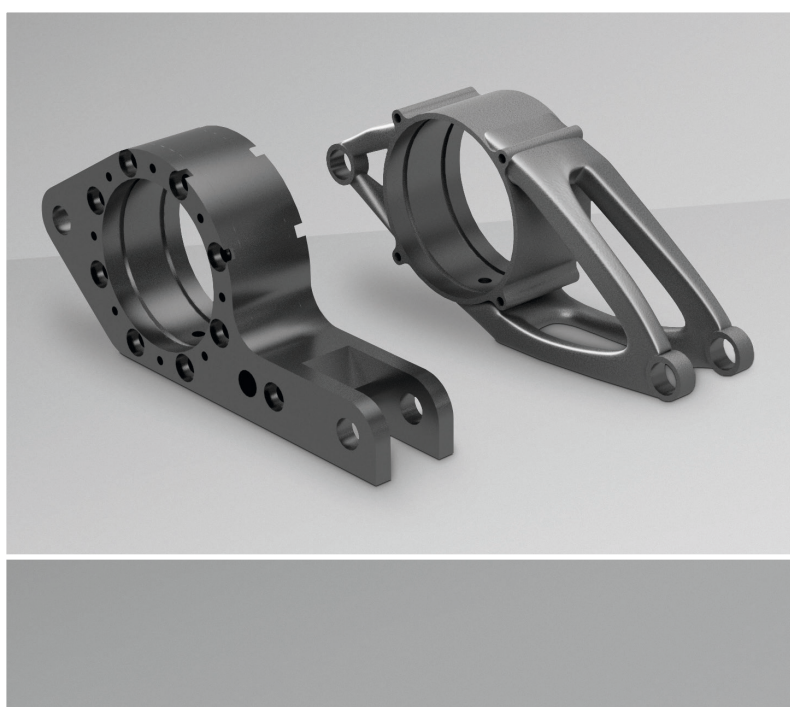


Andreas Gebhardt
Julia Kessler
Alexander Schwarz

Produktgestaltung für die Additive Fertigung



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe*.de**

Andreas Gebhardt
Julia Kessler
Alexander Schwarz

Produktgestaltung für die Additive Fertigung

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt

Geschäftsführer der IwF GmbH – Institut für werkzeuglose Fertigung, Aachen

Professor an der Fachhochschule Aachen

Lehrgebiet: Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing

Dr.-Ing. Julia Kessler

Geschäftsführerin der IwF GmbH – Institut für werkzeuglose Fertigung, Aachen

Alexander Schwarz,

Konstruktionsleiter der IwF GmbH – Institut für werkzeuglose Fertigung, Aachen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Monika Stüve

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Coverbild: Ursprungsbauteil: Jakobs-Houben-Technologie GmbH, Geilenkirchen;

Topologieoptimiertes Bauteil: Institut für werkzeuglose Fertigung GmbH, Aachen

Satz: Kösel Media GmbH, Kruzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45285-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46133-8

Vorwort

Die Additive Fertigung kam Ende der 1980er-Jahre als „Rapid Prototyping“ „in die Welt“. Es ging darum, dreidimensionale Gegenstände, die als Datensatz vorlagen, in reale anfassbare Gegenstände zu verwandeln, sprich: eine klassische Fertigungsaufgabe. Das Neue daran war, dass die zu fertigenden Objekte vollständig durch Datensätze beschrieben und schichtweise aufgebaut wurden und nicht wie bisher durch abtragende Verfahren wie zum Beispiel Fräsen aus Halbzeugen entstanden.

Ging es beim Rapid Prototyping noch vorrangig darum, Bauteile während der Produktentwicklung als physische Bauteile zu erhalten, haben sich mit der Technik auch die Anforderungen an die hergestellten Produkte gewandelt. So geht es mittlerweile nicht mehr nur primär um die Herstellung von Prototypen in der Produktentwicklung, sondern ebenso um die Fertigung von Endprodukten. Damit haben sich die additiven Fertigungsverfahren zu einem eigenständigen Zweig der Fertigungsverfahren weiterentwickelt und stehen nicht länger im Schatten der zerspanenden und umformenden Verfahren.

