

3D Printing

Recht, Wirtschaft und Technik des industriellen 3D-Drucks

Bearbeitet von

Dr. Andreas Leupold, Silke Glossner, Dr.-Ing. Fazel Ansari, Dr. Matthias Bleckmann, Stefanie Brickwede, Michael Bruch, Dr. Alexander Cuntz, Arvid Eirich, Dr. Helge Dauchert, Prof. Dr. Ulrich M. Gassner, Prof. Dr. Andreas Gebhardt, Karin Griggel, Prof. Dr. Lambert Grosskopf, Dr. Jens Holtmannspötter, Ulrich Jahnke, Friedemann Kammler, Dr. Eric Klemp, PD Dr. Peter Kreuz, Markus Lingl, Prof. Dr. Klaus J. Mellulis, Prof. Dr. Carsten Momsen, Markus Rebhan, Prof. Dr. Guido Ritter, Peter Sander, Laura Iva Savic, Dr. Elke Schwager, Dr.-Ing. Christian Seidel, Prof. Dr. Ulrich Seidenberg, Prof. Dr. Oliver Thomas, Andreas Varwig, Ricarda Weber, Jürgen Weichert, Prof. Dr. rer.pol. Heiko D. Wenzel-Schinzer, Prof. Dr. Andreas Wiebe

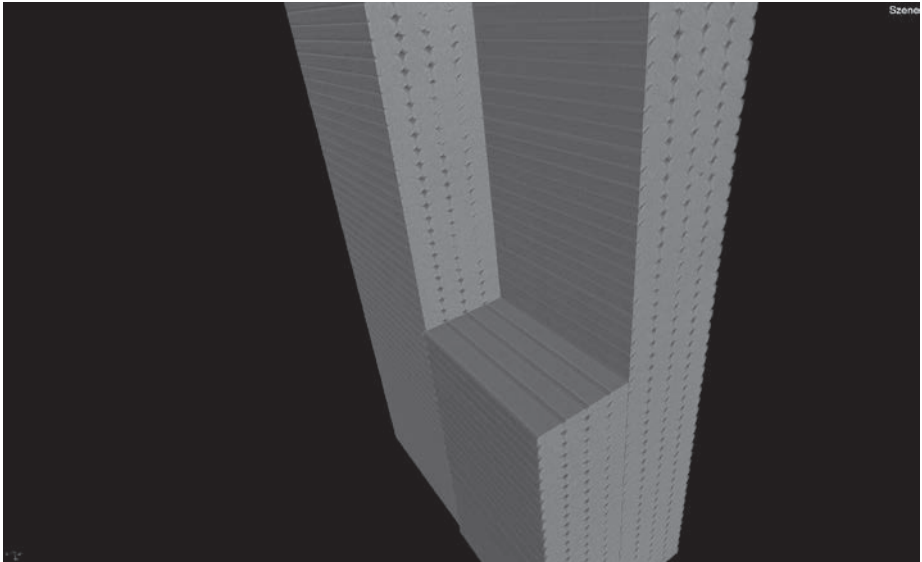


Abbildung 7: Computertomographie eines mittels FDM hergestellten Bauteils. Bei dem FDM Verfahren kommt es häufig zu einer unzureichenden Verschmelzung der einzelnen Bahnen. Es können sowohl die einzelnen Bahnen als auch die unzureichenden Verschmelzungen erkannt werden.

als Grundwerkstoff. Die Körnung muss dabei so gewählt werden, dass sich Schichten von 0,1 mm Stärke leicht und gleichmäßig ohne Agglomerationen (Klumpenbildung) aufstreichen lassen, da dies der Auflösung des Druckverfahrens in Z-Richtung entspricht.

