertigen.

Es ist noch nicht allzu lange her, da standen nur der Radius der sphärischen Linse und die Glassorte als Freiheitsgrade beim Optikdesign zur Verfügung. Mit hochpräzisen Fräsmaschinen können heute spezielle asphärische Linsen direkt oder Formen für deren Fertigung per Spritzguss hergestellt werden [17]. Mit der Möglichkeit, diese Geometrien additiv zu fertigen, (Bild 9) wird diese Option auch für kleine Stückzahlen interessant.

5.1.5 Individualisierung von Produkten

In vielen Branchen ist ein Trend zu immer größerer Modellvielfalt und individuelleren Produkten zu beobachten.

Betrachten wir die Automobilbranche. Während ein Hersteller in den 1970er-Jahren jeweils eine Karosserievariante für die Kompakt-, Mittel- und Oberklasse anbot, gibt es heute in jeder Fahrzeugklasse diverse Varianten. Selbst bei einem Fahrzeugmodell gibt es mit 2-Türer-, 4-Türer-, Kombi-, Stufenheck- und Van-Varianten eine Vielzahl von Differenzierungsmöglichkeiten.

Ein anderes Beispiel ist die Computerbranche. Auch hier gibt es für jeden Anwendungsfall spezialisierte Geräte, und die Grenzen zwischen den Geräteklassen verschwimmen. Vom Handy über das Smartphone, dem Tablet, dem Notebook zum PC, vom Computermonitor bis zum Smart-TV gibt es die unterschiedlichsten Zwischenstufen und Sonderbauformen für spezielle Anwendungsfälle.

Mit der Individualisierung geht einher, dass die Anzahl der identisch produzierten Produkte sinkt. Mit der klassischen Fließbandfertigung, bei der identische Produkte zu Tausenden das Werk verlassen, sind individualisierte Produkte nicht möglich.

In der Industrie gibt es viele Konzepte, durch flexible und modularisierte Fertigung individualisierte Produkte mit einem hohen Automatisierungsgrad zu fertigen. Die industrielle Fertigung ab Stückzahl 1 ist ein wichtiger Aspekt des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 [18]. Die additiven Fertigungsverfahren sind sicherlich nicht die einzige Möglichkeit, individualisierte Produkte zu ermöglichen, doch ergänzen sie bestehende Möglichkeiten als eine wichtige Option.

Die Individualisierung der Produkte ist einer der Gründe dafür, warum Industrie 4.0 ins Leben gerufen wurde. Die additiven Fertigungsverfahren helfen, die Individualisierung flexibler zu gestalten.

Auch die Anzahl der in dieser Publikation gezeigten Bildbeispiele für individualisierte Produkte (Bild 7,

Bild 15, Bild 17, Bild 18, Bild 20) zeigt, welche Bedeutung die additiven Fertigungsverfahren für die jeweiligen Produktgruppen haben. Meistens ist die Individualisierung nicht nur eine (verkaufsfördernde) Spielerei, sondern macht den eigentlichen Wert des Produkts aus.

5.2 Wirtschaftliche Aspekte

„One day we will print an engine“ – „Eines Tages werden wir ein Triebwerk drucken“ – so wird Micheal Idelchik von GE Advanced Technologies Research zitiert [16]. Ähnlich optimistisch werden für das Laser-Strahlschmelzen von Metallen Prognosen vorgebracht, die aktuelle Fortschritte weit in die Zukunft extrapolieren und sinkende Pulverpreise sowie um Zehnerpotenzen schnellere Fertigungsanlagen prophezeien. Daraus wird abgeleitet, dass die konventionelle, spanende Verarbeitung von Metallen in 20 oder 30 Jahren aufgrund des höheren Werkstoffverbrauchs mit den damit einhergehenden Kosten nicht mehr wettbewerbsfähig sei [19].

Auch wenn diese Zukunftsaussichten womöglich für die additiven Fertigungsverfahren zu optimistisch und für die konventionellen zu pessimistisch sind, so rufen sie doch diejenigen, für die die additiven Fertigungsverfahren heute noch nicht wirtschaftlich nutzbar sind, auf, die weitere Entwicklung aufmerksam zu verfolgen, um den richtigen Zeitpunkt zum Einstieg nicht zu verpassen.

5.2.1 Bauteilkosten

Additiv gefertigte Bauteile können günstiger sein, als ihre zerspanend hergestellten Pendanten. Typische Randbedingungen dafür sind, dass

- spanend sehr viel Material entfernt werden muss,
- wertvolle Werkstoffe verarbeitet werden und dass
- diese, z. B. Titan, nur schwer zerspanend zu bearbeiten sind.

Doch machen wir uns nichts vor: Bauteile, die zerspanend hergestellt werden können, sind derzeit so gefertigt auch normalerweise günstiger. Das gilt umso mehr, wenn das Engineering (Konstruktion und Programmierung der Bearbeitungsmaschine) für die zerspanende Bearbeitung bereits erfolgt ist und die Bauteile schon produziert werden.

Wenn bei Kunststoffanwendungen eine Spritzgussform einmal vorhanden ist, sind die Herstellkosten für

ein einzelnes Bauteil mittels Spritzguss niedrig und liegen nur knapp über den Rohstoffkosten. Ein additiv hergestelltes Bauteil kann damit nicht konkurrieren. Dennoch können die additiven Fertigungsverfahren nützlich sein, auch wenn ein Kunststoffteil sowohl additiv als auch durch Spritzguss herstellbar ist. Die Stückzahl, bei der eine Fertigungsalternative wirtschaftlich ist, ist abhängig von der Bauteilgröße und Komplexität. Wir geben dennoch die folgenden Zahlenbeispiele als eine erste Orientierung für die Größenordnungen:

- Stückzahl 1 bis ca. 1.000 pro Jahr: Die additiven Fertigungsverfahren sind typischerweise die wirtschaftlichste Option, da die hohen Herstellkosten für die Spritzgussform entfallen. Produktänderungen können jederzeit durchgeführt werden, ohne die Herstellbarkeit der vorigen Varianten (z. B. für Ersatzteile) zu gefährden.
- Stückzahl 1.000 bis 100.000 pro Jahr: Die Herstellung einer Spritzgussform aus Metall durch additive Verfahren sollte als eine Variante bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt werden. Um eher mit einem neuen Produkt auf dem Markt zu sein, sollte eine additive Pilotserienfertigung in Erwägung gezogen werden, bis die Spritzgussform zur Verfügung steht.
- Stückzahl größer 100.000 pro Jahr: Eine besonders langlebige, aus Vollmaterial klassisch gefertigte Spritzgussform ist voraussichtlich am sinnvollsten. Weiterentwicklungen am Produkt können mithilfe der additiven Fertigungsverfahren abgesichert werden, bevor neue Formen gebaut oder vorhandene modifiziert werden. Ersatzteile für Bauteile, deren Form nicht mehr zur Verfügung steht oder bei denen die Umrüstung der Spritzgussmaschine angesichts der wenigen benötigten Bauteile unrentabel ist, können additiv gefertigt werden.

Additive Fertigungsverfahren können in der Regel die Herstellkosten etablierter Massenproduktionsverfahren nicht unterbieten.

Additive Fertigungsverfahren sind dann vorteilhaft, wenn mit ihnen ein Zusatznutzen für das Produkt generiert werden kann.

5.2.2 Produkte mit einem Mehrwert

Da geringere Fertigungskosten in der Regel nicht das entscheidende Kriterium für die Wahl der additiven Fertigungsverfahren sind, müssen die so hergestellten

Produkte einen Mehrwert liefern, um wettbewerbsfähig zu sein. Dieser Mehrwert weist typischerweise folgende Merkmale auf:

- Senkung der Betriebskosten in der Nutzungsphase durch Leichtbau. Bild 10 zeigt ein Beispiel aus der Luftfahrtindustrie.
- Steigerung der Produktivität von Anlagen, die additiv gefertigte Komponenten einsetzen. Bild 3 und Bild 24 zeigen, wie durch additiv gefertigte bauteilnahe Kühlkanäle die Taktrate in Spritzgussmaschinen gesteigert werden kann.
- Steigerung des Kundennutzens. Bild 17 zeigt ein Beispiel aus der Prothetik. Die für den Heilerfolg entscheidenden offenporigen Oberflächen sind praktisch anders nicht herstellbar.
- Senkung des Montageaufwands und der Bauteilanzahl. Der in Bild 15 gezeigte Greifer mit seinen zueinander beweglichen Kunststoffteilen wurde in einem Schritt „fertig montiert“ additiv gefertigt. Auch bei Verteilern für Gase oder Flüssigkeiten ist die Fertigung aus einem Stück vorteilhaft, wenn beispielsweise auf mögliche Schwachstellen wie Schraubverbindungen mit Dichtungen verzichtet werden kann.
- Senkung der Nebenkosten: Dadurch, dass „additiv konzipierte“ Lösungen in der Regel aus weniger Einzelteilen bestehen, als konventionelle, reduziert sich nicht nur der Aufwand für die Montage, sondern auch derjenige zur Erstellung und Verwaltung von Zeichnungen und Bauteilfreigaben. Auch reduzieren sich üblicherweise die Kosten für Logistik und zur Qualitätssicherung.

5.3 Systemisches Arbeiten

Bei der Betrachtung der Bauteilkosten haben wir schon gesehen, dass nicht nur die reinen Herstellkosten des Metall- oder Kunststoffteils betrachtet werden sollten, sondern auch die Kosteneinsparungen und Marktvorteile die sich durch schnellere Verfügbarkeit, geringeren Montageaufwand, weniger Lagerhaltung, geringere Betriebskosten oder andere vorteilhafte Produkteigenschaften ergeben.

Das Denken im Gesamtsystem ist aber nicht nur bei der wirtschaftlichen Bewertung einer Lösung sinnvoll, sondern auch bei deren technischer Realisierung, denn:

Innovative Produktlösungen mit einem Mehrwert entstehen bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Aufgabe.

Beispiele

- Wenn Kühlkanäle in Spritzgusswerkzeuge integriert werden, ist ein Verständnis der Prozesse, die zu lokalen Wärmestaus führen, erforderlich.
- Wenn Ärzte und Ingenieure es als gegeben akzeptiert hätten, dass Implantate durch Schraubverbindungen mit den benachbarten Knochen verbunden werden, wären die offenporigen Lösungen aus Bild 17, die ein Verwachsen der Knochen mit dem Implantat ermöglichen, niemals erfunden und realisiert worden.

Fallbeispiel: Adapter für Kühlflüssigkeit

Was heißt „systemisches Arbeiten“ konkret? Nehmen wir an, wir hätten eine Anfrage für einen Adapter, der eine Kühlflüssigkeit von einer Baugruppe (z. B. einem Motor) zur nächsten (z. B. dem Kühler) leitet. Das wissen wir aber zunächst nicht.

Ungünstigster Fall: Die Kopie einer bestehenden Lösung

Der Kunde zeigt uns beispielsweise ein rechteckiges Bauteil mit einem großen gefrästen Kanal darin, dessen einzelne Abschnitte rechtwinklig zueinander angeordnet sind, weiteren kleineren Aussparungen und mehreren Bohrungen und Gewindegängen, die offensichtlich der Befestigung dienen. Mit ein bisschen Glück kann die Frage „Könnt ihr das bauen“ positiv beantwortet werden. Doch spätestens, wenn über die Kosten des additiven Nachbaus einer Konstruktion, die offensichtlich für Fräsmaschinen optimiert wurde, gesprochen wird, sind sie Verhandlungen beendet.

Kaum besser: Adaption der Lösung an die additiven Fertigungsverfahren

Wenn die Frage „Könnt ihr das bauen“ aufgrund von starken Wanddickensprüngen, großen, massiven Bereichen und ähnlichen Bauteileigenschaften, die für aufschmelzende additive Fertigungsverfahren ungeeignet sind, negativ beantwortet wird, könnte man auf die Idee kommen, einfach einige Bereiche als Hohlräume zu realisieren (vgl. VDI 3405 Blatt 3, Abschnitt 6.6.3), sodass ein Bauteil, das der ursprünglichen Konstruktion äußerlich ähnlich sieht, additiv gefertigt werden kann. Dieses Bauteil bringt aber – abgesehen von Gewichtseinsparungen – keinen neuen Nutzen, und ist wahrscheinlich immer noch teurer, als die konventionell gefertigte Vorlage.

Günstiger Fall: Verständnis der Aufgabe

Wenn bekannt ist, dass das Bauteil dazu da ist, im ausgefrästen Kanal eine Flüssigkeit zu führen, die

kleineren Aussparungen Dichtringe für einen Deckel aufnehmen sollen, und etliche Schraubverbindungen nur dazu da sind, den Deckel möglichst gut und gleichmäßig anzupressen, kann an einer wirklich besseren Lösung gearbeitet werden.

- Alle Bauteilbereiche, die nur da sind, weil für eine spanende Bearbeitung nach der Devise „Am Anfang war ein rechteckiger Klotz“ konstruiert wurde, können entfallen.
- Ober- und Unterteil können als ein Werkstück gefertigt werden. Die Dichtung und die Schraubverbindungen zum Anpressen können entfallen. Aufgrund der fehlenden Dichtung steigt die Zuverlässigkeit. Zugleich wird der Montageaufwand reduziert.
- Der Flüssigkeitskanal wird nicht mehr rechteckig, sondern rund und ohne Knicke im Strömungsweg gestaltet. Durch die strömungstechnische Optimierung können möglicherweise die Pumpleistung und die Betriebsgeräusche reduziert und die Wartungsintervalle verlängert werden, da sich Verunreinigungen in der Flüssigkeit in der Leitung nicht mehr absetzen.

Bild 5 in der Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 zeigt an einem ähnlichen Beispiel anschaulich, wie die Bauteilkonstruktion umgestaltet werden kann, um die Möglichkeiten der additiven Fertigungsverfahren zu nutzen.

Konstrukteure müssen „**additiv denken**“ um die Vorteile der additiven Fertigungsverfahren zu nutzen.

Optimaler Fall: Verständnis der Aufgabe im Systemzusammenhang

Bisher haben wir in unserem Fallbeispiel nur das Bauteil selbst betrachtet. Seine Aufgabe im Gesamtsystem haben wir nur durch die strömungstechnische Optimierung der Fluidleitung berücksichtigt. Wir haben nicht hinterfragt, warum das Bauteil so, wie es konstruiert wurde, eigentlich da ist, an welche Bauteile es angeschlossen wird und welche Bauteileigenschaften ursprünglich wünschenswert gewesen wären, und nur bei der ursprünglichen Konstruktion nicht realisierbar waren. Die folgenden Beispiele sollen veranschaulichen, was wir damit meinen und als Inspiration dienen, das Optimierungspotenzial in den eigenen Konstruktionen zu entdecken:

- Werden am Ein- und Ausfluss des Bauteils Standardkupplungen aufgeschraubt oder angeschweißt? Die komplizierten Geometrien der Kupplungen können additiv direkt mit im Bauteil integriert

werden. Der Montageaufwand und die Anzahl der abzudichtenden Verbindungen sinken weiter.

- Ist ein größerer Querschnitt für die Flüssigkeit wünschenswert? Mit der kompakteren additiven Konstruktionsweise kann der Querschnitt der ursprünglichen Rohrleitung bei gleichem Bauraum vergrößert werden.
- Wurde der Adapter so massiv ausgeführt, da er an einem stark vibrierenden Motor angeschraubt wird? Durch die kompaktere Bauform des additiv gefertigten Bauteils kann die Rohrleitung als eine flexiblere Schlaufe realisiert werden. Motor und Kühler können schwingungstechnisch entkoppelt montiert werden. Verschleiß und Betriebsgeräusche sinken.
- Ist es nützlich, dass Wärme auch schon vom Adapter an die Umgebung abgegeben wird? Im bisherigen Bauraum können Kühlrippen direkt an die Rohrleitung integriert werden.
- Oder soll möglichst kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden? In Anlehnung an die Funktionsweise einer Isolierkanne kann die Rohrleitung doppelwandig ausgeführt werden.

Ein reales Beispiel für das Verständnis der Aufgabe im Systemzusammenhang wird in Bild 30 gezeigt. Der Kühlkörper für LED-Scheinwerfer wird durch den Fahrtwind gekühlt. Auf eine aktive Kühlung kann so verzichtet werden.



Bild 30. Prototyp eines bionischen Kühlkörpers für LED-Scheinwerfer in Fahrzeugen. (Quelle: EDAG)

5.4 Neue Geschäftsmodelle

Im Abschnitt 5.1 sind wir mit

- der Fertigung nach Bedarf,
- der Fertigung vor Ort und
- der Ersatzteilmontage für langlebige Investitionsgüter

schon auf einige Aspekte eingegangen, die die Wertschöpfungsketten in Unternehmen verbessern können. Im Abschnitt 5.2 haben wir dargestellt, unter welchen Randbedingungen additiv hergestellte Bauteile Kostenvorteile gegenüber konventionell hergestellten Konstruktionen haben können. Im Abschnitt 5.3 haben wir dazu aufgerufen, über den Tellerrand des einzelnen Bauteils hinaus zu denken und Gegebenes nicht als gegeben zu akzeptieren, um die Potenziale der additiven Fertigungsverfahren effizient zu nutzen. Das alles sind Optimierungsprozesse innerhalb einer Organisation, von denen der Kunde außer durch schnelleren Service und bessere Produkte nichts merkt.

Durch die additiven Fertigungsverfahren können sich auch neue Kunden-Lieferantenbeziehungen ergeben. Diese beschreiben wir in den folgenden Abschnitten.

5.4.1 Individualisierte Produkte

Bei Dienstleistern, die Figuren wie die in Bild 20 gezeigten herstellen, ist die Fertigung von Einzelstücken (normalerweise eine 3-D-Figur des Auftraggebers selber) zentrales Element des Geschäftsmodells. Ohne die Möglichkeit, Einzelstücke zu fertigen, wäre das Geschäftsmodell undenkbar.

Auch das in Bild 7 gezeigte Konzept, Serienprodukte durch additiv gefertigte Ergänzungen aufzuwerten, ermöglicht die Erschließung neuer Kundengruppen. Das gilt insbesondere in Kombination mit webbasierten Dienstleistungen. Mit einem Online-Konfigurator können Kunden ihr persönliches Produkt gestalten oder Daten dafür hochladen.

5.4.2 Endkundengeschäft

Die Möglichkeit, Produkte zu individualisieren, schafft neue Geschäftsbeziehungen, insbesondere auch zu Endkunden. Ein Beispiel: Die Firma Arburg hat auf der Hannovermesse 2015 demonstriert, wie handelsübliche Lichtschalter für Gebäude durch additiv gefertigte Aufdrucke individualisiert werden können. Jeder, der auf einer Leiste mit fünf gleichen Schaltern schon einmal alle ausprobiert hat, bis der für den Flur gefunden wurde, kann sich den Nutzen einer dauerhaften Beschriftung vorstellen. Nehmen wir an, diese Technologiedemonstration auf einer Messe soll ein Produkt werden. Der

Schalterhersteller, der bisher womöglich nur mit einigen Großhändlern und Baumärkten zusammengearbeitet hat, steht nun vor der Herausforderung, Anfragen einzelner Elektroinstallateure und Endkunden zu bearbeiten und die logistischen Voraussetzungen zu schaffen, um die richtigen Produkte an die richtigen Kunden zu liefern. Mit der Chance, zusätzliche Nachfrage nach individuellen Produkten im entsprechenden Preissegment zu generieren, gehen also auch Herausforderungen einher. Das gilt insbesondere dann, wenn Firmen, die bisher nur mit Geschäftskunden (B2B) zusammengearbeitet haben, nun direkten Kontakt mit den Endkunden (B2C) haben. Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind hier nämlich anders. Das Thema wird unter „Handlungsbedarf“ in Abschnitt 6.6 noch ausführlicher diskutiert.