Dieser Schritt in die Zukunft der Fertigungstechnik fußt auf der direkten Umwandlung von digitalen Daten in Produkte – ein Schritt, der uns mit wachsender Verbreitung der Prinzipien der „Industrie 4.0“ in seiner ganzen Bedeutung erst langsam bewusst wird. Zur Umsetzung sind wir auf Verfahren und Prozessketten angewiesen, die durch den ständigen Wechsel von virtuellen Systemen in physische und umgekehrt gekennzeichnet sind.

Mit der Weiterentwicklung der Möglichkeiten der additiven Fertigungsverfahren haben sich aber auch neue Anforderungen an die Auslegung der Bauteile ergeben. Es gelten nicht länger die Gestaltungsregeln, die für die konventionelle Fertigung gelten, sondern es entstehen neue Regeln, die Beachtung finden müssen. Durch die neue Fertigungsmethode kann eine Vielzahl von Elementen umgesetzt werden, die zuvor nicht möglich war. Dazu zählen Leichtbaustrukturen, Topologieoptimierungen sowie Funktionsintegrationen. Nur wenn diese Elemente genutzt werden, können das Potenzial und die Möglichkeiten der additiven Fertigungsverfahren vollständig genutzt werden.

Dieses Buch schließt an die bekannten verfahrensorientierten und eher auf die Grundlagen der Additiven Fertigung ausgerichteten Bücher an. Schon dort verweisen wir auf die Tatsache, dass sich das Gebiet der Additiven Fertigung so schnell in unterschiedliche Richtungen ausbreitet, dass es von einem einzelnen Autor nicht mehr zeitnah, vollständig und richtig erfasst und dargestellt werden kann. Wir konzentrieren uns hier besonders auf die Aspekte Konstruktion und Gestaltung und gehen damit einen Schritt weiter in die erfolgreiche Anwendung dieser neuen Technologie.

Aachen, Oktober 2019

*Andreas Gebhardt,
Julia Kessler,
Alexander Schwarz*

Der Begriff „Konstrukteur“ findet in diesem Buch als übergreifende Bezeichnung für Personen männlichen, weiblichen und anderen Geschlechts Anwendung.

Danksagung

Die sich stetig und besonders rasant entwickelnde Technologie der Additiven Fertigung macht es nahezu unmöglich, das gesamte Gebiet vollständig zu überblicken und einwandfrei wiederzugeben. Wir als Herausgeber dieses Buches haben uns daher sehr über die Unterstützung zweier Spezialisten gefreut. Für die intensive Mitarbeit an diesem Buch bedanken wir uns herzlich bei *Prasanna Rajaratnam* und *Simon Scheuer*.

Prasanna Rajaratnam, wissenschaftlicher Mitarbeiter des GoetheLab for Additive Manufacturing an der Fachhochschule Aachen, beschäftigt sich seit Jahren mit dem Gebiet der metallverarbeitenden additiven Fertigungsverfahren. Im Rahmen dieses Buches hat er neben den Prozessgrundlagen des Laser Powder Bed Fusion Prozesses (Abschnitt 3.1 „Prozessgrundlagen“) und der Einteilung unterschiedlicher Stützstrukturen (Abschnitt 4.6 „Stützstrukturen und Orientierung im Bauraum“) die Nachbearbeitung metallischer Bauteile, insbesondere die Stützenentfernung und Wärmebehandlung von Bauteilen bearbeitet (Abschnitte 5.1 „Wärmebehandlung“ und 5.2 „Grobbearbeitung“).