- 63** Dazu werden aus Kostengründen meist Gips und Polymerpulver verwendet. Das Verfahren wird auch mit Glas oder Keramikpulver betrieben. Neben dem Pulver, das als Grundwerkstoff dient, ist eine zweite Komponente erforderlich, um das Pulver zu binden. Das Bindemittel kann z.B. mittels eines handelsüblichen Tintenstrahl Druckkopfes mit Piezokeramikdüsen auf das Pulver aufgetragen werden.
- 64** Es besteht die Möglichkeit, zusammen mit dem Bindemittel auch Farben lokal aufzutragen. Die Drucke können also direkt farbig erstellt werden.
- 65** Ein besonderer Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass keine separaten Stützstrukturen erforderlich sind. Der Druck stützt sich selbst durch das Pulverbett ab, in dem das Bauteil entsteht. Viele Bauteile benötigen so keine Nachbearbeitung mehr.
- 66** Bei Verwendung von Gipspulver als Druckmaterial werden die Bauteile zur Festigkeitssteigerung im Anschluss noch mit einem dünnflüssigen Klebstoff (Cyanacrylat) infiltriert. Die Druckkosten des Verfahrens sind im Vergleich zu anderen Verfahren relativ gering. Der Anwendungsbereich des 3D-Pulverdruckverfahrens mit Gips beschränkt sich aufgrund der relativ schlechten mechanischen Eigenschaften, des hohen Aufwands nach dem Druck und der sehr guten Gestaltungsmöglichkeiten allerdings eher auf Modelle in geringer Stückzahl im Bereich Design, Prototypenbau, Visualisierung und Ausbildung.

3. SLM Verfahren. Das Selektive Laserstrahlschmelzen (SLM, Selective Laser Melting) ermöglicht derzeit für metallische Werkstoffe die größte geometrische Präzision und die besten Oberflächen. Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil liegt darin, dass die Fertigungsanlagen weit entwickelt sind. So ist das Handling des Metallpulvers automatisiert und die Hersteller implementieren umfangreiche Sensorik und Mechanismen zur Qualitätssicherung. 67

Die Nutzung von SLM Verfahren erfordert allerdings einige besondere Prozessbedingungen, die es einzuhalten gilt. Um mittels selektivem Laserstrahlschmelzen eine Schicht zwischen 20 µm und 200 µm aus Metallpulver auf eine Bauplattform auftragen zu können, muss das Metallpulver eine definierte Korngrößenverteilung von ca. 10 µm bis 70 µm haben. Diese Schicht wird dann mittels eines Lasers lokal aufgeschmolzen. Um Oxidationen und weitere Reaktionen mit anderen Elementen der Umgebungsluft zu vermeiden, muss der Prozess unter Schutzgas durchgeführt werden. Das Schutzgas wird in einem Umlaufprozess durch große Filter geleitet, um die entstehenden Abbrandprodukte aus dem Gas zu entfernen. Die Filter müssen dabei einer permanenten Drucküberwachung unterliegen um rechtzeitig einen nötigen Wechsel durchführen zu können. 68

Alle gängigen Anlagen haben eine beheizbare Bauplattform. Dies dient zur Reduzierung der Eigenspannungen durch Reduzierung der Temperaturdifferenz zwischen Schmelztemperatur des Metalls und der Plattformtemperatur. Die Plattformtemperatur beeinflusst die Mikrostruktur der hergestellten Werkstoffe und dessen mechanische Eigenschaften. 69

Zu Beginn eines Bauprozesses muss eine etwa ein Millimeter dicke Schicht aus ca. 50 Einzelschichten zur besseren Anbindung an die Bauplattform aufgebaut werden, um einen Verzug des Bauteils zu verhindern und die entstehende Wärme in die Bauplattform abzuleiten. Außerdem kann so das Bauteil nach dem Druck leichter ohne Beschädigungen von der Bauplattform getrennt werden. Das herzustellende Bauteil wird dann inklusive der nötigen Stützstrukturen schichtweise aufgebaut. Neben der Anbindung der Basis des Bauteils mit der Bauplattform müssen weitere Stützstrukturen für freie, horizontale Flächen mit gedruckt werden. 70

Nach der letzten Schicht ist der Bauraum vollständig mit Pulver aufgefüllt, indem das hergestellte Bauteil eingebettet ist. Das Pulver muss dann entfernt und einem Siebprozess zugeführt werden, um große Konglomerate und Aufschmelzungen zu entfernen. Das gesiebte Pulver wird dem Prozess wieder zugeführt. 71

Das Bauteil wird inklusive der Bauplattform aus der Anlage entnommen, anschließend von der Bauplattform getrennt und die übrigen Stützstrukturen werden entfernt. 72

4. MJM Verfahren. Das MJM 3D-Druckverfahren (Multi Jet Modeling) verbindet die Vorteile der Stereolithografie (SLA), welches das älteste der 3D-Druckverfahren darstellt, mit den Vorteilen des FDM-Verfahrens (Fused Deposition Modeling). Es ist ein relativ junges und modernes Druckverfahren mit einer Reihe von einzigartigen Fähigkeiten und „Eigenheiten“. 73