5.4.3 Ausgeprägte Arbeitsteilung

Arbeitsteilige Fertigungsprozesse unter Beteiligung verschiedener Firmen gab es auch schon vor den additiven Fertigungsverfahren. Mit diesen Verfahren kann die Arbeitsteilung sehr ausgeprägt sein. Es besteht so einerseits die Möglichkeit, die Verfahren zu nutzen, ohne die gesamte Wertschöpfungskette im eigenen Unternehmen abzubilden, und andererseits die Chance, sich auf Teilbereiche der Fertigungskette zu spezialisieren und sein Know-how extern anzubieten. Die Wertschöpfungskette bei der additiven Fertigung ist in Bild 31 vereinfacht dargestellt.

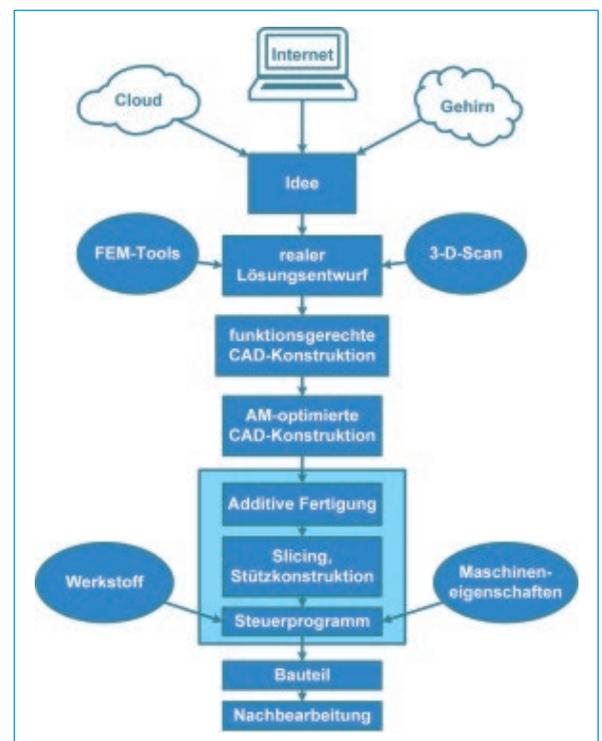


Bild 31. Wertschöpfungsprozess mit additiven Fertigungsverfahren (Quelle: VDI e.V.)

Typische Teilschritte der Wertschöpfung sind:

- Kundenidee/Problem

Der Auftraggeber formuliert, welche Problemlösung er gerne hätte. Möglicherweise greift er dabei auf Konstruktionen zurück, die er von dritten Quellen, z. B. aus dem Internet, erhalten hat.

realer Lösungsentwurf

Die grobe Lösungsidee wird in einen konkreten Lösungsentwurf umgewandelt. Möglicherweise werden von einem Dienstleister dabei technische Möglichkeiten berücksichtigt, die dem Kunden nicht bekannt oder zugänglich waren. Es können technische Hilfsmittel eingesetzt werden:

- FEM-Analyse/bionische Optimierungsverfahren: Die Lösungsidee oder die Anforderung wird rechnerlesbar formal beschrieben und von einem Softwareprogramm automatisch optimiert.
- 3-D-Scan: Wenn eine 3-dimensionale Vorlage des zu erstellenden Bauteils vorliegt, kann diese Vorlage von einem 3-D-Scanner erfasst und dann digital weiterbearbeitet werden. Das „Bauteil“ muss nicht zwingend ein technischer Gegenstand sein, wie Bild 19 und Bild 20 zeigen.

VDI 5620 Blatt 1 geht ausführlich auf das „Reverse Engineering von Geometriedaten“ ein.

- funktionsgerechte CAD-Konstruktion

Die zuvor erarbeiteten Lösungen werden in eine dreidimensionale technische Zeichnung umgewandelt und im Rechner als CAD-Daten abgespeichert. Normalerweise wird diese Tätigkeit von Konstrukteuren durchgeführt. Bei mit 3-D-Scannern erfassten oder bei mit FEM-Analysen berechneten Geometrien kann die Überführung in eine CAD-Konstruktion automatisiert mit Software erfolgen.

- AM-optimierte CAD-Konstruktion

Konstruktionen, die

- mittels Software erstellt wurden (FEM-Analyse),
- von aus einem 3-D-Scanner stammen oder
- die ein Konstrukteur erstellt hat, der mit den additiven Fertigungsverfahren nicht vertraut ist,

enthalten üblicherweise Konstruktionselemente, die mit der Fertigungsmaschine technisch nicht sinnvoll oder nicht in der gewünschten Qualität herstellbar sind. Diese Elemente müssen von einem Konstrukteur, der die Eigenschaften der Fertigungsverfahren und der so ge-

fertigten Bauteile kennt, unter Wahrung der Funktionseigenschaften umkonstruiert werden. Wie im Abschnitt 5.3 ausführlich dargestellt wurde, kann in diesem Schritt die eigentliche Wertschöpfung liegen. Das Ergebnis der Datenaufbereitung sind wieder CAD-Daten.

- additive Fertigung

Die CAD-Daten werden von Software (teilweise in mehreren Teilschritten und teilweise mit Softwaremodulen, die nicht vom Anlagenhersteller stammen), in Datensätze umgewandelt, die die additive Fertigungsanlage ansteuern können. Auch können Hilfselemente, sogenannte Stützkonstruktionen, zusätzlich konstruiert werden, die für die additive Fertigung erforderlich sind und nach dem 3-D-Herstellprozess wieder entfernt werden. Bei der additiven Fertigung werden noch Prozessparameter eingestellt, die von den Eigenschaften der verwendeten Maschine und der Werkstoffcharge abhängig sein können. Die Parameter richten sich auch nach den Erfordernissen des zu fertigenden Bauteils (z. B. der Füllgrad) und können genutzt werden, um bewusst Bereiche eines Bauteils mit unterschiedlichen Eigenschaften auszustatten.

- Nachbearbeitung:

Abhängig vom jeweiligen additiven Herstellverfahren und den gewünschten Bauteileigenschaften sind Nachbearbeitungsschritte zwingend erforderlich oder können optional durchgeführt werden. Typische Nachbearbeitungsschritte sind:

- Loslösen von der Bauplattform
- Entfernen der Stützkonstruktionen
- Reinigen der Bauteile (Pulver, Harz)
- Glätten oder Beschichten der Oberflächen
- Nachfräsen von Funktionsflächen auf Maß
- Wärmenachbehandlung bei Metallen: spannungsarm Glühen, Vergüten usw.

5.4.4 Produkte ohne eigenen Maschinenpark: optimal für Start-ups

Entlang der im vorigen Abschnitt skizzierten Wertschöpfungskette gibt es zahlreiche Unternehmen, die Produkte und Dienstleistungen zu einem oder mehreren Teilschritten anbieten. Kombiniert mit der Möglichkeit, Konstruktionsdaten über das Internet auszutauschen, ermöglicht das jungen Unternehmen, Bauteile mit speziellen Geometrien zu realisieren und Produkte mit professionellem Design auszuliefern, ohne einen eigenen Maschinenpark zu betreiben.

6 Handlungsfelder

Die additiven Fertigungsverfahren müssen sich technologisch weiterentwickeln, um weitere Anwendungsfelder zu erschließen (Abschnitt 6.1). Dabei sind Fragen rund um die Arbeitssicherheit für viele Anwender von Pulverwerkstoffen beim Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen neu (Abschnitt 6.2). Die Voraussetzung für eine Verbreitung als Fertigungsverfahren ist, dass Konstrukteure die Vorteile der additiven Fertigungsverfahren und der so gefertigten Bauteile kennen und effektiv nutzen. Das entsprechende Know-how ist bis heute weit von einer flächendeckenden Verbreitung entfernt. Es besteht also Bedarf an speziellen Ausbildungen und Schulungen (Abschnitt 6.3) sowie an einer systematischen Applikationsforschung (Abschnitt 6.4). Ein sprunghafter Anstieg der Nutzung kann zu Lieferengpässen bei additiven Fertigungsanlagen und den benötigten Werkstoffen führen (Abschnitt 6.5) Mit der möglichen massiven Arbeitsteilung und der weitgehend digitalen Prozesskette ergeben sich neue Fragen an das Recht. Auch diese sind zu klären, damit Geschäfte sicher abgewickelt werden können. Das Thema wird in Abschnitt 6.6 ausführlich diskutiert.

6.1 Technologische Weiterentwicklungen

Im Folgenden wird aufgezeigt, wo der Bedarf nach technologischen Verbesserungen offensichtlich ist.

6.1.1 Prozessverständnis

In vielen Bereichen müssen die grundsätzlichen Eigenschaften der Rohstoffe oder der additiv hergestellten Bauteile noch erforscht werden.

Alterungsverhalten des Pulvers bei der Lagerung

Diese Frage wird besonders bei Metallpulvern der strahlschmelzenden Verfahren intensiv diskutiert. Dabei ist zwischen verschiedenen Formen der Lagerung zu unterscheiden, beispielsweise im verschlossenen oder teilentleerten Original-Versandgefäß oder in der Fertigungsanlage. Natürlich verhalten sich diesbezüglich nicht alle Metalle gleich. Die Arbeitsgruppe „Pulver“ im VDI-Fachausschuss FA 105.3 „Additive Manufacturing – Metalle“ beschäftigt sich mit diesem Thema.

Mechanische Eigenschaften der additiv hergestellten Bauteile

Die mechanischen Eigenschaften von Probekörpern aus einigen Werkstoffen wurden bereits systematisch untersucht und in VDI-Richtlinien veröffentlicht:

- Laser-Strahlschmelzen: martensitaushärtender Werkzeugstahl 1.2709 (Anhang von VDI 3405 Blatt 2)
- Laser-Strahlschmelzen: Aluminiumlegierung AlSi10Mg (VDI 3405 Blatt 2.1)
- Laser-Strahlschmelzen: Nickellegierung Werkstoffnummer 2.4668 (VDI 3405 Blatt 2.2, in Vorbereitung)
- Laser-Sintern: Kunststoff PA 12 (VDI 3405 Blatt 1)

Die in den Richtlinien veröffentlichten Daten stammen aus Ringversuchen, die von Mitgliedern des Fachausschusses organisiert wurden. Dazu wurden mehrere 100 Proben von unterschiedlichen Gruppen auf Anlagen verschiedener Hersteller hergestellt und dann in mehreren Laboren systematisch untersucht. Von einer umfassenden Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der vielfältigen Kombinationen von Werkstoffen und additiven Fertigungsverfahren sind wir aber noch weit entfernt.

Technologische Grenzen der herstellbaren Geometrien

Nachdem in Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 beschrieben wurde, was bei der Konstruktion für die additiven Fertigungsverfahren grundsätzlich zu beachten ist, wird der Fachausschuss FA 105.3 „Konstruktionsempfehlungen“ untersuchen, welche Geometrien tatsächlich sinnvoll herstellbar sind und welche nicht. Alleine bei der Frage, wie ein Probekörper aussehen sollte, um möglichst viele für die additive Fertigung kritische Geometrien abzudecken, wird es spannende Diskussionen geben.

Thermische Spannungen im Bauteil

Es ist bekannt, dass beim Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen und verwandten aufschmelzenden Verfahren thermisch induzierte Eigenspannungen im Bauteil entstehen. Bekannt ist auch, dass diese durch eine Wärmebehandlung abgebaut werden können und

dass sich dadurch das Bauteil verformen kann. Es gibt mehrere Entwicklungsrichtungen, um das Problem zu lösen, beispielsweise:

- Prozessverbesserungen in der Anlage
- für die additiven Fertigungsverfahren optimierte Konstruktionsweisen
- Verständnis der Effekte, die zu thermischen Spannungen führen. Ähnlich wie beim Spritzguss, wo das Schrumpfen des Bauteils beim Abkühlen konstruktiv direkt mitberücksichtigt wird, könnte auch bewusst eine verzerrte Geometrie konstruiert werden, die bei der Wärmebehandlung dann die Sollgeometrie annimmt.

Neben thermischen Spannungen entstehen bei den meisten additiven Fertigungsverfahren Spannungen und gelegentliche Verformungen aufgrund der Verfestigung und der damit einhergehenden Schrumpfung der Schichten auf festem Untergrund. Prozessverbesserungen und Konstruktionsrichtlinien sollten hier Abhilfe schaffen.

Haltbarkeit bei dynamischen Belastungen (Lastwechselfähigkeit)

Es ist unstrittig, dass die Haltbarkeit bei dynamischen Belastungen ein wichtiges Thema ist. Offen ist nur, wie praxisrelevante Aussagen zur Lastwechselfähigkeit erzeugt werden können, ohne jeweils anwendungsnahe Versuche am realen Bauteil durchzuführen. Da einerseits bekannt ist, dass Mikrorisse an der Oberfläche typische Ausgangspunkte für Bauteilbrüche sind und andererseits eine additiv gefertigte Oberfläche rau ist, ist die Verwendung von additiv gefertigten Bauteilen ohne eine Oberflächenbehandlung bei wechselnden Lasten nicht sinnvoll. Daher besteht Klärungsbedarf, wie die Haltbarkeit bei dynamischen Belastungen für einen Werkstoff aus einem bestimmten Herstellverfahren sinnvoll ermittelt werden kann. Die Tatsache, dass auch hier Eigenspannungen von großer Bedeutung sind, macht diese Aufgabe nicht einfacher.

Bestehende Berechnungsmethoden – sowohl analytisch (z. B. FKM-Richtlinie [20]) als auch simulationsgestützt (z. B. FEM) – sind aufgrund der eingeschränkten Datenbasis nur teilweise bzw. mit Adaptionen anwendbar. Dies vergrößert den Aufwand für die Auslegung von Bauteilen speziell für die additive Fertigung und macht heute oftmals eine finale Funktionsüberprüfung dynamisch belasteter und additiv gefertigter Bauteile über einen Funktionstest erforderlich.

Wechselwirkungs-dreieck Anlage - Werkstoff - Parameter

Bei den offenen Systemen (Pulver, Polymere, Kunststoffdraht) müssen Prozessparameter entsprechend dem Zustand des Rohmaterials angepasst werden, bei geschlossenen Systemen (Drahtspulen, Polymerkartuschen) entfällt dies meist.

Um beispielsweise beim Laser-Strahlschmelzen eine gute Bauteilqualität zu erreichen, muss das Metallpulver gewisse Mindestanforderungen erfüllen. Die Fertigungsanlage muss die technischen Voraussetzungen bieten, um beispielsweise filigrane Strukturen zu fertigen. Auch wirken sich Prozessparameter wie die Anordnung des Bauteils in Bauraum oder die Laserleistung beim Herstellungsprozess auf die Produktqualität aus. Bis hier sind diese Erkenntnisse trivial. Die technische Herausforderung liegt darin begründet, dass Anlage, Pulver und Parameter miteinander in Wechselwirkung stehen. Bild 32 veranschaulicht das. Dadurch ist es schwierig, „gutes Pulver“, eine „einwandfrei funktionierende Anlage“ und „richtige“ Parametrierungen zu spezifizieren.

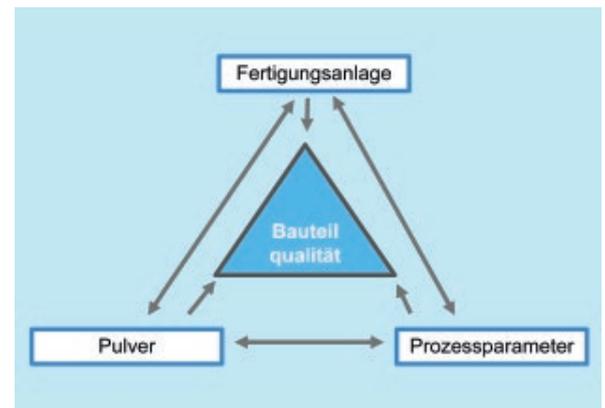


Bild 32. Einflussgrößen auf die Bauteilqualität (Quelle: VDI e.V.)

Pulver

Da es sich bei Pulversystemen um offene Materialsysteme handelt, kommt hier den unterschiedlichen Materialeigenschaften besondere Bedeutung zu.

Es können derzeit keine Grenzwerte für Pulvereigenschaften spezifiziert werden, die ein Pulver als „auf jeden Fall geeignet“ oder „auf jeden Fall ungeeignet“ für das Laser-Strahlschmelzen klassifizieren. Schlechtere Pulver können durch geschickte Prozessparameterwahl noch verarbeitet werden und gute Pulver sind kein Garant für gute Produkte, wenn die Anlage für die Aufgabe ungeeignet ist oder die Prozessparameter nicht stimmen.

Die Mitglieder der VDI Fachausschüsse FA 105.1 „Additive Manufacturing – Kunststoffe“ und FA 105.2 „AM – Metalle“ untersuchen derzeit, welche Pulvermerkmale signifikant für die Bauteilqualität sind. Daraus sollen Qualitätsmerkmale und Prüfvorschriften für die Pulverwerkstoffe abgeleitet werden.

Fertigungsanlage

Nehmen wir an, fünf baugleiche additive Fertigungsanlagen stehen in einer Werkhalle nebeneinander. Mit einer bestimmten Pulvercharge liefern alle fünf Anlagen hervorragende Ergebnisse. Mit einer anderen Pulverlieferung fällt die Qualität einer Anlage hinter die der anderen vier mit Standardparametern zurück. Durch geringfügige Parameteranpassungen stimmt die Qualität auch bei dieser Anlage wieder.

Es ist noch ungeklärt, wie viel Fingerspitzengefühl den Maschinenbedienern bei der Anlagenkonfiguration abverlangt werden darf, wie viel Prozessstabilität von den Anlagen erwartet werden kann, und wie diese zu quantifizieren ist.

Parameter

Die Möglichkeit, Prozessparameter während der Fertigung zur lokalen Beeinflussung der Bauteileigenschaften gezielt zu verändern, wird in der Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 als ein Vorteil der additiven Fertigungsverfahren aufgeführt. Mit Blick auf die Reproduzierbarkeit des Prozesses und dessen Dokumentation sind zahlreiche Einstellmöglichkeiten aus Sicht der Qualitätssicherung nicht wünschenswert. In vielen Technologiebereichen ist zu beobachten, dass mit zunehmender Reife der Technologie die Anzahl der Parameter, die der Kunde beeinflussen kann (oder im „Normalbetrieb“ beeinflussen will), abnimmt. In der Computertechnik beispielsweise waren das Formatieren einer Festplatte, das Brennen einer CD oder die Konfiguration eines Druckers zunächst Expertenaufgaben, die Detailkenntnisse über die Funktionsweise der jeweiligen Geräte erforderten. Mittlerweile sind hier die Einflussmöglichkeiten der Anwender weitgehend verschwunden und praktisch auch überflüssig geworden. Während einige Experten die Möglichkeit vermissen, mehr aus den Geräten herauszuholen, profitiert die Masse der Anwender von der einfachen Bedienung.

Es ist zu erwarten, dass die Anzahl der im Normalbetrieb konfigurierbaren Parameter mit zunehmender industrieller Relevanz auch bei den additiven Fertigungsverfahren verringert wird.

Dieser Trend ist bereits deutlich bei weniger komplexen additiven Fertigungsverfahren wie FDM und

PolyJet zu beobachten, wo materialbezogene Prozessparameter weitgehend entfallen und diese vorwiegend zur Steuerung der Bauteileigenschaften wie dem Füllgrad oder zur Definition von Bereichen unterschiedlicher Materialeigenschaften verwendet werden.

6.1.2 Bauteileigenschaften

Da mit dem Laser-Strahlschmelzen hergestellte Bauteile eine feinere Mikrostruktur haben, ist zu untersuchen, ob spezifisch für dieses Verfahren entwickelte Wärmenachbehandlungen die Bauteilqualität weiter verbessern können. Auch ist eine weitere Reduzierung der Poren wünschenswert.

Durch die Verbesserung der Oberflächenqualität muss die Notwendigkeit der Nacharbeit von additiv gefertigten Bauteilen reduziert werden. Additiv gefertigte Bauteile werden derzeit je nach Anwendungsfall den Anforderungen an die Haptik und die visuelle Anmutung sowie an die technisch-mechanischen Eigenschaften der Bauteile ohne einen Post-Prozess oft nicht gerecht.