Simon Scheuer, ehemaliger Mitarbeiter des GoetheLab for Additive Manufacturing und inzwischen Konstruktions- und Entwicklungsleiter bei der Overath Gruppe, hat seine tiefgehenden Kenntnisse über die Oberflächenbeschaffenheit bei der Gestaltung von additiv gefertigten Metallbauteilen (Abschnitt 4.2 „Oberflächenstrukturen“) sowie über die Integration verschiedener Funktionen (Abschnitt 4.5 „Funktionsintegration“) in ein Bauteil in dieses Buch einfließen lassen.

Ein besonders großer Dank gilt unserer Lektorin Frau Monika Stüve, die uns stets mit guten Hinweisen zur Seite stand sowie Herrn Jörg Strohbach für seine Unterstützung und Ausdauer bei der Herstellung des Buches.

*Andreas Gebhardt,
Julia Kessler,
Alexander Schwarz*

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing., Andreas Gebhardt, Jahrgang 1953, studierte Maschinenbau an der Technischen Hochschule Aachen (RWTH) mit den Schwerpunkten Motoren- und Turbinenbau. 1986 legte er an der gleichen Universität seine Doktorarbeit über die „Simulation des transienten Verhaltens konventioneller Kraftwerke“ vor. Von 1986 bis 1991 war er Geschäftsführer eines Unternehmens, das sich auf die Motorüberholung und die Herstellung von Spezialmotoren und Motorteilen spezialisiert hat.



1991 wechselte Andreas Gebhardt als Geschäftsführer zum LBBZ-NRW, einem Dienstleistungszentrum in Nordrhein-Westfalen für den Einsatz der lasergestützten Materialbearbeitung, wo er ab 1992 mit dem Rapid Prototyping begann.

1997 wurde die CP-GmbH (Center of Prototyping GmbH) in Erkelenz/Düsseldorf gegründet, in die Andreas Gebhardt als Geschäftsführer wechselte. Die CP-GmbH ist ein Dienstleistungsunternehmen für Rapid Prototyping und fertigt Prototypen aus Kunststoffen und Metallen als Unikat oder in Kleinserie. Vom 3D-CAD über additive Produktionseinheiten bis hin zur Werkzeugfertigung verfügt die CP-GmbH über alle Elemente einer vollständig geschlossenen additiven Fertigungskette.

Die praktischen Erfahrungen mit der CP-GmbH bilden das professionelle Rückgrat für den Inhalt dieses Buches.

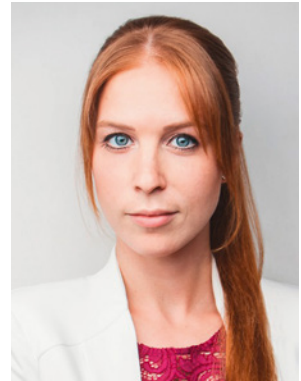
Im Sommersemester 2000 wurde Andreas Gebhardt zum Professor für Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing an der Fachhochschule Aachen ernannt. Dort leitete er im Rahmen des „GoetheLab for Additive Manufacturing“ an der Fachhochschule Aachen eine Forschergruppe, die sich mit dem Lasersintern von Metallen (L-PBF-Verfahren), dem Polymerdruck, dem 3D-Druck (Pulver-Binder-Verfahren), dem Extrusionsverfahren (FDM) und der Anwendung verschiedener Materialien beschäftigte. Zum GoetheLab gehört auch der

weltweit erste „Technology Bus“, ein Rolllabor im Doppeldecker-Bus, genannt „Fab-Bus“. Seit dem Wintersemester 2000 ist Andreas Gebhardt Gastprofessor am City Collage College der City University of New York. Im Herbst 2014 wurde er zum Professor „Extraordinaire“ an der Tshwane University of Technology, TUT, in Pretoria, Südafrika ernannt.

Seit 2004 ist Andreas Gebhardt Herausgeber des RTeJournal (www.rtejournal.de), einer „Open Access Peer Review“-Online-Zeitschrift über Rapid Technology.

Dr.-Ing. Julia Kessler schloss ihr Studium als Bachelor für Biomedizintechnik und als Master für Produktentwicklung an der Fachhochschule Aachen ab.