Die Vorteile des Verfahrens bestehen zum einen im punktgenauen Auftragen, in der schnellen Aushärtung des Werkstoffs, sowie der sehr guten Bindung der verschiedenen übereinander und nebeneinanderliegenden Lagen ähnlich dem SLA-Verfahren. Die aufgebrauchte Monomerlösung trifft auf eine noch nicht vollständig ausgehärtete Oberfläche. Es ergibt sich ein sehr guter Stoffschluss durch Kleben und Interdiffusi- 74

on. Da der Druckprozess bei Raumtemperatur stattfindet, weisen die Bauteile keine nennenswerten Eigenspannungen durch Wärme oder Schrumpf nach dem Druck auf. Dies spiegelt sich in einer hohen geometrischen Genauigkeit der Druckerzeugnisse wieder. Durch die Verwendung von mehreren Druckköpfen, welche mit einer sehr hohen Anzahl von präzise angeordneten einzelnen Düsen ausgeführt sind, kann neben der relativ hohen Geschwindigkeit des Druckverfahrens eine hohe Genauigkeit realisiert werden.

- 75 Die Unterteilung des Druckkopfes in mehrere einzelne Druckköpfe mit wiederum vielen Druckdüsen kann auch genutzt werden, um simultan mit verschiedenen Monomerlösungen zu drucken. Auch die Stützstrukturen werden mit einer Monomerlösung (Stützmaterial) aufgebracht.
- 76 Die hohe Anzahl von einzelnen Düsen in den Druckköpfen bietet weiterhin den Vorteil, dass neben dem erforderlichen Stützmaterial zur Stabilisierung der Bauteile bei Überhängen oder sehr dünnen Wandstärken mehrere Materialien in einem Druckvorgang simultan verwendet und auch „digital“ gemischt werden können. Dadurch lassen sich Abstufungen in Farbgebung, Transparenz, Härtegrad und Festigkeit des Bauteils in einem Arbeitsgang realisieren. Materialuntersuchungen haben gezeigt, dass die im MJM Verfahren hergestellten Bauteile, im Gegensatz zum FDM Verfahren, nur eine geringe Anisotropie aufweisen.
- 77 Durch die hohe Anzahl der Druckköpfe und die kleinen Druckdüsen ist es bei modernen Geräten möglich, mehrere Materialien simultan in einem Arbeitsschritt zu drucken. Weiterhin besteht die Möglichkeit, diese Materialien während des Druckprozesses zu mischen und nachfolgend als ein zusammenhängendes Objekt auszuhärten. Somit können Abstufungen in Farbe, Transparenz und Härte individuell eingestellt werden. Theoretisch können so Bauteile gedruckt werden, bei denen jedes Volumenelement die gewünschte Materialeigenschaft aufweist. Die Abbildung 8 zeigt den Prozess des „Digitalen Mischens“ von verschiedenen Werkstoffen. Zwei Komponenten werden in verschiedenen Konzentrationen, die abhängig von der Einstellung in der Druckersoftware sind, flüssig Schicht für Schicht aufgetragen.

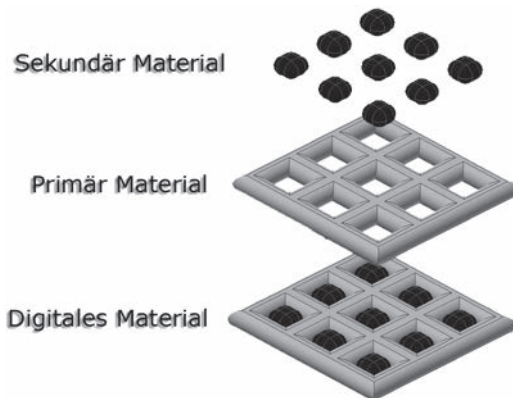


Abbildung 8: Mischen von Material beim Multijet Modelling.