Die bestehenden Technologien zur Oberflächenbeschichtung (Coating) der additiv gefertigten Bauteile (vergleiche Bild 22) sowie der massentauglichen automatischen Oberflächenglättung müssen erweitert werden und breiter nutzbar sein.

6.1.3 Anlagenperformance

Mit additiven Fertigungsverfahren dauert der Bau eines einzelnen Teils unter Umständen mehrere Stunden. Je nach Bauteil ist die spanende Bearbeitung schneller, und der Fertigungstakt einer Spritzgussmaschine ist unerreichbar. Häufig ist eine Kleinserienproduktion oder gar eine Massenfertigung daher nur mit dem parallelen Einsatz einer Vielzahl von Fertigungsmaschinen realisierbar. Damit ergibt sich folgender Optimierungsbedarf der Fertigungsmaschinen:

- Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit, beispielsweise durch multiplen Lasereinsatz, neue Technologien zur Energieeinbringung sowie optimierte Bereitstellung des Schichtmaterials
- Verbesserung der Reproduzierbarkeit, beispielsweise durch homogenere Temperaturverteilung im Bauraum
- Parallelverarbeitung mehrerer Werkstoffe in einem Bauteil und einer Maschine
- Vergrößerung der möglichen Bauteildimensionen
- Verringerung der Rüstzeiten

- Minimierung und Automatisierung der derzeit manuellen Handhabungsschritte
- Vereinfachung der Anlagenbedienung
- Automatisierung der Datenaufbereitung
- Automatisierung der Materialhandhabung und -zuführung
- Integration der additiven Fertigungsanlage in bestehende automatisierte Fertigungslinien durch
 - Weiterverarbeitung konventionell gefertigter Vorstufen in einer additiven Fertigungsanlage
 - automatische Zuführung additiv gefertigter Bauteile zu anderen Fertigungseinrichtungen

6.1.4 Software

Die gängigen Softwaretools für die Konstruktion berücksichtigen die speziellen Eigenschaften der additiven Fertigungsverfahren noch nicht.

Funktionsgerechte CAD-Konstruktion

Es müssen Softwaretools entwickelt werden, die die Konstrukteure von Routinearbeiten entlasten. Da additive Fertigungsverfahren besonders geeignet sind, filigrane Strukturen mit Verästelungen, variablen Durchmessern und nicht periodischer Anordnung sowie komplexe innere Strukturen von Leichtbauteilen zu realisieren, werden zukünftig vermehrt Software-Tools benötigt, die beispielsweise entsprechende bionisch optimierte Konstruktionen oder komplexe Füllstrukturen automatisch erzeugen. Grundprinzipien der bionischen Optimierung werden in der Richtlinie VDI 6224 Blatt 2 erläutert. Bis diese Prinzipien als Softwarebaustein für gängige CAD-Programme zur Verfügung stehen, ist noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten.

AM-optimierte CAD-Konstruktion

Die derzeit weitgehend manuelle Aufbereitung der Daten zur additiven Fertigung (Entfernung doppelter Flächen, zu dicht beieinander liegende getrennte Flächen, usw.) wird weiter automatisiert werden. Unter Berücksichtigung der Anlagenspezifikation sollten Bereiche der Konstruktion, die so nicht gefertigt werden können, automatisch erkannt werden.

Datenformate für die additive Fertigung

Gängiges Format zum Austausch von Daten für die additive Fertigung sind derzeit STL-Dateien. Mit Blick

auf die additiven Fertigungsverfahren hat dieses Format einige Beschränkungen. Mit Windows 10[®] wurde 2015 das Dateiformat 3MF eingeführt [21; 22]. Dieses Format codiert neben 3-D-Strukturen auch Farben und Texturen und soll für neue Anforderungen erweiterbar sein. Es ist derzeit offen, welches Dateiformat sich zukünftig durchsetzen wird.

6.1.5 Werkstoffe

Die Auswahl an geeigneten Werkstoffen für additive Fertigungsverfahren muss erweitert werden. Das gilt besonders für folgende Werkstoffgruppen:

- technische Thermoplaste
- biokompatible, biologisch abbaubare Werkstoffe
- nachwachsende Rohstoffe
- natürliche und organische Werkstoffe
- Nanowerkstoffe
- Keramiken
- farbige und transparente Werkstoffe
- Metall- und Kunststoffkomposite

sowie entsprechende Multimaterialkombinationen.

Metalllegierungen

Die heute üblichen Metalllegierungen haben sich durchgesetzt, weil sie die jeweils gewünschten Eigenschaften bei akzeptablen Werkstoffkosten und hinreichend guter Verarbeitbarkeit liefern.

Dabei bezieht sich die Verarbeitbarkeit auf konventionelle Verfahren der Umformung oder auf eine spanenden Bearbeitung. Mit additiven Fertigungsverfahren können Legierungen verarbeitet werden, die bisher aufgrund ihrer schlechten konventionellen Verarbeitbarkeit gemieden wurden. Bild 33 zeigt ein Beispiel aus einem Verbundprojekt [23]. Die Turboladerräder wurden direkt nach der additiven Fertigung, also ohne jede Nachbearbeitung, fotografiert.

Die Bauteile bestehen aus dem Werkstoff Titanaluminid, der im Vergleich zu Nickel-Basis-Superlegierungen nur eine halb so hohe Dichte und darüber hinaus ein gutes Korrosionsverhalten bei erhöhter Temperatur zeigt. Die additive Fertigung ist für dieses Bauteil in Kombination mit dem Werkstoff in mehrerer Hinsicht vorteilhaft:

- Das Material ist teuer aber bei der additiven Verarbeitung wird der Werkstoff besser genutzt als bei der spanenden Bearbeitung.

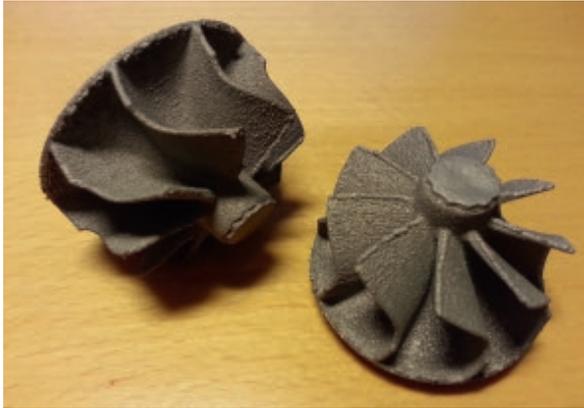


Bild 33. Machbarkeitsdemonstratoren für Turboladerräder aus TiAl (RNT650) (Quelle: Fraunhofer IFAM Dresden)

- Der Werkstoff ist sehr schwer bearbeitbar, sodass sich Material- und Werkzeugkosten einsparen lassen.
- Das Design kann hinsichtlich Gewicht und Funktionalität optimiert werden.

Als Verfahren für die Herstellung kam das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) zum Einsatz. Für die Weiterführung bis zu einem ersten Serienprodukt sind derzeit jedoch grundlegende Voraussetzungen, wie ein hinreichend großer Bauraum, noch nicht erfüllt.

Die Machbarkeitsstudie zeigt jedoch, dass die Verwendung bislang wenig beachteter Legierungen mit additiven Fertigungsverfahren möglich wird. Damit eröffnet sich ein weites Feld für metallurgische Grundlagenforschung, zumal es keine festen Regeln gibt, welche Werkstoffe mittels Strahlschmelzen verarbeitet werden können. Eine gute Schweißbarkeit und eine geringe thermische Ausdehnung sind nur erste Anhaltspunkte.

6.1.6 Qualitätssicherung

Gängige Qualitätssicherungsprozesse sind auf die Serienproduktion gleicher Bauteile ausgelegt:

- Zerstörende Bauteilprüfungen sind nur bei Stichproben aus größeren Serien wirtschaftlich zu verantworten und sind nur sinnvoll, wenn die zerstörend untersuchten Muster als repräsentativ für die Serie gelten können.
- Zerstörungsfreie Mess- und Prüfverfahren wie die industrielle Bildverarbeitung setzen gleichbleibende oder zumindest vorab spezifizierbare Bauteileigenschaften voraus (siehe VDI/VDE/VDMA 2632 Blatt 2). Systeme, die flexibel für neue Aufgaben

konfiguriert werden können, erfordern bei jeder neuen Produktgeometrie den Eingriff von geschultem Personal.

Für die Einzelteil- und Kleinserienfertigung im industriellen Maßstab sind neue Konzepte zur Qualitätssicherung zu entwickeln.

Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächengüte

Durch den schichtweisen Aufbau entstehen bei den additiven Fertigungsverfahren abhängig von der Ausrichtung einer Bauteiloberfläche im Bauraum unterschiedliche Oberflächengüten.

Das in industriellen Anwendungsbereichen etablierte und in DIN EN ISO 4287 standardisierte Tastschnittverfahren zur Oberflächencharakterisierung liefert aufgrund der Schichtstruktur der additiv hergestellten Flächen je nach Winkel zwischen abgetasteter Linie und Schicht unterschiedliche Ergebnisse. Aber auch bei konstanter Ausrichtung unterliegen die Messwerte bei lateraler Variation der Messposition aufgrund der Oberflächencharakteristik einer hohen Streuung. Daher ist es sinnvoll, die Oberfläche an jedem Messpunkt dreidimensional zu analysieren (Bild 34). Bild 35 zeigt exemplarische Topografien und Nahaufnahmen von unterschiedlich orientierten Oberflächen des Laser-Strahlschmelzens.

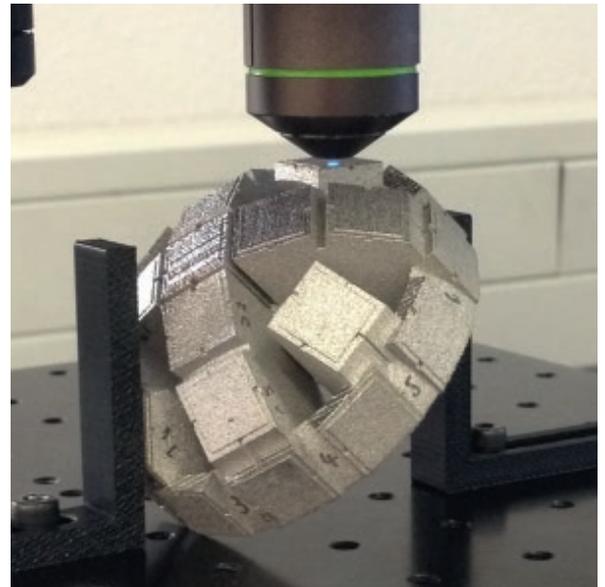


Bild 34. Dreidimensionale Analyse der Oberflächencharakteristik eines laserstrahlgeschmolzenen Probekörpers mit einem surf-Konfokalmikroskop. (Quelle: Nano-Focus AG/RTC Universität Duisburg-Essen)

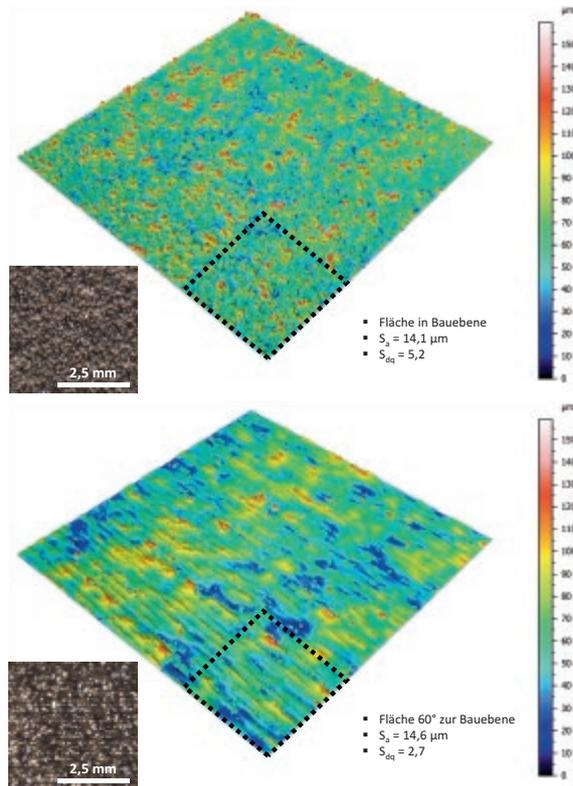


Bild 35. Mit konfokaler Mikroskopie aufgenommene Oberflächentopografien sowie dazugehörige Ausschnitte einer Nahaufnahme (Quelle: NanoFocus AG/RTC Universität Duisburg-Essen)

Sowohl in den Fotos als auch in den Topografien sind unterschiedliche Oberflächeneigenschaften offensichtlich. Dennoch ist die mittlere arithmetische Höhe S_a – als dreidimensionales Pendant zum klassischen arithmetischen Mittenrauwert R_a – bei beiden Oberflächen annähernd gleich und damit zur Klassifizierung ungeeignet. Der mittlere quadratische Gradient S_{dq} hingegen ist bei den gezeigten Mustern signifikant unterschiedlich [24].

Das Beispiel zeigt, dass bei der Anwendung dreidimensionaler Parameter zur Charakterisierung von additiv gefertigten Oberflächen deren spezifische Eignung zu evaluieren ist. Hier ist insbesondere deren Potenzial für weitere Aussagen über das Bauteil zu untersuchen – beispielsweise bei einer Korrelation der Oberflächencharakteristik mit mechanischen Bauteileigenschaften.

6.2 Arbeitssicherheit

Zur Nutzung der Potenziale, die aus pulverbasierten additiven Fertigungsverfahren resultieren, gilt es auch, geeignete Sicherheitskonzepte zu entwerfen

und zu implementieren. Hierbei sind im Wesentlichen zwei Punkte zu berücksichtigen. Zum einen ist die verwendete Pulverfraktionierung relevant, die je nach Pulverpartikelgröße lungen- und alveolengängig ist. Demnach sind die raum- und personenbezogene Belastung sowie die zugehörigen stoffspezifischen Grenzwerte bei verschiedenen Arbeitsschritten zu beachten. Die Arbeitsschritte umfassen typischerweise das Befüllen der Anlagen bzw. den Ausbau fertiger Bauteile nach einem Bauprozess, das Entfernen von Stützkonstruktionen sowie die Aufbereitung von Pulver mittels Sieben. Für die Handhabung von Pulver wird empfohlen, eine Schutzausrüstung entsprechend des Sicherheitsdatenblatts zu tragen oder technische Maßnahmen zur Minimierung der personenbezogenen Belastung, beispielsweise in Form eines Handschuhkastens (auch: Glovebox), umzusetzen.

Der zweite Punkt der im Rahmen der Arbeitssicherheit in Bezug auf die Handhabung von Pulverwerkstoffen von Relevanz ist, ist der Explosionsschutz. Vor allem Pulverwerkstoffe mit einer niedrigen relativen Dichte oder einer geringen Mindestzündenergie neigen beispielsweise auch durch elektrostatische Aufladung zur Explosion bzw. zum Brand. Daher wird für das Handhaben von Pulvern empfohlen, zu prüfen, ob Anlagen und Komponenten zu verwenden sind, die unter Schutzgas stehen bzw. geerdet sind.

Viele Anwender des Laser-Strahlschmelzens und Laser-Sinterns haben vorher keine pulverförmigen Werkstoffe verarbeitet. Daher fehlt ihnen der Überblick über die relevanten Verordnungen, Vorschriften und Vorgehensweisen. Es wird eine praxistaugliche Hilfestellung benötigt, was bei der Verarbeitung von Pulvern in additiven Fertigungsanlagen zu beachten ist. 2016 wird ein neuer Fachausschuss des VDI die Arbeit daran beginnen.

6.3 Fortbildung und Schulung

Die additiven Fertigungsverfahren haben ihren Ursprung im Prototypenbau. Das heißt, dass damit Muster hergestellt werden, die vom Design her für andere Herstellungsverfahren, z. B. dem Spritzguss, optimiert wurden. Mittlerweile können mit additiven Fertigungsverfahren so gute mechanische Eigenschaften realisiert werden, dass die damit hergestellten Bauteile direkt als Endprodukt eingesetzt werden können. Mit additiven Fertigungsverfahren lassen sich Freiformflächen, Hinterschnitte und innen liegende Hohlräume besonders gut realisieren. Daher ist es wichtig, dass Produktentwickler und Konstrukteure die speziellen Eigenschaften der additiven Fertigungsverfahren kennen, um deren Potenzial voll auszuschöpfen. Der VDI-Fach-

ausschuss 105.3 „Additive Manufacturing – Konstruktionsempfehlungen“ hat das erkannt und fasst in der Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 die Erkenntnisse zu diesem Thema zusammen. Damit ist ein erster, wichtiger Schritt getan. Der Schulungs- und Fortbildungsbedarf ist jedoch noch groß, damit die additiven Fertigungsverfahren wie selbstverständlich bei Konstruktionen als eine Fertigungsoption berücksichtigt werden, wird es noch einige Zeit dauern.

Im Konstruktionsprozess sollte die Form der Funktion folgen. Häufig sieht die Praxis aufgrund der Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren anders aus. Jahrelang waren die besten Konstrukteure diejenigen, die die Forderungen der Fertigung schon im ersten Entwurf berücksichtigt hatten. Additive Technologien stellen jetzt den Grundsatz wieder vom Kopf auf die Füße.

Entsprechend müssen die Konstrukteure umdenken und umlernen: **Think additively!**

6.4 Applikationsforschung

Die akademische und industrielle Forschung konzentriert sich derzeit auf Technologien und Verfahren.

Als Hauptursache für die zögerliche Haltung der Industrie bei dem Einstieg in die additive Fertigung wird indes unzureichendes Wissen um die Verwendbarkeit und die Grenzen der additiv hergestellten Bauteile angesehen.

Es fehlen Bindeglieder zwischen Technologieherstellern und den Anwendern: Um Bauteile mit völlig neuen Eigenschaften wie Hohlbauteile mit inneren Strukturen (Vogelknochen), Multimaterialbauteile mit Bereichen unterschiedlicher Eigenschaften, Hybridbauteile in Verbindung mit Fasern und Inserts und Multifunktionskomponenten in die praktische Nutzung zu bringen, fehlen Institutionen, die systematische Applikationsforschung betreiben.

Diese Institutionen sollten die Möglichkeiten bisheriger und der verschiedenen additiven Fertigungsverfahren genau kennen, um ohne Apriori-Präferenzen für einzelne Technologien Lösungen und Lösungswege für reale Fragestellungen aufzuzeigen.

6.5 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Die additiven Fertigungsverfahren, die derzeit noch vornehmlich für Einzelstücke, Pilot- oder Kleinserien

eingesetzt werden, liefern insgesamt geringe absolute Stückzahlen und verarbeiten eine geringe Werkstoffmasse. Wenn ein so additiv gefertigtes Bauteil aufgrund seiner besonderen Eigenschaften Vorteile für ein Serienprodukt hat, kann die Nachfrage nach den entsprechenden Fertigungsanlagen und dem Werkstoff für dieses Bauteil sprunghaft steigen und zu Lieferengpässen führen. Anwender der additiven Fertigungsanlagen sowie Hersteller von Anlagen und Werkstoffen sollten das bei den Planungen berücksichtigen und entsprechende Vereinbarungen mit ihren Geschäftspartnern treffen.

6.6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die additiven Fertigungsverfahren werfen als neue Technologie zur Herstellung marktfähiger Produkte in vielerlei Hinsicht neue Rechtsfragen auf. Es ist zu untersuchen, ob Rechtswissenschaft und Rechtsprechung bereits in der Lage sind, sich abzeichnende Konfliktsituationen interessengerecht aufzulösen. Dies kann auch hier nicht abschließend beantwortet werden, die Entwicklung ist noch im Fluss und hat zum Teil sogar erst begonnen. Hier soll aber mitgeteilt werden, in welchen Bereichen Konfliktsituationen auffindbar sind und in welchem Umfang sie eventuell aus den vorhandenen Rechtssystemen zu lösen sind.