Von 2012 bis 2015 war sie wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Forschungsgruppe GoetheLab for Additive Manufacturing der Fachhochschule Aachen. Von 2015 bis 2017 leitete sie das GoetheLab-Team, das sich mit der Additiven Fertigung von Metallen, Kunststoffen und Keramiken beschäftigt. Julia Kessler beschäftigte sich intensiv mit dem Konzept eines Studiengangs für die digitale Zahntechnik und eines Forschungsprojektes zur Kieferknochenaugmentation durch Additive Fertigung.



In Zusammenarbeit mit *Laura Thurn* initiierte und realisierte sie das Projekt „Fab-Bus“, ein mobiles 3D-Drucklabor. Auch die Realisierung des Online-Moduls „Additive Manufacturing/3D Printing“ wurde von Julia Kessler und Laura Thurn gemeinsam entwickelt. Im Rahmen ihrer Promotion beschäftigte sich Julia Kessler mit der Strukturoptimierung und der Additiven Fertigung von bionischen Gitterstrukturen aus Titan und Edelstahl sowie neuen Anwendungsgebieten für diese Konstruktionselemente.

Im Oktober 2017 legte sie ihre Doktorprüfung erfolgreich ab. Im Jahr 2015 wurde Julia Kessler zur Geschäftsführerin der IwF GmbH (Institut für Werkzeuglose Fertigung) ernannt, die der Fachhochschule Aachen in Form eines An-Instituts angegliedert ist. Die IwF GmbH unterstützt Industriepartner insbesondere bei der Optimierung und Gestaltung der gesamten Prozesskette im Bereich der Additiven Fertigung. Kundenorientierte Forschung und Entwicklung, praxisnahe Schulungen und individuelle Beratung gehören zu den Kernkompetenzen der IwF GmbH. Seit Juni 2019 durchläuft Frau Kessler das Programm „Karriereweg FH Professur“ an der Hochschule Niederrhein am Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Alexander Schwarz (PhD Student) hat nach Abschluss seiner Ausbildung zum technischen Assistenten für Werkstoffkunde und Metallographie zunächst seinen Bachelor of Engineering im Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Entwicklung und Konstruktion und im Anschluss seinen Master of Engineering in der Fachrichtung Produktentwicklung mit der Vertiefung konstruktiver Maschinenbau an der Fachhochschule Aachen absolviert. Parallel zum Master absolvierte er die Weiterbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur (SFI) an der SLV in Duisburg.



Von 2012 bis 2016 war Alexander Schwarz Mitarbeiter im „Lehrgebiet für Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing“ von Professor Andreas Gebhardt an der FH Aachen. Dort war er verantwortlich für die metallische Additive Fertigung und die konstruktive Umsetzung neuer Gestaltungsmöglichkeiten. Zusätzlich übernahm er als Dozent die Lehrveranstaltung Rapid Prototyping.

Seit Ende des Jahres 2016 leitet er bei der IwF GmbH die Konstruktion und ist zusätzlich verantwortlich für die Durchführung von Schulungen und Seminaren. Schwerpunktmäßig beschäftigt er sich mit dem Laserstrahlschmelzen und der Auslegung von Bauteilen hierfür.

Im Rahmen seiner Promotion beschäftigt sich Herr Schwarz mit neuen Gestaltungsmöglichkeiten zum Schweißen additiv hergestellter Bauteile und ihren Anwendungsgebieten.

Prasanna Rajaratnam, M.Sc., SFI studierte an der Fachhochschule Aachen und hat einen Bachelor in Maschinenbau mit der Vertiefung Fertigungsverfahren und einen Master in Industrial Engineering absolviert. Er arbeitet seit 2012 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing. Seit 2014 ist er als Projektingenieur im GoetheLab for Additive Manufacturing an der Fachhochschule Aachen. Die Forschergruppe beschäftigt sich anwendungsorientiert mit der Additiven Fertigung von Metallen, Kunststoffen und Keramiken.