Eine besondere Bedeutung spielt bei diesem Verfahren das Stützmaterial und die Nachbearbeitung (Post-Processing) der Bauteile nach dem Druck. Das Entfernen der Stützstrukturen, ohne die Überhänge, wie sie u.a. bei Hohlstellen zu finden sind, nicht realisiert werden können, unterscheidet sich bei den verschiedenen MJM-Druckern. Manche Stützmaterialien sind gut wasserlöslich, andere müssen mit zusätzlicher, mechanischer Unterstützung oder in Laugen entfernt werden. Teils werden Wasserstrahlanlagen, ähnlich einem Hochdruckreiniger, eingesetzt. Schwierig zu entfernende Stützmaterialien schränken das Druckverfahren erheblich ein. Dünnwandige Strukturen werden so oft zerstört. Bei der Konstruktion eines Objekts muss demnach die Möglichkeit des Entfernens des Stützmaterials durch das Schaffen angemessener Öffnungen berücksichtigt werden. Hohlräume, die keine Verbindung nach außen haben, wie es beim Druck von inneren Wabenstrukturen beim FDM-Verfahren möglich ist, sind beim MJM – Verfahren nicht ohne weiteres möglich. **78**

D. Beispiel einer Werkstoffanalyse

Beim MJM-Verfahren werden, wie bereits erwähnt, Monomere in flüssiger Form mit Hilfe des Druckkopfes auf der Bauplattform aufgetragen und erreichen dort durch UV-Licht initiierte Polymerisation ihre endgültige Form und Festigkeit. Die Eigenschaften der Bauteile werden von den Prozessparametern wie Druckgeschwindigkeit, Belichtungsdauer und Intensität der UV-Lampen, Mischungsverhältnis der verschiedenen Materialien und Auftragsstärke des Materials pro Arbeitsgang bestimmt. Aufgrund dieser Abhängigkeiten kann von den verwendeten Monomeren nur bedingt auf spätere Eigenschaften der Bauteile geschlossen werden. **79**

Die eigentliche Analyse der mechanischen Eigenschaften basiert auf der Untersuchung von verschiedenen Werkstoffkennwerten. Zu den relevantesten gehören: **80**

- Dichte
- Zugfestigkeit
- Bruchdehnung
- Oberflächenbeschaffenheit.

Die Ermittlung der Zugfestigkeit, die im Folgenden etwas näher beleuchtet wird, erfolgt nach der DIN EN ISO 527-2 „Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften“. Hierfür werden mehrere Probekörper in verschiedenen Ausrichtungen im Bauraum eines MJM-Druckers gefertigt und sodann mit einer Zugprüfmaschine einer zerstörenden Werkstoffprüfung unterzogen. Die Ergebnisse liefern für die Konstruktion und Bauteilgestaltung sowie für die Ausrichtung der Bauteile im Bauraum des 3D-Druckers entscheidende Informationen. Folgende Abbildung 9 zeigt den virtuellen Bauraum eines 3D-Druckers des Typs Connex 3 in dem verschiedene, wichtige Anordnungen der Zugproben dargestellt sind. **81**

Die Zugproben werden in allen drei Achsen (X-, Y- und Z-Achse) jeweils in einer 0° und 90° gedrehten Ausrichtung gedruckt, so dass sechs Orientierungen zu prüfen sind. **82**

Die 3D-Drucker der Connex Reihe bieten die Besonderheit, dass Stützmaterial, welches sich direkt an das eigentliche Bauteil anlegt, eine deutlich sichtbar rauere Oberfläche als ohne Stützmaterial verursacht. Da ein Bauteil beim Druck stets auf einem dünnen Bett aus Stützmaterial entsteht, ist dieser Effekt der raueren Ober- **83**

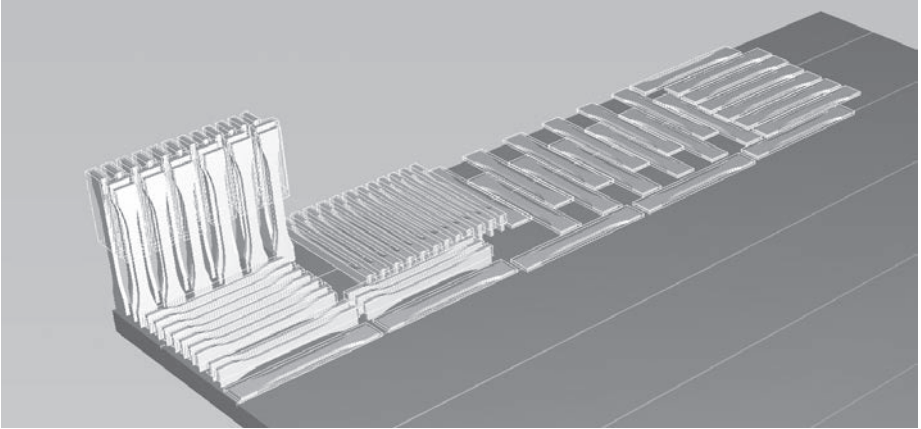


Abbildung 9: Anordnung der Zugproben für die Werkstoffuntersuchung.