6.6.1 Was ist aus rechtlicher Sicht besonders an additiven Fertigungsverfahren?

Die nachfolgend aufgeführten technischen Möglichkeiten mit den sich daraus ergebenden Geschäftsmodellen können neue rechtliche Bewertungen erforderlich machen:

Individualisierte Produkte/Stückzahl „Eins“

Mit den additiven Fertigungsverfahren können, sofern die entsprechenden Konstruktionsdaten vorliegen, ohne technischen Mehraufwand Einzelstücke oder individuell modifizierte Produkte gefertigt werden. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Bauteilen muss geklärt werden, wie der Dokumentationspflicht nachgekommen werden kann. Da gängige Methoden zur Qualitätssicherung bei Einzelstücken nicht anwendbar sind, ist ungeklärt, wie die Sorgfalt bei der Herstellung nachzuweisen ist.

Werkzeuglose Fertigung

Die additive Fertigungskette ist bis zur eigentlichen Bauteilherstellung digital. Mit der Fertigstellung der Konstruktion liegen CAD-Daten als computerlesbare Datei vor. Damit sind alle notwendigen Voraussetzungen zur Herstellung des Bauteils in einer additiven Fertigungsanlage geschaffen. Typische Produktionsvoraussetzungen, die Teil des Know-hows eines klassischen Herstellers sind, treten je nach Anwendungsfall und verwendetem additivem Fertigungsverfahren in den Hintergrund:

- spezielle Werkzeuge oder Fertigungsmaschinen
- produktindividuelle Programmierung der Fertigungsmaschinen
- Zulieferteile mit speziellen Eigenschaften
- handwerkliches Geschick der Mitarbeiter

Die Wertschöpfung verlagert sich hin zu geistig-kreativer Arbeit. Das gilt umso mehr, wenn Konstruktionen aus einem Systemverständnis heraus entwickelt werden und ein Bauteil nicht nur anders hergestellt, sondern zugleich auch funktional optimiert wird. Da die Arbeitsergebnisse, also die CAD-Daten in digitaler, computerlesbarer Form vorliegen, kommt ihrem Schutz (technisch und rechtlich) besondere Bedeutung zu.

Ausgeprägte Arbeitsteilung

Arbeitsteilige Fertigungsprozesse unter Beteiligung verschiedener Firmen gab es auch schon vor den additiven Fertigungsverfahren. Mit diesen Verfahren kann die Arbeitsteilung, wie im Abschnitt Geschäftsmodelle (Bild 31) dargestellt, sehr ausgeprägt sein und es gibt viele Teilschritte, die Kreativität, Erfahrung oder detaillierte Anlagen- und Prozesskenntnisse erfordern. Sie nutzen Werkzeuge (Software oder Maschinen), die zum Betriebskapital der ausführenden Firma gehören und daher erheblich zur Wertschöpfung beitragen. Der Anteil der Teilschritte an der gesamten Wertschöpfung kann von Produkt zu Produkt unterschiedlich sein und erheblich variieren. Es ist bei arbeitsteiliger Fertigung zu klären, wem das Produkt gehört, und welche Nutzungsrechte er an fremden Vorleistungen und der eigenen Arbeit hat. Auch ist die Frage zu beantworten, wer als Hersteller für das Produkt verantwortlich ist.

Endkunden werden Auftraggeber

Die Situation wird zusätzlich hinsichtlich Produkthaftung und Patentrecht komplizierter, da Endverbrau-

cher an mehreren Stellen im arbeitsteiligen Prozess involviert sein können, und dem Betreiber einer additiven Fertigungsanlage nicht bekannt sein muss, wofür ein Bauteil eigentlich verwendet werden soll.

6.6.2 Was sind CAD-Daten rechtlich gesehen?

In den CAD-Daten ist alles enthalten, was zur Herstellung eines Bauteils erforderlich ist. Daher kommt ihrem rechtlichen Schutz eine besondere Bedeutung zu. Offen ist, welche rechtliche Stellung CAD-Daten haben und welche sie haben sollten. Womöglich sind die CAD-Daten von

- Kunstwerken (Bild 23),
- lebenden Personen (Bild 20),
- Architekturentwürfen (Bild 21),
- Prothesen als Teil der Patientendaten (Bild 17, und
- technischen Geräten (Bild 15)

juristisch auch gar nicht gleich zu behandeln.

Im Statusreport „Additive Fertigungsverfahren“ von 2014 [25] werden CAD-Daten juristisch als Computersoftware, die eine Maschine ansteuert, aufgefasst.

Aus technischer Sicht sind 3-D-CAD-Daten eine dreidimensionale Zeichnung, und es werden eher Analogien zur klassischen 2-D-Drucktechnik gesehen:

- Fotos, Texte und Grafiken steuern Bürodrucker und Druckmaschinen an, so wie CAD-Daten, 3-D-Scans oder FEM-Simulationsergebnisse additive Fertigungsanlagen ansteuern.
- Der mögliche Einwand, dass Fotos, Texte und Grafiken nicht unmittelbar (ohne weitere Software) und nicht zwangsläufig Drucker ansteuern, ist unerheblich, da das genauso für 3-D-druckbare Daten gilt.
- 2-D- und 3-D-Daten sind ineinander umwandelbar.

Der wesentliche Unterschied zwischen klassischen Druckdaten und einem 3-D-CAD-Modell ist technisch gesehen die Komplexität. Aufgrund der Komplexität ist die Suche nach und der Nachweis von identischen (illegal kopierten) Konstruktionen schwieriger.

Im Gegensatz zu Texten oder Fotos, die mit Suchmaschinen im Internet problemlos wiedergefunden werden können, gibt es bei einem 3-D-konstruierten Bauteil neben der dritten Dimension kein selbstverständliches „oben“ oder „unten“ und keine „normale“

Ausrichtung. Es gibt auch keine „naheliegende“ Reihenfolge, mit der die einzelnen Bestandteile konstruiert werden. Bild 36 veranschaulicht das. In der oberen und unteren Zeile wird jeweils ein ganz einfaches (2-dimensionales) technisch vollkommen gleichwertiges „+“ konstruiert. Stark vereinfacht sind in den CAD-Daten jeweils folgende Bauteilbeschreibungen abgelegt:

- Ein langer waagerechter Balken, in dessen Mitte ein kurzer Balken senkrecht nach unten und ein weiterer senkrecht nach oben geht.
- Ein großes Rechteck, an dessen Kanten oben links, unten links, oben rechts und unten rechts jeweils ein kleines Rechteck entfernt wird.

Diesen – auch in Hinblick auf die additive Fertigbarkeit – technisch vollkommen gleichwertigen Konstruktionen sieht man durch eine Analyse der CAD-Daten nicht an, dass sie ein identisches Bauteil beschreiben. Erst die Visualisierung und die Betrachtung durch den Menschen machen offensichtlich, dass es zwei unterschiedliche Konstruktionen des gleichen Bauteils sind.



Bild 36. Verschiedene Konstruktionswege (oben und unten) führen zum gleichen Ziel.

Insofern ist es technisch gesehen wenig sinnvoll, eine CAD-Datei als solche unter einen besonderen rechtlichen Schutz zu stellen, da die Konstruktionsbausteine ohne Aufwand (bei Bedarf automatisiert mit Software) verändert werden können, und die schützenswerte Konstruktion dabei unverändert erhalten bleibt.

6.6.3 Offene Fragen

Aus den vorhergehenden Betrachtungen ergeben sich aus technischer Sicht [26] einige Fragen. Wir haben Frau Müller und Herrn Prof. Ensthaler von der TU Berlin sowie Herrn Müller-ter Jung von der Kanzlei DWF Germany eingeladen, diese Fragen aus ihrer jeweiligen Perspektive zu beleuchten: einmal aus wissenschaftlicher Sicht und einmal aus der Praxis einer Kanzlei.

Ist es juristisch gesehen sinnvoll, CAD-Daten genauso wie Software zu behandeln?

TU Berlin: Im Zusammenhang mit der additiven Fertigung ist die Betrachtung der CAD-Daten als Software im Hinblick auf mögliche Schutzrechte sehr vorteilhaft. Das soll erklärt werden, wobei auch auf die mit dem Schutz der Programme verbundenen Probleme im Patentrecht wie auch im Urheberrecht eingegangen wird. Der patentrechtliche Schutz der Algorithmen bereitet bis in die heutige Zeit Schwierigkeiten. Sicher ist aber, dass es im gegenständlichen Bereich keine Probleme mit dem patentrechtlichen Erfordernis der technischen Neuheit gibt. Zumindest ist die Software, die die additive Fertigungsanlage steuert bzw. treibt, auf eine nach außen gerichtete technische Einheit bezogen und von daher ein technisches Erzeugnis. Soweit das Erfindersiche aber nicht im informationstechnischen Teil, sondern im anwendungsbezogenen Teil des Programms liegt, wird zu differenzieren sein. Der patentrechtliche Schutz kommt dann in Betracht, wenn dieser Teil wiederum technisch, also auf ein technisches Produkt gerichtet ist. Zu klären ist dann auch, inwieweit die Konstruktionsdaten (CAD-Dateien) als Teile eines aus der Treibersoftware und den CAD-Daten bestehenden Programms einzuordnen sind. Für die Einordnung der CAD-Dateien in die Schutzrechte ist es sinnvoll, daran zu erinnern, dass es Software oder Computerprogramme „als solche“ nicht gibt. Computerprogramme erledigen immer bestimmte Aufgaben; so gibt es Programme für die Buchhaltung oder für Zinsberechnungen, es gibt Programme zum Steuern, Messen und Regeln und vieles mehr. Programme beinhalten dabei immer zwei Arten von Algorithmen: Die eine Gruppe befasst sich mit dem anwendungsbezogenen Teil, also z. B. mit den Regeln für ordnungsgemäße Buchhaltung oder eben mit den technischen Daten für die Herstellung eines Produkts, und der andere Bereich mit den informationstechnischen Anforderungen. So betrachtet sind die für die additiven Fertigungsverfahren aufbereiteten CAD-Dateien dann auch Computerprogramme; es sind Programme, die die Konstruktionsdaten enthalten, die derart mit der Treibersoftware verbunden sind, dass die Fertigungsanlage die Konstruktionsdaten ausführen kann. Soweit die in eine Software eingebundenen Konstruktionsdaten nur isoliert, also ohne Berücksichtigung ihrer Verbindung mit der Treibersoftware Schutzgegenstand sein sollten, wäre es um den patentrechtlichen Schutz schlecht bestellt. Die Daten sind noch nicht das patentrechtlich unter Schutz stehende Produkt selbst und ob mit der rechtswidrigen Übernahme der Konstruktionsdaten bereits eine mittelbare Patentverletzung i. S. von § 11

PatG vorliegt, ist zweifelhaft, weil auch insofern von der Rechtsprechung (noch) „Körperlichkeit“ verlangt wird, also die Herstellung von Teilen des geschützten Produkts. Soweit die Konstruktionsdaten wegen ihrer Verbindung mit der Treibersoftware als ein aus verschiedenartigen Algorithmen bestehendes Computerprogramm eingeordnet werden, ist der patentrechtliche Schutz möglich, weil Programme dem patentrechtlichen Erzeugnisschutz unterliegen. Weder in der Rechtsprechung des Bundesgerichtshofs (BGH) noch nach den Entscheidungen der Beschwerdekammern des Europäischen Patentamts (EPA) wird der anwendungsbezogene Teil eines Programms isoliert vom informationstechnischen Teil behandelt.

Urheberrechtlich würde eine zwischen Konstruktionsdaten und Treibersoftware differenzierende Betrachtung zu keinen bedeutsamen Unterschieden führen. Auch urheberrechtlich könnten die CAD-Daten dem im Urheberrecht besonders hervorgehobenen Programmschutz (§ 69 a ff. UrhG) unterfallen. Auch die urheberrechtliche Schutzvoraussetzung, dass nur geistig persönliche „Schöpfungen“, also nur individuelle und nicht durch den jeweiligen Technikbereich vorgegebene oder zugehörige Leistungen, geschützt werden, würde sich auf die beiden Bereiche beziehen; urheberrechtlich wäre nach ständiger Rechtsprechung des BGH das Programm nur wegen der Art und Weise der Einteilung der wertvollen Algorithmen geschützt und nicht diese Algorithmen selbst. Der Einsatz des Programms zu Produktionszwecken wäre jedenfalls verboten.

Ob es sinnvoll ist, die CAD-Daten auch isoliert, also nicht nur als Computerprogramm zu schützen und ob der Schutzbereich noch erweitert werden kann, wird im Zusammenhang mit der Frage nach den schützenswerten Teilen der Konstruktionsdaten beantwortet.

DWF Germany: Die Frage impliziert, dass es sich bei CAD-Dat(ei)en nicht um Software handelt. Das lässt sich nicht pauschal beantworten, weil unter „Software“ auch digitale Texte, Grafiken, Soundfiles oder sonstige Daten und Datenbanken fallen können, bei denen es sich nicht um Computerprogramme im technischen Sinne handelt. So gesehen wären CAD-Dateien aber Software. Von daher bietet sich eher ein Vergleich mit einem „Computerprogramm“ an. Der Vorschlag wäre daher, bereits in der Frage von Computerprogrammen zu sprechen, so dass dann die Antwort wie folgt lauten könnte:

Es dürfte aus juristischer Sicht zutreffend sein, dass es sich bei CAD-Dat(ei)en nicht um ein Computerprogramm i. S. d. §§ 69a ff. UrhG handelt, da Dateien, die nicht selbständig, sondern nur als Inhalte in einem

Anwendungsprogramm ausgeführt werden, keinen Schutz als Computerprogramm genießen. Daten im engeren Sinne und Datenstrukturen enthalten als solche keine Steuerbefehle, wie es aber bei einem Computerprogramm der Fall ist. Auch eine einfache .JPEG-Datei wäre daher kein Computerprogramm, sondern z. B. das dahinter liegende Standard-Programm „Paint“. Gleiches dürfte daher regelmäßig auch für eine CAD-Datei gelten.

Ob es rechtlich erforderlich ist, CAD-Dateien wie Software bzw. Computerprogramme zu behandeln, ist zu diskutieren. Würde eine CAD-Datei als Computerprogramm gelten, gelangen nur die speziellen Vorschriften der §§ 69 a ff. UrhG zur Anwendung, die eigens auf Computerprogramme zugeschnitten sind. Diese sind aber enger als die allgemeinen Vorschriften im Urheberrechtsgesetz. Stuft man eine CAD-Datei allgemein als schutzfähiges Werk ein, kommt ihr ein weiterer Schutzbereich zugute. Es gelten aber auch andere urheberrechtliche Schrankenregelungen, so zum Beispiel die sogenannte „Privatkopierschranke“.

In diesem Zusammenhang ist der Vollständigkeit halber darauf hinzuweisen, dass CAD-Dateien urheberrechtlich durchaus als Werke gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 4 oder Nr. 7 UrhG, nämlich als Entwürfe zu Bauwerken bzw. zu Werken der angewandten Kunst sowie als Darstellungen technischer oder wissenschaftlicher Art, geschützt sein können. Andererseits ist zu beachten, dass CAD-Dateien, die letztlich nur einfache, rein technische Lösungen einer Aufgabe bzw. die bloße Aneinanderreihung von Konstruktionselementen abbilden, wohl (mangels Erreichung der sogenannten „Schöpfungshöhe“) nicht unter den Werkschutz des Urheberrechts fallen.

Die Anwendbarkeit weiterer Schutzgesetze des geistigen Eigentums, insbesondere des Patent- und Designrechts, gilt es ebenfalls einer juristischen Diskussion zu unterziehen. Dabei sollten sämtliche Prozesse und Handlungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit der Erstellung und Verwertung von CAD-Dateien sowohl von der technischen als auch von der rechtlichen Seite gemeinsam einer Bewertung unterzogen werden.

Was ist der schützenswerte und was der schützensfähige Teil einer Konstruktion? Reichen die vorhandenen Schutzmöglichkeiten aus?

TU Berlin: Schützenswert sind die neuen und erfinderischen Ideen bzw. Schöpfungen. Geht es um

den Schutz technischer Elemente (Erfindungen), ist die Frage des Patent- und Gebrauchsmusterschutzes angesprochen. Bei dem patentrechtlichen oder auch gebrauchsmusterrechtlichen Schutz ist zu unterscheiden. Soweit die Konstruktionsdaten als Teil eines Computerprogramms zum Schutz angemeldet werden, bezieht sich der Schutz auf das Programm, nicht ohne weiteres auch auf den Nachbau des Produkts in anderer Weise. Soll jeder Nachbau verboten sein, so ist bei der Anmeldung bzw. bei der Formulierung der Beschreibung und der Schutzansprüche klar herauszustellen, dass nicht nur das Programm Schutzgegenstand sein soll.

Die CAD-Dateien sind auch urheberrechtlich geschützt. Soweit sie programmtechnisch aufbereitet sind, kommt der Programmenschutz nach den §§ 69a ff. UrhG in Betracht. Im Unterschied zum patentrechtlichen Schutz werden aber durch das Urheberrechtsgesetz die erfinderischen Elemente nicht inhaltlich geschützt, sondern nur im Zusammenhang mit ihrer Einbettung im gesamten Programm; isoliert betrachtet gibt es insofern und in Abgrenzung zum Patentrecht keinen urheberrechtlichen Schutz. Mit dem vom Berechtigten nicht erlaubten Einsatz des gesamten Programms, das auch die CAD-Daten enthält, würde der Dritte eine Urheberrechtsverletzung begehen.

In Betracht kommt weiterhin der Schutz der Aufzeichnungen der Konstruktionsdaten als wissenschaftliche oder technische Darstellung gem. § 2 Abs. 1 Nr. 7 UrhG. Hierbei bezieht sich der Schutz nur auf die Form des Werks, nicht dagegen auf den Inhalt. Damit ist kein Schutz vor Nachbau verbunden. Die Ausführung, konkret der Druck des Inhalts, ist damit nicht urheberrechtsverletzend. Anders verhält es sich bei dem Urheberrechtsschutz nach § 2 Abs. 1 Nr. 4 UrhG; dann muss es sich aber bei dem Produkt um eine Sache der angewandten Kunst handeln. Parallel dazu kommt auch ein Schutz über das DesignG in Betracht, sofern das Muster gem. § 2 Abs. 1 DesignG neu ist und eine Eigenart besitzt. Der Schutz nach dem DesignG setzt allerdings die Eintragung ins Register beim DPMA voraus.

DWF Germany: Schützenswert ist meist die „Gesamtheit“ einer Konstruktion. Als schützenswert kann durchaus auch die Idee anzusehen sein, die der späteren dinglichen Manifestation zugrunde liegt.

Schutzfähig ist rechtlich in der Regel nur die Konstruktion selbst. Einen (urheber-) rechtlichen Ideenschutz gibt es hingegen nicht, solange die Idee nicht Niederschlag in einer konkreten Werkform bzw. einer Erfindung o. Ä. gefunden hat. Im Einzelfall können, beispielsweise nach dem Urheberrecht, auch einzelne

Teile einer Konstruktion für sich geschützt sein, wenn sie selbst isoliert betrachtet die Schutzvoraussetzungen erfüllen. Eine bestimmte technische Erfindung oder eine nach bestimmten Designkriterien erzeugte Erscheinungsform können in ihrer konkreten Ausformung gesetzlich geschützt sein. Die „Lücke“ zwischen schützenswertem Gesamtkonzept und schutzfähiger Ausprägung kann gleichwohl das Vertrags- oder Wettbewerbsrecht füllen – beispielsweise über Vertraulichkeitsvereinbarungen. Dabei gilt es zu beachten, dass eine grundsätzlich wünschenswerte wettbewerbsrechtliche Nachahmungsfreiheit herrscht. Grundsätzlich dürften die vorhandenen rechtlichen Schutzmöglichkeiten ausreichend sein, wobei in dieser Hinsicht ein intensiver Austausch mit der technischen Seite zu empfehlen ist, um einen möglichen juristischen Handlungsbedarf bzw. Lücken im bestehenden Rechtssystem in der Tiefe zu ergründen.