Seine Arbeiten umfassen auch werkstoffkundliche Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit der Metallwerkstoffe und zu den mechanisch-technologischen Verhalten der gedruckten Bauteile im Hinblick auf ihre Verwertbarkeit als Produkte.

Prasanna Rajaratnam ist seit 2014 zudem in der Forschergruppe „Aachener Zentrum für 3D-Druck“, einer Kooperation der Fachhochschule Aachen und dem Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT), tätig. Der Fokus dieser Kooperation liegt darin, kleinen und mittleren Unternehmen den Einstieg in die Additive Fertigung entlang der gesamten additiven Wertschöpfungskette zu erleichtern und dabei zu unterstützen.

Aktuell befasst sich Prasanna Rajaratnam fachlich und im Rahmen seiner Promotion mit der Prozessführung von Vergütungsstählen im L-PBF-Prozess und neuen Anwendungsbereichen der AM-Fertigungstechnologie.

Simon Scheuer

Simon Scheuer, M. Eng. SFI, startete seine berufliche Karriere mit einer Ausbildung zum Werkzeugmechaniker in der Automobilzuliefererindustrie. Anschließend studierte er an der Fachhochschule Aachen im Bachelor Maschinenbau mit der Vertiefung Konstruktion und Entwicklung und erweiterte diesen durch einen Masterabschluss in der Produktentwicklung.

Seit 2013 arbeitete er am Lehrstuhl für Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing und wurde im „GoetheLab for Additive Manufacturing an der Fachhochschule Aachen“ von März 2015 bis Februar 2017 als Projektingenieur eingestellt. Die Forschergruppe beschäftigt sich anwendungsorientiert mit der Additiven Fertigung von Metallen, Kunststoffen und Keramiken. Der Fokus seiner Arbeiten lag dabei auf der Konstruktion und Konstruktionsautomatisierung, Simulation und Additiven Fertigung von Metallen.

Im März 2017 wechselte er in die Industrie zur Overath Gruppe, die auf die Verarbeitung von Partikelschäumen spezialisiert ist. Dort hat er zuerst als Entwicklungsingenieur gearbeitet, bevor er Konstruktions- und Entwicklungsleiter wurde. Hier befasst er sich mit der Fertigung von additiv hergestellten Werkzeugen.



Inhalt

Vorwort	V
Danksagung	VII
Die Autoren	IX
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung für das Buch	2
1.2 Einordnung der additiven Fertigungsverfahren	4
1.3 Marktsituation	6
1.4 Anwendungsgebiete	8
1.5 Potenziale der Additiven Fertigung	15
1.5.1 Komplexe Geometrien	17
1.5.2 Leichtbau	18
1.5.3 Funktionsintegration	19
1.5.4 Ressourcenschonung	21
1.5.5 Losgrößen	22
1.5.6 Materialvielfalt	23
1.5.7 Individualisierung und Personalisierung	24
1.6 Schlussfolgerung	27
1.7 Historie der Produktgestaltung	28
1.8 Herausforderungen für Konstrukteure	31
1.8.1 Leichtbau & Ressourceneffizienz	32
1.8.2 Funktionsintegration	33
1.8.3 Reduktion des Montageaufwandes	34
1.8.4 Leistungssteigerung	34
1.9 Anwendungsbeispiele	35
1.9.1 Luft- und Raumfahrt	36
1.9.1.1 Airbus - Armlehne	37