fläche immer auf der Grundfläche und an Überhängen die zur Grundfläche (dem „Build Tray“) zeigen zu beobachten. Die Gerätesoftware bietet weiterhin die Option das komplette Bauteil mit Stützmaterial zu umhüllen. Dies kann entweder durch Auswahl der Einstellung „matt“ für das komplette Umhüllen oder „glänzend“ für das ausschließliche Umhüllen der zwingend erforderlichen Flächen mit Stützmaterial geschehen. Die Einstellung „matt“ hat zur Folge, dass das komplette Bauteil die beschriebene raue Oberfläche aufweist. Um diesen Einfluss gleichermaßen zu untersuchen, wurden die sechs resultierenden Ausrichtungen jeweils in matt und glänzend gedruckt.

- 84 In Abbildung 10 ist deutlich zu erkennen, dass die rechten und linken Randbereiche eine deutlich unterschiedliche Oberfläche aufweisen. Diese Abweichungen müssen bei der Ermittlung der mechanischen Materialkennwerte ebenfalls mitberücksichtigt werden, daher ist es erforderlich, die sechs Ausrichtungen in matt und glänzend zu untersuchen, was die Anzahl der zu untersuchenden Probentypen auf

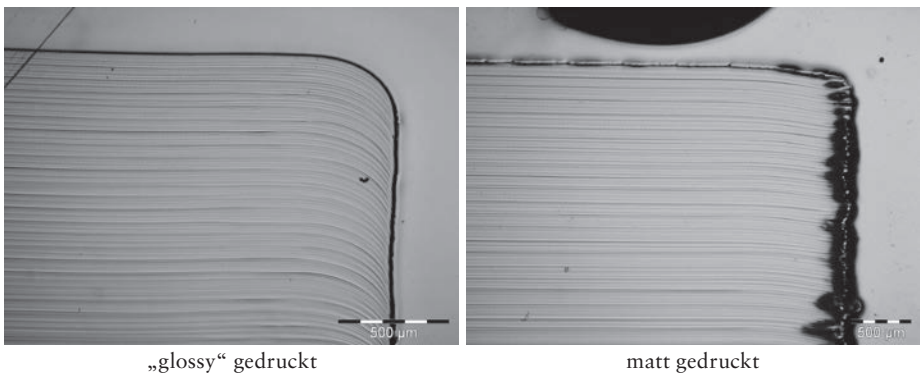


Abbildung 10: Unterschiede zwischen einer „glänzend“ und „matt“ gedruckten Oberfläche einer Zugprobe im Querschnitt.

12 erhöht. Das Stützmaterial wurde bei allen Proben im Zuge des Post-Processing mit einem Wasserstrahl und anschließender Ultraschallbehandlung in einer 1 %igen NaOH Lösung entfernt.

Die darauffolgende Auswertung ergab, dass die verschiedenen Orientierungen im Bauraum nur marginalen Einfluss auf die Zugfestigkeit des Werkstoffs haben. So schwanken die Zugfestigkeiten bei glänzend gedruckten Zugproben von 50,2 MPa bis 48,2 MPa. Die Zugproben, welche in einer um 90° gedrehten Orientierung zur Zugrichtung gedruckt wurden, weisen hierbei eine um ca. 4 % geringere Zugfestigkeit auf. Der deutlich bedeutendste Einflussfaktor auf die Zugfestigkeit ist bei diesem Verfahren die raue Oberflächenbeschaffenheit, die sich bei matten Oberflächen ergibt. Hier wurden die höchsten Zugfestigkeiten mit 40,2 MPa in optimaler Orientierung (0° zur Bewegungsrichtung des Druckkopfes) gemessen, was einer Verringerung der Zugfestigkeit um ca. 40 % entspricht. Die schlechtesten Werte mit 34,2 MPa ergaben die um 90° gedrehten Zugproben, das entspricht einer Verringerung der Zugfestigkeit um ca. 32 % zum Spitzenwert für „glänzend“ und 0° Orientierung gedruckten Zugproben. **85**

In der folgenden Tabelle Eigenschaften sind noch einmal wesentliche Eigenschaften der vier diskutierten Verfahren aufgeführt. Es zeigt sich deutlich, dass alle Verfahren spezielle „Eigenheiten“ aufweisen, die zu berücksichtigen sind. Anisotropie, Verzug, Stützstrukturen und andere Besonderheiten der Druckverfahren müssen bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Da die Druckerhersteller nur wenig über die Grenzen und Limitierungen der von ihren Geräten eingesetzten Druckverfahren berichten und die Produktzyklen der Drucker sehr kurz sind, müssen oft die Anwender erst durch eigen Erfahrungen die realen Möglichkeiten und Grenzen ihrer Geräte kennenlernen. **86**