Was ist die Grenze zwischen einer ähnlichen Konstruktion und einem Plagiat? Reichen die praktischen rechtlichen Möglichkeiten, weltweit gegen Plagiatoren vorzugehen, aus?

DWF Germany: Wenn ein Werkschaffender bei der Umarbeitung einer Konstruktion nicht das Originalwerk zur Geltung bringt, sondern das Ergebnis seiner Arbeit als eigene Konstruktion ausgeben will, handelt es sich um ein Plagiat. Ob eine lediglich ähnliche Konstruktion vorliegt, die nicht den Schutzbereich der ursprünglichen Konstruktion berührt, bestimmt sich im Einzelfall an der Höhe der Individualität der neuen Konstruktion. Je weniger Bezug zur originalen Konstruktion besteht, je individueller die neue ähnliche Konstruktion ist, desto weniger Konfliktpotenzial besteht mit dem Original. Im Urheberrecht ist die im Einzelfall vorzunehmende Abgrenzung zwischen einer Vervielfältigung des Ursprungswerks oder einer Bearbeitung des Ursprungswerks (für beides bedarf es der Rechtseinräumung durch den Urheber bzw. Rechteinhaber) oder der sogenannten freien Benutzung diffizil. Mögliche Anwendungsszenarien im Umfeld der additiven Fertigung sind näher herauszuarbeiten.

Auf internationaler Ebene existieren Übereinkommen, die den Schutz geistigen Eigentums oder gewerblicher Schutzrechte in grenzüberschreitendem Kontext betreffen. Diese Übereinkommen verpflichten in der Regel die daran teilnehmenden Staaten sicherzustellen, dass wirksame Schutzmechanismen in ihrem Territorium geschaffen werden. Allerdings statuieren internationale Abkommen nur selten vollziehbare

Verpflichtungen. Insgesamt führt eine digitalisierte Welt, in der problemlos z. B. CAD-Dateien global in Sekundenschnelle weiterverbreitet werden können, zunehmend und eingedenk des unterschiedlichen Schutzniveaus der jeweiligen Staaten an die Grenzen der Justiziabilität und wirft dringenden Handlungsbedarf in rechtlicher und technischer Hinsicht auf.

Wer darf in einer arbeitsteiligen Welt mit Daten, die bei E-Mail-Providern und Cloud-Diensten abgespeichert sind, wann was tun?

DWF Germany: Hier besteht potenziell eine Gemengelage zwischen mehreren Rechtsgebieten: dem Telekommunikationsrecht (wenn Daten über telekommunikationsgestützte Dienste ausgetauscht werden), dem Urheberrecht und/oder Wettbewerbsrecht (sofern den Daten urheberrechtlicher Schutz zukommt) und nicht zuletzt dem Datenschutzrecht (wenn personenbezogene Daten betroffen sind).

Die Rechte an den Daten können sich im Einzelnen nach den in den vorgenannten Rechtsgebieten bestehenden Vorschriften richten, sie können sich aber auch aus rein vertraglichen Abreden ergeben – wenn beispielsweise ein ausführlicher Nutzungsvertrag für eine Cloud-Computing Lösung vereinbart wurde. Damit spielt auch das Vertragsrecht eine wichtige Rolle, da sich viele Fragen zum Themenkomplex „Rechte an Daten, Datenspeicherung, Weitergabe/Nutzung/Herausgabe/Löschung von Daten“ im Rahmen der Vertragsgestaltung abbilden lassen. Die „arbeitsteilige Welt“ gibt daher den Rahmen vor, der für die einzelnen Schritte der Arbeitsteilung eine gesonderte Betrachtung erfordert, wer was an welcher spezifischen Stelle der Datenverarbeitung mit welchen Daten tun darf.

Wer ist bei arbeitsteiliger Fertigung hinsichtlich Gewährleistung/Garantie/Produkthaftung Hersteller?

Mit Blick auf die mögliche Vielzahl der an der Produktion Beteiligten einschließlich der Mitarbeit der Endkunden in der Fertigungskette enthält diese Frage einige Sonderfälle.

TU Berlin: Aufgrund der Vielzahl der Akteure, die bei der additiven Fertigung beteiligt sind, stellt sich im Besonderen die Frage, wer als Hersteller im Wege der Produkthaftung in Anspruch genommen werden kann. Dies kann nicht losgelöst von der Frage beantwortet

werden, was letztlich als Produkt i. S. d. § 2 ProdHaftG zu qualifizieren ist. Denn bereits dem Wortlaut des § 4 ProdHaftG nach ist die Eigenschaft als Hersteller aufs Engste mit dem Produkt verbunden, sodass Produkt und Hersteller letztlich eine natürliche Einheit bilden. Um Verantwortlichkeiten im Sinne der Produkthaftung abzugrenzen, ist es notwendig, festzulegen, was letztlich als Produkt in Betracht kommt, wobei wiederum die Frage angesprochen ist, ob bereits die CAD-Datei als virtuelles/digitales Erzeugnis ein Produkt i. S. d. § 2 ProdHaftG sein kann oder ob letztlich erst das additiv gefertigte Produkt, das unzweifelhaft eine bewegliche Sache darstellt, das Produkt im produkthaftungsrechtlichen Sinne ist.

Ist die Frage nach dem Produkt geklärt, kann man die Frage nach dem Hersteller beantworten. Hersteller ist allerdings nur derjenige, der eine, bezogen auf das Produkt, „eigenverantwortliche Tätigkeit“ wahrnimmt. Abzugrenzen ist hiervon die Qualifizierung als Lieferant. Dieser soll nur notfalls als Haftungsadressat in Anspruch genommen werden, nämlich dann, wenn der Hersteller nicht erkennbar ist (vgl. § 4 Abs. 3 ProdHaftG). Die Konstruktion der Lieferantenhaftung ist eine Art „Auffanghaftung“ und hat letztlich das Ziel, den Verbraucher nicht schutzlos zu lassen. Ein Lieferant leistet im Gegensatz zum Hersteller keine auf das Produkt bezogene eigenverantwortliche Tätigkeit. Konkret wäre damit die Frage aufgeworfen, welcher Akteur innerhalb der additiven Fertigungskette überhaupt einen eigenverantwortlichen Beitrag leistet. Das Vorliegen eines eigenverantwortlichen Beitrags wäre beispielsweise bei demjenigen, der die Fertigungsanlage letztlich nur bedient, zumindest zweifelhaft. Denn die wesentlichen Elemente der Konstruktion und Fertigung sind letztlich in der CAD-Datei implementiert, sodass eher in der Erstellung der CAD-Datei eine eigenverantwortliche Tätigkeit zu sehen sein wird denn in der Bedienung der Fertigungsanlage. Denn letztlich kann der eigentliche Fertigungsvorgang wie eine „Montage“ betrachtet werden, bei der die Annahme der Herstellereigenschaft letztlich eine Frage des Einzelfalls und der Verkehrsanschauung ist. Zu verneinen ist eine Herstellereigenschaft jedoch dann, wenn sich die Tätigkeit nur auf den Zusammenbau des Produkts beschränkt, wobei auch dies nicht unumstritten ist [27]. Jedoch wird es gerade bei komplizierten Produktionsketten schwierig sein, insbesondere den Ersteller der CAD-Datei ausfindig zu machen, da dieser nicht zwingend dem späteren Nutzer des Produkts bekannt sein muss. Die CAD-Datei kann virtuell über das Internet übermittelt werden, sodass es einem physischen Kontakt zwischen Betreiber der Fertigungsanlage, Ersteller der CAD-Datei und Produktnutzer gar nicht bedarf. Führt man diese Überlegung weiter,

stellt sich die produkthaftungsrechtliche Konstellation im Rahmen der additiven Fertigung so dar, dass der Produktnutzer über den Weg der Lieferantenhaftung gem. § 4 Abs. 3 ProdHaftG die Preisgabe der Identität des wahren Herstellers fordern könnte und sich nur dann der Betreiber der Fertigungsanlage aus einer eigenen haftungsrechtlichen Inanspruchnahme befreien könnte. Bis dahin wäre dieser jedoch zuallererst in der Verantwortung. Zu vermuten ist daher, dass die Lieferantenhaftung im Kontext der additiven Fertigung eine neue Bedeutung erlangt.

Wir erlauben uns, das Themenfeld noch etwas weiter zu fassen:

Welche haftungsrechtlichen Fragen sind bei der additiven Fertigung noch aufgeworfen?

Ungeachtet der Frage nach der Hersteller- und Produktqualität sind überdies Kausalitätsfragen zu klären. Notwendig sowohl für die Produkthaftung im engeren Sinne nach dem Produkthaftungsgesetz als auch für die deliktische Produzentenhaftung nach § 823 Abs. 1 BGB ist der Nachweis der Kausalität. Insbesondere bei Verfahren, in denen sich der konkret Haftungsverantwortliche nicht genau identifizieren lässt, die Kausalität zwischen einem Produkt und der konkreten Schädigung aber hinreichend wahrscheinlich ist, ist die Feststellung der haftungsbegründenden Kausalität teilweise unmöglich. In anderen Rechtsordnungen wurde insbesondere für Massenschäden, die sich z. B. im Umweltrecht ergeben können, das Institut der Marktanteilshaftung entwickelt (market share liability), wonach die Produzenten pro rata, das heißt nach ihrem Marktanteil oder auch gesamtschuldnerisch in Anspruch genommen werden können. Damit werden die verschiedenen beteiligten Akteure letztlich als eine Risikogemeinschaft betrachtet und können zwar am Markterfolg partizipieren, aber im Haftungsfall auch entsprechend ihres Markterfolgs in Anspruch genommen werden. Für das deutsche Haftungsrecht dürfte sich unseres Erachtens diese Frage nur im Rahmen der deliktischen Produzentenhaftung stellen, sofern die Kausalitätsschwierigkeiten bei der additiven Fertigung einen Fall von § 830 Abs. 1 S. 2 BGB darstellten. Nach der Rechtsprechung des BGH erfasst § 830 Abs. 1 S. 2 BGB nur zwei Konstellationen:

- Zum einen, wenn nicht aufklärbar ist, von welchem der beteiligten Akteure der Schaden herbeigeführt wurde, jedoch (und das ist wichtig) alle Beteiligten sich in „einer Haftung allgemein begründenden

Weise verhalten haben und für keinen von ihnen auszuschließen ist, dass der gesamte Schaden von ihm allein verursacht ist“.

- Zum anderen, wenn sogenannten Anteilszweifel bestehen, also „wenn feststeht, dass jeder von mehreren Beteiligten am Verletzungserfolg mitbeteiligt war, die von jedem zu vertretende Gefährdung auch geeignet war, den gesamten Schaden herbeizuführen, aber zweifelhaft bleibt, ob jeder nach allgemeinen Grundsätzen für den gesamten Erfolg oder nur für einen Teilschaden einzustehen hat“.

Ob sich eine Etablierung einer Risikogemeinschaft auch im deutschen Haftungsrecht durchsetzt, bleibt abzuwarten. Vorerst bleibt den einzelnen Beteiligten lediglich die Möglichkeit einer vertraglichen Haftungsabrede im Innenverhältnis, beispielsweise im Rahmen von Qualitätssicherungsvereinbarungen. Die im Außenverhältnis bestehende Letztverantwortlichkeit des Endherstellers lässt sich nach der gegenwärtigen Rechtslage auch nicht vertraglich ausschließen bzw. abändern.

Schließlich ist auch die Frage zu klären, wie ein etwaiger Eigenanteil des Verbrauchers bei der Konstruktion haftungsrechtlich zu bewerten ist. Auf den ersten Blick könnte daran gedacht werden, diesen im Wege des Mitverschuldens zu berücksichtigen. Ein Mitverschulden setzt voraus, dass der Geschädigte die Sorgfalt außer Acht gelassen hat, die ein verständiger Mensch im eigenen Interesse aufwendet, um sich vor Schaden zu bewahren. Hierbei wird eine „ex-ante“-Betrachtung angelegt. Die Frage wird sein, welche Sorgfaltsanforderungen im Rahmen der additiven Fertigung als vernünftig und allgemein üblich gelten dürfen. Bislang gibt es hierzu, mangels gerichtlicher Entscheidungen, keine konkreten Anhaltspunkte. Auch hier dürfte es derzeit nur die Möglichkeit der vertraglichen Abrede geben.

Die Qualitätssicherungsvereinbarungen werden hinsichtlich der Verteilung der Haftungsrisiken zwischen Hersteller und Zulieferer eine neue Bedeutung erhalten. Bislang verlangt die Rechtsprechung für die Inanspruchnahme der Zulieferer den Kausalitätsnachweis; der dem Zulieferer zur Last gelegte Produktfehler muss kausal für den Schadenseintritt sein. In den Qualitätssicherungsvereinbarungen häufig vorzufindende Vermutungsregelungen hat die Rechtsprechung nicht gebilligt. Wie oben bereits dargestellt, wird der bisher verlangte Kausalitätsnachweis im Rahmen der neuen Technologien vielfach nicht zu erbringen sein, sodass die Rechtsprechung in Zukunft die Vereinbarung von Risikogemeinschaften zwischen Herstellern und Zulieferern möglicherweise billigen wird.

DWF Germany: Hersteller ist nach dem Produkthaftungsgesetz derjenige, der das Endprodukt, einen Grundstoff oder ein Teilprodukt hergestellt hat. Als Hersteller gilt zudem jeder, der sich durch das Anbringen seines Namens, seiner Marke oder eines anderen unterscheidungskräftigen Kennzeichens als Hersteller ausgibt. Der Herstellerbegriff ist im Produkthaftungsrecht daher denkbar weit – möglicherweise bestehen daher bei komplexen Produkten sogar mehrere Hersteller.

Die Gewährleistung für eine schlechte Leistung bestimmt sich grundsätzlich nach dem zugrunde liegenden Vertrag. Regelmäßig haften nur Vertragspartner untereinander. Diese vertragliche Haftung kann sich durch die gesamte Lieferkette ziehen, wenn die Ursache an einer früheren Stelle in der Lieferkette liegt. Die Haftung erfolgt insoweit keineswegs „vertragsübergreifend“, sondern ist jeweils als gestaffelte Rückgriffshaftung nach Maßgabe der einzelnen Verträge strukturiert. Dies kann zu einem verbleibendem Haftungsdelta an bestimmten Stellen der Lieferkette führen. Zudem kann sich die Frage, wer eigentlich Vertragspartner und haftbar ist, als schwierig erweisen, wenn beispielsweise ein Auftragsfertiger als Intermediär eingeschaltet wird und die der additiven Fertigung zugrunde liegende CAD-Datei eines Dritten fehlerhaft ist. Einfacher macht es da eine Garantie: Sie gilt als verschuldensunabhängige Einstandspflicht von dem, der sie erteilt, also dem Garantiegeber.

Im Ergebnis ist insbesondere auch der Aspekt der (Produkt-) Haftung und Gewährleistung und damit der Vertragsgestaltung einer vertieften Bewertung zuzuführen. Die sich im Bereich der additiven Fertigung auftuenden mannigfaltigen Geschäftsmodelle sind in dieser Hinsicht dezidiert zu analysieren, da sich im Einzelfall komplexe Haftungsstrukturen ergeben können. Hinzu kommt, dass die additive Fertigung neue Möglichkeiten im Bereich des „Customizings“ von Produkten, das heißt der individuellen Produktion von Gütern nach den Kundenwünschen, bietet, womit Rechtsfragen hinsichtlich der vertragstypologischen Einordnung und somit der Rechte und Pflichten der Parteien einhergehen.

Wie können Qualitätskriterien bei der Einzelteilerfertigung festgelegt und überprüft werden?

DWF Germany: Es empfiehlt sich, zu den Qualitätskriterien eine ausdrückliche vertragliche Abrede zu treffen. Diese sollte auch Möglichkeiten benennen, wie die Qualitätskontrolle durchgeführt werden kann,

beispielsweise durch Auskunftspflichten des Fertigen oder Audit-Rechte des Bestellers. Hier können auch Normen und Standards vereinbart werden, an denen sich bestimmte Tätigkeiten in der Fertigung zu orientieren haben. Damit wird gleichzeitig die sogenannte „Soll-Beschaffenheit“ eines Produkts konkretisiert, was sich bei der Frage auswirkt, ob ein Mangel vorliegt – wenn nämlich die Ist-Beschaffenheit von der Soll-Beschaffenheit abweicht. In diesem Zusammenhang sind auch die Normungs- und Standardisierungsprozesse, beispielsweise auf nationaler Ebene bei VDI und DIN, von wesentlicher Bedeutung (siehe Abschnitt 10).

Was ist bei der Arbeit mit CAD-Daten hinsichtlich Exportkontrollen zu beachten? Und konkret: Wie wird bei der arbeitsteiligen Produktion die Beachtung des Waffenrechts sichergestellt?

TU Berlin: Die Digitalisierung der Produktionsprozesse hat auch Auswirkungen auf die von den Unternehmen zu berücksichtigenden gesetzlichen Exportkontrollvorschriften, insbesondere soweit diese im Sinne der Exportkontrollvorschriften militärischen Bezug haben. Güter, die einer Exportkontrolle unterliegen, sind in der nationalen Ausfuhrliste (Anlage 1 zu AWW) und der EG Dual-Use-Liste (Anhang 1 zur EG Dual-Use-Verordnung) aufgelistet. Dabei sind nicht nur körperliche Güter, sondern auch digitale Informationen erfasst. Die nationale Ausfuhrliste erfasst unter Punkt 0021 „Software“, sofern diese für die dort beschriebenen militärischen Zwecke „besonders entwickelt oder hergestellt“ ist. Zu berücksichtigen ist dabei, dass auch Einzelteile oder Bausatzgruppen der Ausfuhrliste unterfallen können (sogenannte Bausatztheorie). Nach der Rechtsprechung des BGH wird die „besondere Konstruktion“ jedoch durch den von dem Hersteller oder Lieferanten zugrunde gelegten Zweck definiert. Danach muss ausschließlich ein militärischer Zweck zugrunde gelegt werden. Auf die faktische Möglichkeit der zivilen Nutzung kommt es dagegen nicht an.

Die Dual-Use-Liste hat dagegen einen weiteren Anwendungsbereich. Denn sie erfasst die Ausfuhr von Gütern, Technologien und Software, die einen sogenannte doppelten Verwendungszweck haben, also sowohl zivil als auch militärisch genutzt werden können (vgl. Art. 2 Verordnung (EG) 428/2009 v. 5.5.2009) [28]. Umstritten ist, wann bereits ein „militärischer Zweck“ anzunehmen ist. In Teilen wird dabei die „bloße Möglichkeit einer solchen militärischen

Verwendung“ als ausreichend bewertet. Andererseits wird eine einschränkende Auslegung befürwortet.

Unter Ausfuhr ist dabei auch die nicht gegenständliche Übertragung erfasst (vgl. Art. 2 Nr. 2 lit. iii Verordnung (EG) 428/2009 v. 5.5.2009). Im Hinblick auf die additiven Fertigungsverfahren stellt sich die Frage, ob durch die Aufnahme von Software und den jedenfalls nicht stets auszuschließenden doppelten Verwendungszweck, der Datenaustausch eines Produkts in Form einer CAD-Datei der Exportkontrolle unterliegen kann. Anzunehmen ist jedenfalls, dass Daten, die mittels einer gelisteten Software erstellt und übertragen werden, einer Exportkontrolle unterliegen. Da von der gelisteten Software jedoch solche Software ausgenommen ist, die „frei erhältlich“ oder „allgemein zugänglich“ ist, scheint dies für die additive Fertigung fernliegend. Denkbar ist jedoch, dass körperliche Güter, die in der Dual-Use-Liste gelistet sind, deren Ausfuhr dann aber digital in Form einer CAD-Datei erfolgt, den Exportkontrollvorschriften unterliegen. Ob insoweit Software und Daten exportkontrollrechtlich gleichzustellen sind, ist anzunehmen, weil anwendungsbezogene Daten, z. B. eine CAD-Datei, innerhalb eines Computerprogramms den Softwarebegriff nicht ausschließen.