1.9.1.2	Premium AEROTEC – Vent Bend	38
1.9.1.3	General Electric – Einspritzdüse	39
1.9.2	Automotiv	40
1.9.2.1	BMW i8 – Verdeckhalterung	40
1.9.2.2	Ford – Ansaugstutzen	40
1.9.2.3	APWORKS – Light Rider	41
1.9.3	Werkzeugbau	42
1.10	Ausblick Produktgestaltung	43
2	Additive Fertigung	45
2.1	Historie der Additiven Fertigung	48
2.2	Übersicht der additiven Fertigungsverfahren	52
2.2.1	Polymerisation	53
2.2.1.1	Stereolithographie	55
2.2.1.2	Polymerdruckverfahren und Thermojet-Drucken (Polymer Jetting)	55
2.2.1.3	HP Multi Jet Fusion	57
2.2.2	Lasersintern und Laserschmelzen	58
2.2.2.1	Lasersintern/Selektives Lasersintern (LS – SLS)	58
2.2.2.2	Laserschmelzen/Selektives Laserschmelzen (SLM)	61
2.2.2.3	Elektronenstrahl-Schmelzen	62
2.2.3	Layer Laminated Manufacturing	63
2.2.3.1	Laminated Object Manufacturing	63
2.2.3.2	Selective Deposition Lamination (SDL)	65
2.2.3.3	LLM Maschinen für Metallteile	66
2.2.3.4	Bauteile aus Metalllamellen – Laminated Metal Prototyping	66
2.2.4	3D-Drucken	66
2.2.4.1	Metall- und Formsand-Printer – ExOne	69
2.2.5	Extrusion/Fused Layer Manufacturing	70
2.2.5.1	Fused Deposition Modeling (FDM)	71
2.3	Materialvielfalt	73
2.3.1	Werkstoffe für die Stereolithographie	74
2.3.2	Werkstoffe für das Polyjetverfahren	74
2.3.3	Werkstoffe für das Pulver-Binderverfahren	75
2.3.4	Werkstoffe für das Lasersintern	75
2.3.5	Werkstoffe für das FLM-Verfahren	76
2.4	Gestaltungsgrundlagen	77
2.4.1	Normung und Standardisierung	78
2.4.2	Prozesseinfluss auf die Konstruktion	80

3	Lasert Powder Bed Fusion	85
3.1	Prozessgrundlagen	85
3.1.1	Prozessablauf	88
3.1.2	Prozessparameter	89
3.1.3	Herausforderungen und Prozessgrenzen	96
3.1.4	Post-Processing	100
3.1.5	Prozessgrenzen	101
3.2	Materialien	108
3.2.1	Pulverwerkstoffe	108
3.2.1.1	Stähle	108
3.2.1.2	Aluminium	109
3.2.1.3	Titan	110
3.2.1.4	Nickelbasislegierungen	111
3.2.2	Pulverherstellung	111
3.2.3	Werkstoffqualifizierung	113
3.2.4	Werkstoffprüfung	114
3.2.5	Werkstoffkennwerte	116
3.2.6	Werkstoffkosten	117
3.3	Anlagenüberblick	119
3.3.1	Universalanlagen	122
3.3.2	Kleine Anlagen	124
3.3.3	Große Anlagen	127
3.3.4	Low-Cost-Anlagen	130
3.3.5	Integrierte Fertigungssysteme	131
4	Bauteilgestaltung für den L-PBF-Prozess	137
4.1	Grundlegende Konstruktionshinweise	137
4.1.1	Systematische Unterschiede in Konstruktion	139
4.1.2	Modelltypen und Datenformat	141
4.1.2.1	STL-Datenformat	143
4.1.2.2	AMF-Datenformat	148
4.2	Oberflächenstrukturen	150
4.2.1	Oberflächen	150
4.2.2	Standardoberfläche	152
4.2.3	Erzeugungsmethoden	154
4.2.3.1	Konstruktion mittels Vorlage (Einheitszelle)	154
4.2.3.2	Konstruktion mittels Visual Basic for Application (VBA)	158
4.2.4	Anwendungsbeispiele	161
4.3	Gitterstrukturen	163
4.3.1	Einteilung von Gitterstrukturen	166
4.3.2	Randbedingungen	168