Aus den genannten Gründen sind mit dem Wechsel des Druckverfahrens bei komplexen Bauteilen oftmals noch konstruktive Änderungen notwendig, um den Druck und die Funktion des Bauteils zu ermöglichen. **87**

Eigenschaft	FDM	SLM	MJM	3D-Pulverdrucken
Post Processing	mittel	hoch	hoch	gering
Werkstoffkosten	mittel	hoch	hoch	gering
Isotropie der Werkstoffe	stark anisotrop	vorhanden	gering anisotrop	isotrop
Werkstoffe	PC,PLA,ABS, NYLON, PEEK, PEI	Aluminium, Stahl-, Titanlegierungen	UV-härtende Kunststoffe	Gipspulver, Cyanacrylat, Polyol + Isocyanat
Stützmaterial	erforderlich	erforderlich	erforderlich	nicht erforderlich
Multimaterialdruck	bedingt	bedingt	ja	nein
	möglich	möglich		
Toleranzen	ca. 0,1 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,1 mm
Oberflächenrauheiten (Rz)	50 µm	20 µm	20 µm	50 µm
Farbgebung	durch farbige Filamente können verschieden farbige Bereiche gedruckt werden	nein	ja durch Digitalmaterial	ja durch RGB Farbpatrone
Verzug	-	-	+	+
Materialeigenschaften	konstant, kann durch Druck mit mehreren Filamenten variiert werden	konstant	Gradienten möglich	konstant
Mindestwandstärke	1 mm	0,5 mm	0,5 mm	2 mm

Abbildung 11: Eigenschaften von vier aktuellen Druckverfahren.

E. Ausblick

In einigen Zukunftsszenarien sollen additive Fertigungsverfahren konventionelle Fertigungsverfahren vollständig ersetzen, die Herstellung neuer Werkstoffe und optimierter Konstruktionen mit komplizierten Geometrien sowie individualisierter Produkte ermöglichen und bisher gängige Logistikmodelle revolutionieren. **88**

In der Realität sind mit dem 3D-Druck neue Fertigungsverfahren zu bewährten, teils bereits hochautomatisierten Verfahren hinzugekommen, die genauso über Stärken und Schwächen verfügen und sich damit für manche Anwendungen eignen und für andere nicht. **89**

Zurzeit und auch in naher Zukunft können sicherlich nicht alle Bauteile sinnvoll additiv gefertigt werden, da es neben der fehlenden Wirtschaftlichkeit der Verfahren Einschränkungen hinsichtlich der Werkstoffe und auch der Größe der herstellbaren Bauteile gibt. Die Bauteile aus dem 3D-Drucker müssen noch aufwändig nachbearbeitet werden. Der 3D-Druck eines Bauteils umfasst häufig eine komplizierte Prozesskette von der Generierung der Daten über den eigentlichen 3D-Druck bis hin zu Wärmenachbehandlung und mechanischer Nachbearbeitung. Auch beim 3D-Druck muss die Konstruktion, wenn auch in geringerem Maße als bisher, Rücksicht auf das Herstellungsverfahren nehmen. **90**

Die Fragen der Qualitätssicherung und Zulassung additiv gefertigter Bauteile sind kompliziert, häufig zeitintensiv und teuer. **91**

In der Zukunft wird es, insbesondere für mechanisch belastete Bauteile, notwendig sein, verbindliche, herstellerunabhängige Normen für die Ausgangsmaterialien, den Herstellungsprozess (inkl. Prozessüberwachung) und die nachträgliche Qualitätskontrolle einzuführen. **92**

Viele Anwendungen werden wohl auch in Kombination mit konventionellen Verfahren und Technologien entstehen. Für weitere Anwendungen müssen Konstruktionsprinzipien, Technologien und wissenschaftliche Grundlagen des Verfahrens verstanden und neue „druckfähige“ Werkstoffe gefunden werden. Auf dieser Basis können dann zunehmend Teile identifiziert werden, die sich im 3D-Druck besser herstellen lassen und Logistikkonzepte, die die Vorteile der additiven Fertigung nutzen, entwickelt werden. **93**