Durch die additiven Fertigungsverfahren ist es bei entsprechender Verfügbarkeit beispielsweise im Internet möglich, auch ohne Fachkenntnis Gegenstände zur eigenen Verwendung herzustellen, die u.a. der staatlichen Kontrolle unterliegen. Besonders diskutiert wird hierbei die Herstellung von Waffen, die gem. § 2 Abs. 1, 2 WaffG nur Personen über 18 Jahren sowie nur mit Erlaubnis gestattet ist. Wie die deutsche Bundesregierung in der Antwort auf eine kleine Anfrage mitteilt, wird derzeit mit hoher Priorität die Thematik der additiven Fertigung durch das BKA und die BPOL untersucht [29]. Nach Ansicht der Bundesregierung ist der Ausdruck einer einsatzfähigen Waffe in einer additiven Fertigungsanlage wie einem 3-D-Drucker nach zutreffender Ansicht eine erlaubnispflichtige Handlung nach §§ 21, 26 WaffG [30]. Sofern nur einzelne Teile einer Waffe gefertigt werden, liegt wohl in der Endmontage eine Herstellung i.S.d. §§ 21, 26 WaffG. Der Begriff des „Herstellens“ ist nach Punkt 21.2. WaffVwV (Verwaltungsvorschrift zum WaffG) definiert als „das Anfertigen wesentlicher Teile von Schusswaffen, von Schalldämpfern für Schusswaffen und das Zusammensetzen fertiger Teile zu einer Schusswaffe [...]“. Materiell-rechtlich scheint demnach das WaffG ausreichend auch die besonderen Möglichkeiten innerhalb der additiven Fertigung zu berücksichtigen. Die Möglichkeit, nicht registrierte Waffen in Umlauf zu bringen, wird jedoch durch die Technik der additiven Fertigung erleichtert.

Vorgeschlagen wird insoweit visionär z. B. die Implementierung eines präventiven Vorabkontrollverfahrens, wonach sowohl die Hersteller von additiven Fertigungsanlagen als auch die Softwarehersteller eine erste Kontrolle auf waffenrechtliche Rechtsverletzungen vornehmen sollen, beispielsweise indem eine sogenannte Filtersoftware eingesetzt wird [31]. Andere Vorschläge, wie eine digitale Regulierung etwa durch einen obligatorischen Abgleich mit bestehenden Verzeichnissen vor Druckstart, erscheint nur schwer durchführbar, schon allein deshalb, weil es kein Verzeichnis mit entsprechenden CAD-Vorlagen gibt.

DWF Germany: Bei dem Bereich des Waffenrechts und der Exportkontrolle handelt es sich um eine vielfach übersehene Thematik. Fertigungsaufträge zur additiven Fertigung werden zunehmend im internationalen Umfeld vergeben. Dem Waffenrecht und der Exportkontrolle müssen dabei jedoch nicht nur die Herstellung und Lieferung eines additiv gefertigten Produkts in ein bestimmtes Land unterliegen. Auch der Versand einer entsprechenden CAD-Datei via Internet, die z. B. die Konstruktionsdaten für die Erstellung eines bestimmten Bauteils zu einer Waffe enthält, begegnet waffen- und exportrechtlichen Schwierigkeiten. Besondere Schwierigkeiten entstehen insofern bei Konstruktionsdaten, die nicht zwingend, aber auch zum Zwecke der Waffenherstellung genutzt werden können.

Nach einzelnen nationalen Rechtsordnungen könnte ein additiv fertiger Dienstleister, der eigentlich „nur“ den Fertigungsauftrag zu einer ihm zugesandten CAD-Datei ausführt, möglicherweise ungewollt und unwissend zum genehmigungspflichtigen Waffenhersteller werden – verbunden mit den entsprechenden Rechtsfolgen. Möglichkeiten, dieses Risiko zu reduzieren, sind neben internen Überwachungsprozessen auch in rechtlicher Hinsicht vorhanden, beispielsweise durch die Wahl einer entsprechenden Vertragsgestaltung und Definition der Verwendungs- und Einsatzzwecke.

Wo ist die Grenze zwischen Kaufrecht und Werkvertragsrecht zu ziehen?

DWF Germany: Durch den Kaufvertrag wird der Verkäufer einer Sache verpflichtet, dem Käufer die Sache zu übergeben. Der Käufer muss die Sache abnehmen und dem Verkäufer den vereinbarten Kaufpreis zahlen. Beim Werkvertrag hingegen wird der Unternehmer zur Herstellung des versprochenen Werks, der Besteller zur Entrichtung der vereinbarten Vergütung verpflichtet. Die Vergütung an den Leistenden ist also

bei beiden Vertragstypen gleich. Die Leistung an sich unterscheidet sich aber: Beim Kaufvertrag ist dies die Übergabe einer von den Wünschen des Bestellers unabhängig vorgefertigten Sache (nach mittlerer Art und Güte), wobei die Parteien eine bestimmte Beschaffenheit der Kaufsache vereinbaren können, § 434 Abs. 1 S. 1 BGB. Beim Werkvertrag ist die Hauptleistung die Erstellung eines bestimmten Vorgaben genügenden Werks, das der Abnahme durch den Besteller bedarf. Die Unterscheidung ist sehr praxisrelevant, weil sich aus der Einordnung zu einem bestimmten Vertragstyp verschiedene Folgen ergeben, z. B. ein unterschiedlicher Fälligkeitszeitpunkt der Zahlung oder im unternehmerischen Kontext ein unterschiedlicher Zeitraum, in dem Mängel geltend gemacht werden können. Die Abgrenzung zwischen Kauf-, Werklieferungs- und Werkvertrag ist im Bereich der additiven Fertigung bedeutsam, insbesondere im Hinblick auf den angesprochenen Punkt des „Customizing“ von Produkten.

Ab wann greift bei additiv gefertigten Kunstwerken [12] das Urheberrecht? Wie ist mit Design-Objekten mit technischer Funktionalität umzugehen?

TU Berlin: In Bezug auf die urheberrechtliche Schutzfähigkeit additiv gefertigter Objekte gibt es keine Unterschiede zu Werken, die nicht additiv gefertigt wurden. Maßstab ist § 2 UrhG, wonach das Objekt zu einer der in § 2 Abs. 1 UrhG nicht abschließenden Werkgattungen einordbar sein muss und es sich zudem (kumulativ hierzu) um eine persönliche geistige Schöpfung handeln muss. Designobjekte können als Werke der angewandten Kunst gem. § 2 Abs. 1 Nr. 4 UrhG geschützt sein. Nachdem mit der Geburtstagszug-Entscheidung des BGH die Rechtsprechung zu den erhöhten Anforderungen an die Schöpfungshöhe bei Werken der angewandten Kunst ausdrücklich aufgegeben worden ist, sind an diese, gemessen an den anderen Werkarten, keine anderen Anforderungen mehr zu stellen. Diese Rechtssprechungsänderung betrifft vor allem Gegenstände, die technisch bedingte Merkmale enthalten, weil hier der Urheberrechtsschutz bislang versagte. Nunmehr muss das Objekt, wie auch bei den anderen Werkarten, einen gewissen Grad an Individualität aufweisen, wobei dieser weder zu hoch angesetzt werden darf noch zu niedrig, da der Urheberrechtsschutz ansonsten überspannt würde. Letztlich ist dies in Streitfällen eine Frage des Einzelfalls.

DWF Germany: Das Urheberrecht kennt zwar verschiedene Werkarten, wie z. B. Schriftwerke, Werke

der bildenden Künste oder Filmwerke. Ob ein urheberrechtlich geschütztes Werk vorliegt, bestimmt sich aber weniger anhand der Werkart, sondern danach, ob eine „persönliche geistige Schöpfung“ vorliegt. Die Schöpfung muss das Ergebnis eines unmittelbaren und zielgerichteten geistigen Schaffens- bzw. Gestaltungsprozesses sein. Es muss sich um ein Erzeugnis handeln, das durch seinen Inhalt und/oder seine Form etwas Neues und Eigentümliches darstellt. Dies ist für jede Werkart einzeln zu bestimmen. Kunstwerke können urheberrechtlich geschützt sein nach § 2 Abs. 1 Nr. 4 UrhG (Werke der angewandten Kunst – z. B. Gemälde, Figuren, Skulpturen, Schmuck, aber auch Karosserien, Werkzeuge und andere Gegenstände des Industriedesigns können hierunter fallen). Auch additiv gefertigte Kunstwerke können dem Werkschutz nach § 2 Abs. 1 Nr. 4 UrhG unterfallen, und zwar unabhängig davon, ob es sich um Werke handelt, die alltäglich und in großen Massen hergestellt werden – solange eine persönliche geistige Schöpfung vorliegt.

Ein Designobjekt ist unabhängig vom Urheberrecht geschützt, wenn es neu ist und seine Erscheinungsform eine bestimmte Eigenart aufweist. Zudem bedarf es der Anmeldung und amtlichen Eintragung des Designs (national z. B. beim DPMA), wohingegen das Urheberrecht bereits aus dem Schöpfungsakt heraus entsteht und eben kein Registerrecht ist. Ähnlich ist es bei Patenten: Ein Patent wird für Erfindungen auf allen Gebieten der Technik erteilt, sofern sie neu sind, auf einer erfinderischen Tätigkeit beruhen und gewerblich anwendbar sind. Es ist gesondert zu prüfen, ob die „technische Funktionalität“ des Design-Objekts den Schutzvoraussetzungen des Patentrechts genügt. Wenn ein Objekt sowohl Werkqualität, Designelemente und auch eine neue technische Erfindung verknüpft, können gar alle drei Schutzbereiche zusammentreffen und somit umfassenden Schutz bieten. Für einen umfassenden Schutz müssen die verschiedenen Schutzrechte jeweils erworben bzw. angemeldet und eingetragen werden.

6.6.4 Handlungsbedarf

Bei den im vorigen Abschnitt diskutierten Fragen ist in einem ersten Schritt zu klären, wie diese juristisch einzuordnen sind:

- Was stellt neue Fragen an das Recht?
- Was stellt möglicherweise bestehende Rechtsauffassungen infrage?
- Was ist juristisch schon geklärt und erlangt nur neue Relevanz?

- Was ist einfach nur zwischen den Vertragsparteien auszuhandeln?
- Was ist juristisch ausdiskutiert und ist nur neu für die technischen Fachleute?

Der VDI-Fachausschuss FA 105 „Additive Fertigungsverfahren“ wird diese Fragen weiter behandeln und lädt Juristen zur Mitarbeit in einem entsprechenden Ausschuss ein.

Unter Berücksichtigung der bestehenden Gesetze können so Empfehlungen erarbeitet werden, welche technischen, organisatorischen und rechtlichen Fragen (Wem gehören die Daten? Wer übernimmt Produktverantwortung) in Lasten- und Pflichtenheften für

die unterschiedlichen Prozessschritte geklärt werden sollten, um Geschäfte praktikabel und rechtssicher durchzuführen. Empfehlungen für Lasten- und Pflichtenhefte sind schon für verschiedene Branchen als VDI-Richtlinie erschienen (beispielsweise VDI 2519 Blatt 1 und VDI/VDE 3694).

Wenn sich bei diesen Arbeiten zeigen sollte, dass sich manche Fragen weder durch Vereinbarungen der Vertragspartner untereinander noch durch die bestehende Rechtslage angemessen klären lassen, können Empfehlungen erarbeitet werden, wie die juristische Behandlung aus Sicht der interdisziplinären Expertengruppe zweckdienlich wäre. Auch diese Empfehlungen können vom VDI geeignet verbreitet werden.

7 Regenerative Medizin und Tissue Engineering: Bioprinting

Die regenerative Medizin ist in vielen Punkten nicht mit anderen Anwendungsfeldern der additiven Fertigungsverfahren vergleichbar. Daher widmen wir ihr einen eigenen Abschnitt und gehen hier speziell auf die verschiedenen Herausforderungen in diesem Anwendungsfeld ein.

Seit mehr als zehn Jahren wird von diversen Firmen und Forschungsinstitutionen an der Entwicklung einer additiven Fertigung von Knochenersatz gearbeitet. In der Regel wird dabei an Hybrid-Materialien aus Polymeren, Keramiken und weiteren Zusatzstoffen geforscht. Die Fragestellung ist wesentlich komplexer als in der Prothetik, da hier eine direkte Einbettung in lebendes Gewebe angestrebt wird. Die Fertigung von Scaffolds für das Tissue Engineering von Knochenstrukturen mittels additiver Fertigungsverfahren stellt einen wesentlichen Gegenstand gegenwärtiger Forschungen dar. Mit dem so genannten Biodruck oder Bioprinting sollen in der Zukunft mithilfe spezieller „3-D-Drucker“ aus geeignetem Zellmaterial computergesteuert (Gewebe-)Strukturen gefertigt werden. Diese Herangehensweise bildet einen Übergangsbereich zum Tissue Engineering. Mit dem Biodruck soll unter anderem ein wesentliches Manko des Letzteren – die Schwierigkeit der Erzeugung dreidimensionaler Strukturen – überwunden werden. Fernziel ist die Fertigung von funktionstüchtigen Gewebestrukturen bis hin zu Gefäßsystemen oder gar ganzen Organen. Auch als Vorstufe oder Zwischenschritt des Tissue Engineering soll der Biodruck eingesetzt werden. Das größte Problem des Biodrucks besteht in der Notwendigkeit, auf Dauer lebensfähige Gewebestrukturen herzustellen, die in den menschlichen Körper vollständig integriert und versorgt werden müssen.

Natürliche Gewebe wie Knorpel, Knochen oder Fett erfüllen im Organismus hochkomplexe Aufgaben. Ihre Formen und Funktionen haben sich im Verlauf der Evolution immer weiter verfeinert und sind in vielerlei Hinsicht optimiert. Additive Verfahren bieten eine große Flexibilität in der Formgebung und könnten in Zukunft helfen, Gewebe im Labor aufzubauen, die ebenso gut funktionieren wie die natürlichen. Bis dahin ist es jedoch noch ein weiter Weg: Wir benötigen zunächst die richtigen Materialien. Optimalerweise sind dies biologische Materialien aus der natürlichen Gewebematrix, die so aufbereitet werden, dass sie mittels additiver Verfahren verarbeitet werden können. Zusätzlich lassen sich aus diesen biokompa-

tiblen und biodegradierbaren Polymeren temporäre Trägerstrukturen für eine Besiedelung mit Zellen herstellen. Bild 37 zeigt einen Schnitt durch ein dreidimensionales Hydrogel, das mittels automatisierter Dispensiertechnik aufgebaut wurde. Die Blaufärbung zeigt an, dass sich die stoffliche Zusammensetzung des Materials über den Querschnitt ändert – mit ihr ändern sich auch die mechanischen Eigenschaften des Materials. So können komplexe Materialien wie beispielsweise Gelenknorpel nach und nach immer besser nachgebildet werden.

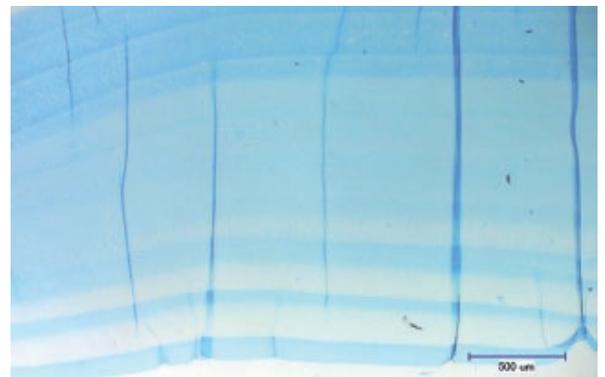


Bild 37. Schnitt durch ein 3-D-Hydrogel (Quelle: Fraunhofer IGB)



Bild 38. Inkjet-Druck von fotovernetzbarer Gelatine-Lösung (gelbliche Lösung in der Kartusche) auf Hydrogel-Substrate (rosa). (Quelle: Fraunhofer IGB)

Bild 38 zeigt einen Nanoplotter [32] im Einsatz: Eine fotovernetzbar gelatine-Lösung wird auf ein Hydrogel-Substrat aufgebracht.

Die Entwicklung von druckbaren Lösungen aus den biologischen Makromolekülen der extrazellulären Matrix, sogenannter Biotinten in denen auch Zellen enthalten sein können, sind eine Voraussetzung für die Bioprinting-Technologie. Die Vernetzung dieser Lösungen zu stabilen, gewebeähnlichen Gelen sowie die Befeuchtung der Konstrukte (um das Austrocknen zu verhindern) sind nur zwei der vielfachen Herausforderungen.

Handlungsfelder

Zunächst einmal sind strukturtreue, mechanisch stabile Werkstoffe notwendig, die additiv gefertigt eine biologische Funktion übernehmen können.

Dann gilt es, komplexe biologische Strukturen, wie Blutgefäße nachzubilden und die Zellen oder gar unterschiedliche Zelltypen in einem Gewebekonstrukt zu positionieren.

Die Fertigung eines funktionalen Gewebes, das die entsprechenden mechanischen und biologischen Eigenschaften erfüllt, ist letztlich das Ziel. Dabei sind

die Langzeitstabilität des Gewebes und dessen Versorgung während der Herstellung und später im Körper sicherzustellen.

Die Pioniere des Bioprintings haben ihren Sitz in den USA (Organovo, TeVido BioDevices, EnvisionTec). Auch die europäischen Nachbarn sind aktiv: Poietis aus Frankreich ist kürzlich mit der BASF eine Kooperation zur Herstellung von Hautersatz mittels Bioprinting eingegangen, und mit den Anlagenentwicklungen der schweizer RegenHu Sa, der niederländischen IME Technologies oder der britischen The Electrospinning Company wird deutlich, dass das Marktpotenzial international hoch eingeschätzt wird. Auch Asien schläft nicht: Aus China kommt die Regenovo Biotechnology Co. Ltd. und Korea fördert Rokit, ein großes Unternehmen aus der Druckbranche, um beim Bioprinting Fuß zu fassen.

Entsprechende Anlagen werden bislang nur von wenigen Herstellern aus Deutschland angeboten (Dispenser: SysEng, Drucker: GeSiM, Elektrospinning: Erich Huber GmbH).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass dem Bioprinting international eine größere Bedeutung zugewiesen wird, als hierzulande. Es ist nicht ausgeschlossen, dass Deutschland an diesem Zukunftsmarkt kaum partizipieren wird.

8 Im Bereich „additive Fertigungsverfahren“ aktive Verbände

Welche Vereinigungen beschäftigen sich mit den additiven Fertigungsverfahren? Vielen, die sich diesbezüglich einen Überblick verschaffen wollen, erscheint die Vielfalt unübersichtlich. Für diesen Abschnitt haben wir verschiedene Organisationen eingeladen, ihre eigenen Aktivitäten vorzustellen. Die folgenden Antworten haben wir erhalten:

8.1 Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.



Die Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM) ist eine technisch-wissenschaftliche Gesellschaft auf dem Gebiet der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Jährlich treffen sich mehr als 2.500 Experten aus Wissenschaft und Industrie in mehr als 70 Fachausschüssen und Arbeitskreisen. Die Fachausschüsse der DGM decken nahezu alle Materialklassen, Prozesstechniken zur Materialherstellung und -verarbeitung, Erkenntnis- und Anwendungsfelder im Bereich der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik ab. Die Fachausschuss- und Arbeitskreissitzungen der DGM sind öffentlich zugänglich.

Fachausschuss Additive Fertigung

Die Arbeitsschwerpunkte des Fachausschusses „Additive Fertigung“ konzentrieren sich auf alle Fragen der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik entlang der Prozesskette: von der prozessgerechten Rohstoffaufbereitung, über die Bewertung des Materialverhaltens im Prozess und die Qualifizierung der Werkstoffe für einen Prozess, die Charakterisierung der durch die Additiven Verfahren veränderten Werkstoffeigenschaften bis hin zur Nachbehandlung des Bauteils.