4.3.3	Vorgehensweisen und Anwendungsbeispiele	170
4.3.3.1	Anwendungsbeispiele	170
4.3.3.2	Systematik für den Einsatz von Gitterstrukturen	175
4.3.4	Zusammenfassung	197
4.4	Topologieoptimierung	198
4.4.1	Randbedingungen	199
4.4.2	Auslegung	200
4.4.3	Vorgehensweise und Anwendungsbeispiele	200
4.4.4	Topologieoptimierung mit Startgeometrie	202
4.4.5	Topologieoptimierung mittels „Generative Design“	205
4.5	Funktionsintegration	207
4.5.1	Anwendungsbeispiele Kühlung	208
4.5.1.1	Auslegung von Kühlkanälen	211
4.5.1.2	Konstruktion einer Flächenkühlung	214
4.5.1.3	Konstruktion einer Parallelkühlung	216
4.5.2	Bewegliche Baugruppen	218
4.5.3	Anwendungsbeispiele bewegliche Baugruppen	219
4.5.4	Monolithische Bauweisen	221
4.6	Stützstrukturen und Orientierung im Bauraum	224
4.6.1	Einteilung	224
4.6.2	Randbedingungen	228
4.6.3	Auslegung	229
4.6.4	Vorgehensweisen und Anwendungsbeispiele	232
5	Nachbearbeitung	239
5.1	Wärmebehandlung	241
5.2	Grobbearbeitung	242
5.2.1	Trennung der Bauteile von der Plattform	242
5.2.2	Entfernung von Supportstrukturen	243
5.2.3	Spanende Nachbearbeitung	245
5.3	Feinbearbeitung	247
5.3.1	Nachbearbeitung von Supportoberflächen	248
5.3.2	Strahlen	250
5.3.3	Gleitschleifen	251
5.3.4	Polieren	253
6	Schlussfolgerung und Ausblick	255
6.1	Schlussfolgerung	255
6.2	Ausblick	256
Index		263

1

Einleitung

Die zunehmende Globalisierung ist ein treibender Faktor für technologischen Fortschritt und Innovationen. Hierdurch ergeben sich stetig Möglichkeiten zur Erschließung neuer Märkte bei sich gleichzeitig entwickelnder Konkurrenz. Um die Beständigkeit und Wirtschaftlichkeit auf den Märkten zu gewährleisten, sind kontinuierliche technologische Neuentwicklungen sowie Alleinstellungsmerkmale unabdingbar. Diese tragen zu innovativen Lösungsansätzen in unterschiedlichen Technologiefeldern bei.

Eine schon lange bestehende Technologie im Bereich der Fertigungsprozesse ist die Additive Fertigung (AF), oft auch unter dem Synonym 3D-Druck zusammengefasst. Hierbei handelt es sich nicht um die klassischen subtraktiven, das heißt abtragenden Fertigungsprozesse wie Drehen, Fräsen, Gießen oder Schmieden, sondern um Schichtbauverfahren, die durch das Auftragen von Material die Herstellung komplexer Geometrien und innerer Strukturen ermöglichen. Die Additive Fertigung soll zukünftig eine wichtige Rolle als Schlüsseltechnologie einnehmen, insbesondere im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und einer zunehmend individualisierten Produktion.

Um die Potenziale dieser Fertigungstechnologie vollständig auszuschöpfen, bedarf es eines tiefgründigen Wissens über die gesamte Prozesskette, von der Vor- und Nachbearbeitung, über die Fertigung, das Datenhandling und die verfügbaren Materialien und Maschinen.

Das Zusammenwirken verschiedener Einflussfaktoren spielt eine besonders große Rolle bei der Entstehung qualitativ hochwertiger und additiv gefertigter Bauteile. Den Grundstein liefern virtuelle, dreidimensionale, rechnerunterstützte Modelle, aus denen die physischen Bauteile generiert werden. Der Umgang mit 3D-Konstruktionsprogrammen und die Erstellung von 3D-Modellen sind somit die Voraussetzung zur eigenständigen Anwendung der additiven Fertigungstechnologien.