Im Fachausschuss sind alle Akteure entlang der Prozesskette – vom Rohstoff- und Anlagenhersteller, über Produzenten bis hin zum Anwender – vertreten. Dabei sind sowohl die Industrie als auch die Wissenschaft in einer Breite vertreten, dass die genannten Arbeitsschwerpunkte gut bearbeitet werden können. Besonders relevant werden die Aktivitäten des Fachausschusses für Industriebranchen mit sehr hohen Anforderungen an die Materialeigenschaften der gefertigten Bauteile sein, z. B. Luft- und Raumfahrt-

industrie, Energie- und Medizintechnik. Es wird die komplette Werkstoffpalette von den Kunststoffen, über die Metalle bis hin zu Keramiken und Gläsern abgedeckt. Um die gesamte Prozesskette mit einbeziehen zu können, sind Aspekte der Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, der Chemie, des Anlagenbaus und der Ingenieurwissenschaften zu berücksichtigen.

Für den Werkstofftechniker bieten sich neue Möglichkeiten durch additive Verfahren „das richtige Material an die richtige Stelle zu bringen“ und auf diesem Wege Verbundwerkstoffe und Multi-Material-Bauteile zu konzipieren. Gerade auf dem Gebiet des „Multi-Material-Designs“ besteht ein dringender Forschungsbedarf, um die durch die additiven Fertigungsverfahren möglichen Lösungen wissenschaftlich aufzubereiten. Die Übertragung der gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse in die industrielle Praxis ist ein weiterer Schwerpunkt in der Entwicklung der additiven Fertigungstechnologien.

Aus Sicht des Fachausschusses sind F&E-Anstrengungen zu folgenden Themengebieten notwendig:

- Forschung zu Fragen der Werkstoffprozesskorrelation; Werkstoffverhalten entlang der gesamten Prozesskette, inklusive Nachbehandlung; Bewertung gradiertener Materialeigenschaften und Potenziale des Multi-Material-Designs
- Werkstofftechnik und prozessbegleitende Qualitätssicherung zur Bereitstellung industrieller Fertigungsprozesse, dazu zählt auch das Erkennen von Defekten, die Beurteilung ihrer Effekte sowie deren Minimierung
- additive Fertigung und Materialeffizienz durch lokale Gefüge- bzw. Legierungsmodifikation und funktionsangepassten Werkstoffeinsatz in Bauteilen
- werkstoffgerechte Konstruktion und Methoden zur Auslegung neuer, additiv hergestellter Strukturen (z. B. Gitterstrukturen, Multi-Material-Strukturen)

Die Mitglieder des FA „Additive Fertigung“ sind ehrenamtlich aktive Experten. Über die Aufnahme neuer Mitglieder entscheidet das Gremium.

Ansprechpartner

Prof. Dr. Wolfgang Kollenberg, Leiter FA „Additive Fertigung“, w.kollenberg@wzr.cc

Relevanter Link

www.additive-fertigung.org

8.2 Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS



Die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS ist eine professionell und serviceorientiert ausgerichtete Institution für die Fügetechnik. Sie bietet der Fachwelt über ihre Fachausschüsse werkstoff-, verfahrens- und branchenspezifische Forschungsschwerpunkte rund um das Fügen, Trennen und Beschichten. Die Themenbereiche der Fachausschüsse decken die gesamte Prozesskette der Fügetechnik ab. Im Netzwerk der Forschungsvereinigung engagieren sich erfolgreich mehr als 500 Experten aus Industrie und Wissenschaft. Jährlich werden über 100 laufende Forschungsprojekte unterstützt und begleitet. Über die inhaltliche Themenvielfalt ist die Forschungsvereinigung interdisziplinär ausgerichtet. Sie ist aufgeschlossen für branchenübergreifende Forschungsk Kooperationen.

Fachausschuss 13 „Rapid Technologien (Generative Fertigung)“

Der Fachausschuss 13 „Rapid Technologien (Generative Fertigung)“ befasst sich mit den Forschungsfeldern in der additiven Fertigung, die die gesamte Prozesskette betreffen, inklusive Vor- und Nachbehandlung. Dabei stehen die Technologieentwicklung, die Steigerung der Akzeptanz zur Nutzung dieser Technologie bei KMU und die Schaffung neuer Anwendungsbereiche im Vordergrund.

Bisher wurden neben Kunststoffen und Keramiken vor allem metallische Werkstoffe untersucht. Themen waren die Schichtüberwachung der Oberfläche, der Verzug, die Bauteileigenschaften, die Null-Fehler-Toleranz, Gase, Pulver, Temperaturführung, Reproduzierbarkeit und Fehlerkorrektur.

Aktuelle Projekte beschäftigen sich mit der prozessbezogenen Erweiterung der Werkstoffe, der Strahlführungssysteme, der Schaffung von wirtschaftlichen Prozessketten, der Lebensdauerbewertung/-steigerung von Komponenten sowie der Qualitätssicherung, Leichtbau, Funktionsintegration, Steigerung der Bauteilgröße, dem Design des Bauteils/der Konstruktion, der Prozesssimulation hinsichtlich Verzug und Eigenspannung und der Arbeitsplatzsicherheit.

Im Bereich des Laser-Strahlschmelzens sind Forschungsaktivitäten zur Bauteilgröße, zur Kostenreduzierung, zur Prozesseffizienz, insbesondere bei Nickelbasislegierungen, und zur Rissneigung geplant.

Beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen stehen Untersuchungen zur Prozessfähigkeit, Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit sowie zur Verbesserung der Oberflächenqualitäten auf der Agenda. Auch geht es darum, die Serienprozesse in großen Stückzahlen (> 10.000 Stück) wirtschaftlich zu gestalten.

Beim Pulver muss die Verzahnung beziehungsweise die Abstimmung von Anlagenherstellern und Werkstoffherstellern verbessert werden. Weitere Themen sind der Brand- und Explosionsschutz, Toxizitätsuntersuchungen und die Langzeitatmosphärenbelastung.

Ansprechpartner

Marvin Keinert, M.Sc., Geschäftsführer für den Fachausschuss 13 Rapid Technologien (Generative Fertigung), Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS
marvin.keinert@dvs-hg.de

Relevante Links

www.dvs-forschung.de/fa13
www.dvs-forschung.de

8.3 DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.



Der DVS ist ein technisch-wissenschaftlicher Verband, der sich mit fast 120 Jahren Erfahrung umfassend für die Fügetechnik engagiert. Im DVS dreht sich alles um das Fügen, Trennen und Beschichten von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen und Werkstoffverbunden. Mehr als 19.000 Mitglieder gehören dem DVS an. Das umfangreiche Netzwerk setzt sich zusammen aus Wissenschaft, Industrie, Handwerk, Studenten, Auszubildenden, Menschen, die sich beruflich oder privat für die Fügetechnik interessieren, sowie Firmen und Institutionen aus der Branche. DVS-PersZert ist die Personalzertifizierungsstelle des DVS. Sie ist in alle Belange der Ausbildung, Prüfung und Zertifizierung von Fachkräften involviert und von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) akkreditiert. In den bundesweit rund 340 DVS-Bildungseinrichtungen werden international anerkannte Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten angeboten.

Fachgruppe 4.13 „Ausbildung in der additiven Fertigung“

Die Fachgruppe 4.13 „Ausbildung in der additiven Fertigung“ entwickelt Ausbildungskonzepte in den Fachrichtungen Kunststoff und Metall. Die Fachgruppe ist verantwortlich für die Richtlinien

- DVS 3601 „Fachkraft für additive Fertigungsverfahren – Fachrichtung Kunststoff“ und
- DVS 3602 „Fachkraft für additive Fertigungsverfahren – Fachrichtung Metall“.

Eine ausgebildete Fachkraft nach diesen Richtlinien besitzt ein systematisches Überblickswissen, kennt die Fachbegriffe und kann diese sachgerecht anwenden, kennt die Prozesskette, die Möglichkeiten und Grenzen der Verfahren in Bezug auf Qualität, Kosten, Anwendungsgebiete und kann die Qualitätsmerkmale bewerten. Sie kennt die zur Verfügung stehende Anlagentechnik und kann beispielhaft ein Bauteil fertigen. Aktuell werden die Richtlinien aktualisiert und Anforderungen an die Ausstattung von Bildungseinrichtungen spezifiziert.

Aufbauende branchenspezifische, fachspezifische oder materialspezifische Lehrgänge sind geplant.

Ansprechpartner

Marvin Keinert, M.Sc., Geschäftsführer der Fachgruppe 4.13 „Ausbildung in der additiven Fertigung“, DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
marvin.keinert@dvs-hg.de

Relevante Links

<http://www.dvs-aft.de/AfT/AfB/AGSP/FG4/FG4.13>
www.dvs-perszert.de

8.4 Fachverband Pulvermetallurgie e.V.



Der Fachverband Pulvermetallurgie (FPM) ist ein eingetragener Verein mit Sitz in Hagen. Er ist die wirtschaftspolitische Interessenvertretung der Pulvermetallurgie der Bundesrepublik Deutschland. Eine wichtige Verbandsaufgabe ist die Ausweitung des Markts durch Erschließung neuer Einsatzfelder für PM-Erzeugnisse. Hierzu zählt auch der Bereich der additiven, generativen Fertigung (AM). Der FPM ist die geschäftsführende Trägergesellschaft des Gemeinschaftsausschusses für Pulvermetallurgie, in dem verschiedene Expertenkreise vertreten sind.

Ausschuss für Pulvermetallurgie

Der Ausschuss für Pulvermetallurgie (gegr. 1948) ist ein Gemeinschaftsausschuss der VDI-Gesellschaft Materials Engineering, der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM), der Deutschen Keramischen Gesellschaft (DKG), des Stahlinstitut VDEh und des Fachverband Pulvermetallurgie e.V. (FPM). Seine Aufgabe ist die Förderung der technisch-wissenschaftlichen Arbeit auf dem Gebiet der Pulvermetallurgie. Zu aktuellen Themen unterhält der Ausschuss Expertenkreise, die allen an einer Mitwirkung interessierten Personen offenstehen. Aus dem Gemeinschaftsausschuss heraus wurde der Expertenkreis „Additive Manufacturing“ gegründet. Im Expertenkreis AM wurden verschiedene Schwerpunktfelder identifiziert, u. a. Gemeinschaftsforschung, Effizienz der AM-Verfahren, Meinungsaustausch, Best-Practice. Auf weiteren Sitzungen sollen gegebenenfalls Forschungsprojekte zu einzelnen Aspekten des „Additive Manufacturing“ initiiert werden.

Leitung des Expertenkreises AM/Kontaktinfo

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback, Fraunhofer IFAM/TU Dresden

Geschäftsführender Träger: Fachverband Pulvermetallurgie e.V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, info@pulvermetallurgie.com

Relevante Links

www.expertenkreis-am.de
www.ifam-dd.fraunhofer.de
www.pulvermetallurgie.com

8.5 VDMA



Der VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) vertritt über 3.100 vorrangig mittelständische Unternehmen der Investitionsgüterindustrie und ist damit größter Industrieverband in Europa. Der Verband vertritt die gemeinsamen wirtschaftlichen, technischen und wissenschaftlichen Interessen des Maschinenbaus, insbesondere gegenüber nationalen und internationalen Behörden und Wirtschaftskreisen.

Der VDMA gliedert sich in 15 Querschnittsabteilungen, Repräsentanzen in Berlin und Brüssel, Verbindungsbüros in Brasilien, China, Indien, Japan und Russland, 38 Fachverbände und eine Vielzahl von Arbeitsgemeinschaften, internationale Komitees und

Foren, sechs Landesverbände und mehrere Dienstleistungsorganisationen.

Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing

In der Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing (AG AM) treffen sich alle Akteure: vom Grundlagenforscher bis zum Anwender, vom Materiallieferanten bis zum Dienstleister. Ziel ist es, die Technologie unter dem Aspekt der industriellen Fertigung zu fördern.

Der erfolgreiche Einsatz der additiven Fertigungsverfahren in der Industrie setzt Kenntnisse über die Verfahren und deren Potenziale voraus. Bei Anlagenbauern und Instituten ist viel Detailwissen vorhanden – bei potenziellen Nutzern ist der Informationsbedarf groß. Die Arbeitsgemeinschaft bringt beide Seiten zusammen.

Seit Mai 2015 ist ein leistungsfähiges Industrienetzwerk mit ca. 90 Mitgliedern aufgebaut worden (Stand September 2015). Die Homepage der AG AM bietet ein Schaufenster mit einem Überblick über industrielle Entwicklungen und Anwendungen. Es existieren Arbeitskreise zu den Schwerpunktthemen

- Maschinenabnahme/Fertigungsqualität und
- Automatisierung der additiven Fertigung.

Aktuell werden Arbeitsgruppen zu den Arbeitskreisen mit Fokus auf die branchen- und technologiespezifischen

Anforderungen gebildet. Es wird eine Kompetenzmatrix der Mitgliedsunternehmen bezüglich AM erstellt und eine Übersicht der Leistungsfähigkeit der verfügbaren Schichtbauverfahren erarbeitet.

Die AG AM wird die Anforderungen der Industrie als (potenzielle) Anwender der Technologie über alle Maschinenbaubereiche hinweg erfassen. Schwerpunkte der weiteren Verbandsarbeit werden sein:

- die Spezifikationen für
 - reproduzierbare Bauteile und
 - definierte Leistungsmerkmale der Anlagen,
- die Förderung der Weiterentwicklungen, z. B. im Bereich der Materialien, und
- die Öffentlichkeitsarbeit sowie der Aufbau des anwendungsspezifischen Wissenstransfers.

Die Mitgliedschaft in der Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing (AG AM) im VDMA steht allen an der Prozesskette der additiven Fertigung beteiligten Unternehmen offen, auch Nicht-VDMA-Mitgliedern. Der Vorstand wird von Industrieunternehmen aus dem Kreis der Mitglieder gestellt.

Ansprechpartner

Rainer Gebhardt, VDMA, Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing, Lyoner Str.18, 60528 Frankfurt a. M., rainer.gebhardt@vdma.org

Relevanter Link

<http://am.vdma.org/>

9 Aktivitäten des VDI



Bild 39. Gruppenfoto des FA 105 „Additive Manufacturing“ bei einer Sitzung 2015. (Quelle: VDI e.V.)

9.1 VDI-Fachausschuss „Additive Manufacturing“

Die Aktivitäten des VDI werden im Fachausschuss „Additive Manufacturing“ [33] der VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL) [34] gebündelt und koordiniert. Derzeit engagieren sich 130 ehrenamtliche Mitglieder, die teilweise parallel in mehreren Unterausschüssen aktiv sind (Bild 39). Mit Experten der Hersteller additiver Fertigungsanlagen, industriellen Anwendern dieser Technik sowie Vertretern von Dienstleistern, Universitäten und Forschungseinrichtungen werden die additiven Fertigungsverfahren aus allen Blickwinkeln beleuchtet. Der Stand der Technik wird umfassend und unabhängig erfasst. Damit ist der Fachausschuss das zentrale Gremium in Deutschland für die additiven Fertigungsverfahren.

Der Fachausschuss hat sich zur Aufgabe gesetzt, Fortschritte und Erfahrungen zu ausgewählten Themenbereichen des Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing auszutauschen und gewonnene Erkenntnisse durch Tagungen und VDI-Richtlinien einer breiten Fachöffentlichkeit zu vermitteln. Ziel der Ausschussarbeit ist es, das Leistungspotenzial der verschiedenen additiven Verfahren darzustellen und Arbeitsunterlagen sowie Handlungsempfehlungen in Richtlinien bereit zu stellen, um die Kommunikation zwischen Auftraggeber (Nutzer) und Anwender (Dienstleister) zu optimieren und zielgerichtet die Anwendung/Nutzung der Verfahren zu verbessern. Neben Begriffsbestimmungen und einer praxisorientierten Darstellung der Chancen und Grenzen einzelner Prozesse sollen insbesondere Empfehlungen zum Datenfluss, zu Liefervereinbarungen, Prüfkörpern und Abnahmebedingungen erarbeitet werden.

Gesamtausschuss

Der Fachausschuss FA 105 „Additive Manufacturing- Gesamtausschuss“ koordiniert die Arbeiten in den Unterausschüssen und betreut die Richtlinie VDI 3405 „Additive Fertigungsverfahren; Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen“. Diese Richtlinie ist der Nachfolger von VDI 3404:2009-12, der ersten technischen Regel weltweit zum Thema additive Fertigungsverfahren. Das Gremium bildet die Schnittstelle zu anderen Organisationen und zur Fachöffentlichkeit. Mitglieder des Fachausschusses engagieren sich bei der VDI-Konferenz „Additive Manufacturing“, die im September 2015 zum dritten Mal stattfand.

Der Gesamtausschuss hat Ende 2015 beschlossen, Fragestellungen zur Sicherheit beim Betrieb additiver Fertigungsanlagen und zu rechtlichen Aspekten in entsprechenden Fachausschüssen zu behandeln.

Kunststoffe

Der Unterausschuss FA 105.1 „Additive Manufacturing – Kunststoffe“ stellt die Leistungsfähigkeit der additiven Fertigungsverfahren mit Kunststoffen als Werkstoff dar. Er betreut die Richtlinie VDI 3405 Blatt 1 „Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing; Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen; Güteüberwachung“ und ergänzt das technische Regelwerk zum Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen. Aktuell werden die Materialqualifikation und die Bauteilqualität als neue Projekte detailliert ausgearbeitet. Auch die Erarbeitung von technischen Regeln zu den Extrusionsverfahren FDM/FLM steht auf der Agenda (Bild 40).

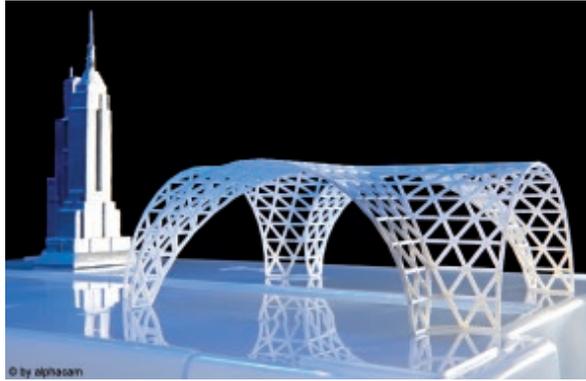


Bild 40. Neben Anwendungen im Modellbau werden Extrusionsverfahren auch immer häufiger in der industriellen Fertigung eingesetzt (Quelle: alphacam)

Metalle

Der Unterausschuss FA 105.2 „Additive Manufacturing – Metalle“ beschäftigt sich mit den additiven Fertigungsverfahren und Metallen als Werkstoff. Die Richtlinie VDI 3405 Blatt 2 beschreibt das Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile und legt den Schwerpunkt auf die Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung (Post-Prozess). In dieser Richtlinie wurden schon wesentliche Materialkenn-daten für den martensitaushärtenden Werkzeugstahl 1.2709 veröffentlicht. Diese Da-ten werden durch die Richtlinie VDI 3405 Blatt 2.1 mit Materialdaten für die Aluminiumlegierung AlSi10Mg vervollständigt. Aktuell wird vom Gremium eine Richtlinie mit Mate-rialkenn-daten der Nickellegierung Werkstoffnummer 2.4668 (Inconel 718) vorbereitet. Die Koordination von Ringversuchen zur Charakterisierung von Titan-legierungen ist in Arbeit. Neben der Ermittlung von Werkstoffeigenschaften hat sich als zweites Schwer-punkthema die Charakterisierung der Pulverwerk-stoffe herausgebildet. Die Arbeiten an einer ersten Richtlinie dazu wurden begonnen.

Konstruktionsempfehlungen

Der Unterausschuss FA 105.3 „Additive Manufacturing – Konstruktionsempfehlungen“ trägt der Tatsache Rechnung, dass mit additiven Fertigungsverfahren Geometrien realisiert werden können, die anders nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand hergestellt werden können. Der Fachausschuss erar-beitet Empfehlungen für die Auslegung von Bauteilen, die mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden sollen. Nach der Fertigstellung der Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 mit Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen als zweisprachige Richtlinie hat das Gremium nun Richtlinien-themen für die weitere Arbeit festgelegt:

- Prüfkörper und Prüfverfahren für Geometrie-merkmale
- Konstruktionsempfehlungen für die Bauteil-fertigung mit Strangablegeverfahren (FDM/FLM).
- Konstruktionsempfehlungen für die Bauteil-fertigung mit Elektronen-Strahlschmelzen (EBM)

Die neuen Themen werden von Projektgruppen parallel bearbeitet.

9.2 Überblick VDI-Richtlinien

Die folgenden Richtlinien der Reihe VDI 3405 „Additive Fertigungsverfahren“ wurden bereits veröffentlicht. Eine aktuelle Übersicht ist immer unter www.vdi.de/3405 verfügbar.

VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren; Grund-lagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen

VDI 3405 Blatt 1 Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing; Laser-Sintern von Kunststoff-bauteilen; Güteüberwachung

VDI 3405 Blatt 2 Additive Fertigungsverfahren; Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Quali-fizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung

VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfah-ren; Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Ma-terialkenn-datenblatt Aluminiumlegierung Al-Si10Mg

VDI 3405 Blatt 3 Additive Fertigungsverfahren; Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen

9.3 Der VDI als Netzwerker

Haupt- und ehrenamtliche Mitarbeiter des VDI stehen mit dem DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. [35] im regelmäßigen Austausch, um die Aktivitäten zu koordinieren und die additiven Fertigungsverfahren gemeinsam voran-zubringen. Auf einem Verbändegespräch, zu dem der DVS eingeladen hatte, wurde herausgearbeitet, dass die Arbeitsschwerpunkte verschiedener Organisatio-nen für Außenstehende schwierig nachzuvollziehen sind. Die in Abschnitt 8 von uns zusammengetragene Übersicht über die Verbandsaktivitäten soll hier eine Hilfestellung geben und eine Basis für Koordination der jeweiligen Aktivitäten bilden.

10 VDI-Richtlinien in der internationalen Standardisierung

Additive Fertigungsverfahren sind in aller Munde: Politik, Verbände, Analysten, Publikumspresse und soziale Netzwerke diskutieren darüber. So kommt auch ein Organisationsapparat in Gang, der die neuen Technologien möglichst schnell regulieren will.

Dabei ist darauf zu achten, dass nicht aus purem Aktionismus Regulierungen vorgenommen werden, die die Entwicklung der Verfahren hin zu echten Fertigungstechnologien gefährden und Innovationen behindern. Vielmehr müssen Standards zunächst einmal helfen, das Wissen über die Technologien zu vermitteln und damit deren Einsatz überhaupt möglich zu machen.

2003 konstituierte sich der FA 105 im VDI und war das erste Expertengremium weltweit, das einen Überblick über die Verfahren, ihre Möglichkeiten, aber auch ihre Grenzen, ihre Charakteristika und Nutzungsvoraussetzungen erstellen wollte. Mit der Veröf-

fentlichung der Richtlinie VDI 3404 (heute VDI 3405) stand die erste technische Regel für additive Fertigungsverfahren überhaupt zur Verfügung. Europaweit kann der FA 105 mit seinen Unterausschüssen als eines der aktivsten Gremien bei der technischen Regelsetzung angesehen werden und er greift weiterhin regelmäßig neue Themen für die gemeinschaftliche Expertenarbeit mit allen interessierten Kreisen auf.

Der deutsche DIN NA 145-04-01 AA übernimmt die VDI-Richtlinien und bereitet sie für ISO als neue Normenvorschläge auf. Gemeinsam mit dem ASTM F42 erarbeitet ISO/TC 261 weltweit einzigartige Standards für die additiven Fertigungsverfahren; demnächst will sogar das CEN/TC 438 die ersten davon übernehmen. Somit finden VDI-Inhalte ihren Weg in neue, vorher nie dagewesene ISO-ASTM-EN-DIN-Normen! Erstes Beispiel ist VDI 3404: Die Inhalte finden sich zu einem großen Teil in den Normen ISO 17296-2, ISO 17296-3 und ISO 17296-4 wieder.

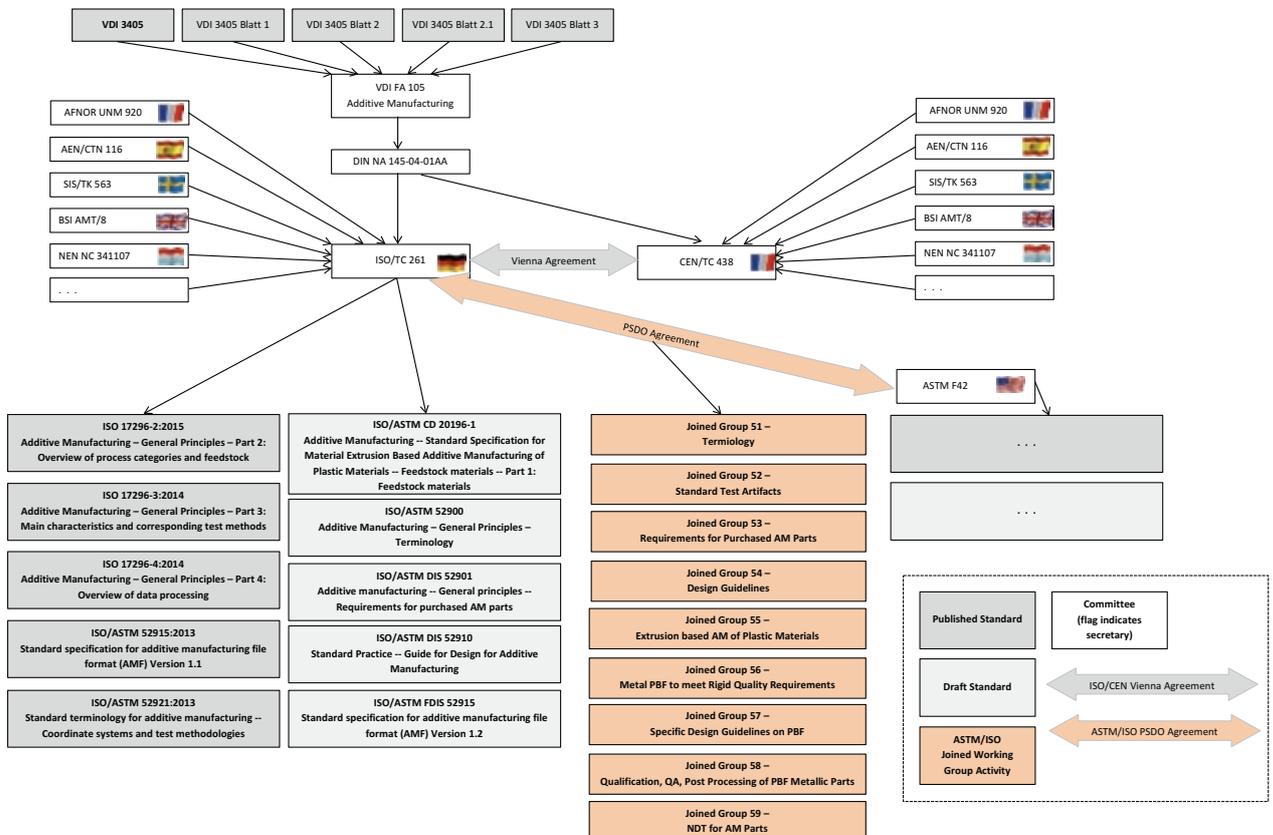


Bild 41. VDI-Richtlinien bilden die Grundlage internationaler Standards, weiß sind die Gremien/Committees dargestellt, grau die jeweiligen Dokumente (Quelle: Jörg Lenz, EOS)

Bild 41 zeigt die weltweit maßgeblich an der Standardisierung der additiven Fertigungsverfahren Beteiligten.

Immer mehr Verbände und weitere Institutionen, aber auch weitere Komitees der schon involvierten Normungseinrichtungen beginnen mit teils konkurrierenden, teils ergänzenden Aktivitäten. Sie alle gilt es, sinnvoll in die Gesamtstrategie einzubinden. Die Zahl derer, die als Experten bei der Erstellung der Dokumente hilfreich zur Verfügung stehen, ist immer noch begrenzt. Da solche Tätigkeiten stets ehrenamtlich sind und neben den hauptberuflichen Aufgaben geleistet werden müssen, sollten Normungstätigkeiten nach Möglichkeit fokussiert ablaufen, um die Experten nicht zu verlieren.

Von besonderer Bedeutung ist die Berücksichtigung bestehender Normen. Sehr viele davon lassen sich,

mit kleinen Ergänzungen, durchaus auch auf die additiven Fertigungsverfahren anwenden. Oftmals sind die entsprechenden Expertengremien aber geneigt, das Rad für die additiven Fertigungsverfahren erneut zu erfinden. Das Referenzieren solcher bestehender Normen wie auch die Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Komitees ist daher sinnvoll und spart ohnehin knappe (Experten-)Ressourcen.

In dem Maß, wie die additiven Fertigungsverfahren ihr Potenzial für Serienanwendungen zeigen und heute bereits in Flugzeugen, Autos und sogar dem menschlichen Körper Einsatz finden, sind auch Zertifizierungsthemen ganz aktuell. Hier können und müssen Normen unterstützen; dennoch werden in den zertifizierenden Institutionen weitergehende Festlegungen zu erarbeiten sein.

Autoren

Die vorliegende VDI-Publikation „Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren“ wurde auf Grundlage des „Statusreports Additive Fertigungsverfahren“, der im September 2014 veröffentlicht wurde [25], erstellt. Den Autoren des Statusreports Jürgen Ensthaler, Tobias Grimm, Benjamin Günther, Gregor Jell, Jörg Lenz, Erik Marquardt, Maximilian Munsch, Anne-Kathrin Müller, Klaus Müller-Lohmeier, Ralf Paehl, Olaf Rehme, Stefanie Rieker, Jan T. Sehrt, Sabine Sändig und Gerd Witt sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

An der Erstellung dieser „Handlungsfelder“ haben folgende Mitglieder und Gäste des Fachausschusses FA 105 „Additive Manufacturing“ mitgearbeitet:

- Dominik Bauer, Airbus Group Innovations, München
- Dr. Kirsten Borchers, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart
- Dipl.-Ing. Torsten Burkert, BMW Group, München
- Dean Ćirić, fabmaker, Braunschweig
- Frank Cooper, Birmingham City University, Birmingham, UK
- Prof. Dr. jur. habil. Dr. rer. pol. Jürgen Ensthaler, Technische Universität Berlin, Berlin
- Heinz Gaub, ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg
- Dr.-Ing. Hans-Jürgen Gittel, StaeGi GmbH, Nürtingen
- Dipl.-Ing. Tobias Grimm, Universität Duisburg-Essen, Duisburg
- Dr.-Ing. Martin Hillebrecht, EDAG Engineering GmbH, Fulda
- Prof. Dr. Petra J. Kluger, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart
- Dr. Burghardt Klöden, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Dresden
- Prof. Dr. sc. techn. Detlef Kochan, Zentrum für Angewandte Forschung und Technologie e.V., Dresden
- M.Sc. Tobias Kolb, Lehrstuhl für Photonische Technologien, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen
- Dr.-Ing. Lukas Löber, SAUER GmbH, Pfronten
- Jörg Lenz, EOS GmbH, Krailling
- Dr.-Ing. Erik Marquardt, VDI e.V., Düsseldorf
- Dr.-Ing. Maximilian Munsch, implantcast GmbH, Buxtehude
- RAin Anne-Kathrin Müller, Technische Universität Berlin, Berlin
- Dipl.-Ing. Klaus Müller-Lohmeier, Festo AG & Co. KG, Esslingen
- RA Marco Müller-ter Jung, LL.M., DWF Germany Rechtsanwaltsgesellschaft mbH, Köln
- Frank Schaefflein, Stratasys GmbH, Rheinmünster
- Dipl.-Ing. Christian Seidel, Fraunhofer IWU Projektgruppe RMV und iwb Anwenderzentrum der Technischen Universität München, Augsburg
- Prof. Dr. Hartmut Schwandt, Technische Universität Berlin, Berlin
- Richard van de Vrie, Luxexcel Group BV, Kruiningen, Niederlande
- Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, Universität Duisburg-Essen, Duisburg
- Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München, Garching bei München

Schrifttum

Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften

Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (Urheberrechtsgesetz – UrhG) vom 9. September 1965 (BGBl I, 1965, Nr. 51, S. 1273–1293)

Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Januar 2002 (BGBl. I S. 42, 2909; 2003 I S. 738)

Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte (Produkthaftungsgesetz – ProdHaftG) vom 15. Dezember 1989 (BGBl. I, 1989, Nr. 59, S. 2198–2200)

Gesetz zur Neuregelung des Waffenrechts (WaffRNeuRegG); (Artikel 1 Waffengesetz (WaffG)) vom 11. Oktober 2002 (BGBl I, 2002, Nr. 73, S. 3970-4014)

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Waffengesetz (WaffVwV) vom 05. März 2012 (BAnz, 2012, Nr. 47a, S. 3–60)

Gesetz über den rechtlichen Schutz von Design (Designgesetz – DesignG) vom 24. Februar 2014 (BGBl I, 2014, Nr. 8, S. 122–141)

Patentgesetz – (PatG) vom 16. Dezember 1980 (BGBl I, 1981, Nr. 1, S. 1–25)

Technische Regeln

DIN EN ISO 4287:2010-07 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth Verlag

DVS 3215:2011-06 Laserstrahl-Auftragsschweißen. Berlin: Beuth Verlag

ISO 17296-2:2015-01 Additive manufacturing – General principles – Part 2: Overview of process categories and feedstock. Genf: ISO

ISO 17296-3:2014-09 Additive manufacturing – General principles – Part 3: Main characteristics and corresponding test methods. Genf: ISO

ISO 17296-4:2014-09 Additive manufacturing – General principles – Part 4: Overview of data processing. Genf: ISO

VDI 2519 Blatt 1:2001:12 Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten/Pflichtenheften. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405:2014:12 Additive Fertigungsverfahren; Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 1:2013-10 Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing: Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen; Güteüberwachung. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 2:2013-08 Additive Fertigungsverfahren; Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 2.1:2015-07 Additive Fertigungsverfahren, Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung Al-Si10Mg. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 3:2015-12 Additive Fertigungsverfahren; Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 5620 Blatt 1:2015-08 (Entwurf) Reverse Engineering von Geometriedaten. Berlin: Beuth Verlag

VDI 6224 Blatt 2:2012-08 Bionische Optimierung; Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile. Berlin: Beuth Verlag

VDI/VDE 3694:2014-04 Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen. Berlin: Beuth-Verlag

VDI/VDE/VDMA 2632 Blatt 2:2015-10 Industrielle Bildverarbeitung; Leitfaden für die Erstellung eines Lastenhefts und eines Pflichtenhefts. Berlin: Beuth Verlag

Literatur

[1] www.eos.info, abgerufen am 20.08.2015

[2] www.concept-laser.de, abgerufen am 20.08.2015

[3] www.slm-solutions.com, abgerufen am 20.08.2015

- [4] www.voxeljet.de, abgerufen am 20.08.2015
- [5] <http://www.arburg.com/de/leistungsspektrum/additive-fertigung>, abgerufen am 20.08.2015
- [6] <http://de.dmgmori.com/produkte/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d>, abgerufen am 20.08.2015
- [7] <http://www.hermle-generativ-fertigen.de/cms/de/technology>, abgerufen am 06.10.2015
- [8] <http://www.luxexcel.com>, abgerufen am 20.08.2015
- [9] www.stratasys.com, abgerufen am 20.08.2015
- [10] Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Analysis of Promising Industries. Paderborn: Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn, 2011, https://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/06_Downloads/01_Studies/DMRC_Study_Part_1.pdf, Stand 25.05.2016
- [11] <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/startpage.html>, abgerufen am 28.08.2015
- [12] F. Cooper: Sintering and Additive Manufacturing: The New Paradigm for the Jewellery Manufacturer. Johnson Matthey Technol. Rev., 2015, Vol. 59, issue 3, Seiten 232–241, <http://www.technology.matthey.com/article/59/3/233-242/>, abgerufen am 29.07.2015
- [13] D. Wiechmann: Ein neues Bracketsystem für die Lingualtechnik. Fortschr Kieferorthop., Nr. 3, 2002, Urban & Vogel
- [14] D. Ciric, P. Fastermann, Fabucation. 3D-Druck in der Schule, Books on Demand, Norderstedt, 2014, ISBN 978-3-7357-5802-6
- [15] <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/7620/Lunar-Bases-Could-be-Constructed-using-Additive-Manufacturing.aspx>, abgerufen am 20.08.2015
- [16] C. Leyens: Additive Fertigung – Wege in die industrielle Anwendung. Vortrag auf dem BMBF Technologiegespräch zu ProMat3D, Bonn, 24.06.2015
- [17] <http://www.krallmann.de/branchen/optics/>, Stand 31.07.15
- [18] <http://www.vdi.de/industrie40>, Stand 20.08.2015
- [19] P. Sander: Auf dem Weg zur Additiven Fertigung: Chancen und Herausforderungen für die zukünftige industrielle Produktion. Vortrag Rapid.Tech, 10. Juni 2015, Erfurt
- [20] FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, 6. Auflage VDMA Verlag, 2012, Frankfurt
- [21] A. Lannin: Microsoft, Windows and 3D Printing. Vortrag Rapid.Tech, 10. Juni 2015, Erfurt
- [22] <http://3mf.io/>, abgerufen am 17.08.2015
- [23] www.tialcharger.de, abgerufen am 23.09.2015
- [24] T. Grimm, G. Wiora, G. Witt: Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy. In: Surf. Topogr.: Metrol. Prop. 3 (1), S. 014001. DOI: 10.1088/2051-672X/3/1/014001, 2015
- [25] J. Ensthaler, T. Grimm, B. Günther, G. Jell, J. Lenz, E. Marquardt, M. Munsch, A.-K. Müller, K. Müller-Lohmeier, R. Paehl, O. Rehme, S. Rieker, J. T. Sehart, S. Sändig, G. Witt: Statusreport Additive Fertigungsverfahren, 2014 www.vdi.de/statusadditiv, abgerufen am 02.12.2015
- [26] E. Marquardt, „Additive Fertigungsverfahren, VDI-Richtlinien und Recht – Einige Fakten und viele Fragen“ in: InTeR 4/15 S. 219–223, Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt, ISSN 2195-5743
- [27] von Westphalen in: Foerste/von Westphalen, Produkthaftungshandbuch, § 49 Rn. 18, 19 mwN
- [28] http://www.ausfuhrkontrolle.info/ausfuhrkontrolle/de/vorschriften/eg_dual_use_vo, abgerufen am 04.01.2016
- [29] BT-Drucks. 17/14293, S. 2.
- [30] BT-Drucks. 17/13734, S. 11.
- [31] Mengen, MMR 2014, 150, 153.
- [32] www.gesim.de/en/nano-plotter, abgerufen am 23.09.2015
- [33] www.vdi.de/gpl/fa105, abgerufen am 20.08.2015
- [34] www.vdi.de/gpl, abgerufen am 20.08.2015
- [35] https://www.die-verbindungs-spezialisten.de/fileadmin/user_upload/Presse-notizen/DVS-PM_34-2012_additive-Fertigungsverfahren.pdf, abgerufen am 20.08.2015

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 155.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Als Sprecher der Ingenieure und der Technik gestalten wir die Zukunft aktiv mit. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter Regelssetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Fachbereich Produktionstechnik und
Fertigungsverfahren
Dr. Erik Marquardt
Tel. +49 211 6214-373
marquardt@vdi.de
www.vdi.de

ISBN 978-3-931384-82-1

Diese Broschüre finden Sie
als PDF-Datei zum kostenlosen
Download unter:
www.vdi.de/HandlungsfelderAM