Aktuell verfügbare Softwareanwendungen zur Erstellung dreidimensionaler Modelle haben oftmals eine Schwäche. So können zum Beispiel wichtige Informationen wie die Zuordnung von Materialeigenschaften oder die Festkörpersimulation mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) nicht dargestellt beziehungsweise

umgesetzt werden. Zusätzliche Softwarelösungen müssen angewendet werden, die wiederum die 3D-Daten anders interpretieren und Kompatibilitätsprobleme zur Folge haben. Es kommt zu enormen Zeitverlusten, weil die virtuellen AF-Modelle angepasst werden müssen, zu einer nutzerunfreundlichen Handhabung und zu großen Fehlerquellen. Eine Automatisierung der additiven Prozessketten, die besonders aus industrieller Sicht unabdingbar ist, kann dadurch nicht oder nur schwer realisiert werden. Ein Lösungsansatz könnte durch integrierte Softwarelösungen geschaffen werden, um die Additive Fertigung im Rahmen einer automatisierten Serienproduktion einsetzen zu können.

Für den intuitiven Umgang mit Modellierungswerkzeugen werden Ansätze wie die generative Modellierung beforscht und sind zum Teil bereits auf dem Markt erhältlich. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass intuitivere Mensch-Computer-Schnittstellen notwendig sind, um es privaten Nutzern zu ermöglichen, 3D-Modelle für den 3D-Druck zu konstruieren oder anzupassen. Obwohl die Mehrzahl der privaten Anwender den Umgang mit IT gewohnt ist, stellt sie der Umgang mit 3D-Daten vor eine große Herausforderung – insbesondere, wenn es sich um technische Konstruktionen handelt.

Um die Potenziale der AF bestmöglich nutzen zu können, müssen Benutzerschnittstellen entwickelt und die Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen und Produkten vereinfacht werden. Dieses Buch leistet einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses im Umgang mit Designrichtlinien und Möglichkeiten zur Herstellung additiver Bauteile.

■ 1.1 Zielsetzung für das Buch

Dieses Buch zielt darauf ab, Einsteigern und Anwendern im Technologiefeld Additive Fertigung ein grundlegendes und zugleich detailliertes Fachwissen zur Gestaltung von Bauteilen zu liefern. Konstrukteuren und Anwendern fehlt es aktuell häufig an einem tiefgründigen Erfahrungsschatz zur Ausschöpfung der konstruktiven Potenziale von additiven Fertigungsverfahren. Daher richtet sich dieses Buch an all diejenigen, die sich für die hochtechnologischen Fertigungsverfahren, ihre Möglichkeiten und Grenzen bis hin zur optimalen und qualitativ anspruchsvollen Bauteilgestaltung interessieren.

Dabei greift das Buch besonders die folgenden Themenschwerpunkte auf:

- Einordnung der additiven Fertigungsverfahren und Übersicht
- Potenziale der Additiven Fertigung
- Entwicklung der Bauteilgestaltung und -auslegung
- Herausforderungen und Chancen für Konstrukteure

- Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)-Verfahren und die dadurch bedingte besondere Gestaltung von Bauteilen

Dieses Buch dient dazu, Leserinnen und Lesern die Designregeln der Additiven Fertigung und die zur Fertigung eines Qualitätsbauteils benötigten Parameter verständlich und einfach zu erläutern. Zu Beginn werden die additiven Fertigungsverfahren in den Gesamtkontext eingeordnet und anschließend deren Potenziale aufgezeigt. Neben der Entwicklung der Bauteilgestaltung sind die derzeitigen Herausforderungen für Konstrukteure ein wesentlicher Schwerpunkt dieses Buches. Die Besonderheit dieses Buches liegt darin, dass die laserbasierten Pulverbettverfahren zur Verarbeitung metallischer Werkstoffe in Abschnitt 3.2 „Materialien“ im Fokus liegen. Begründen lässt sich dies durch die steigende Entwicklung metallischer Produkte und der dazugehörigen Anlagen sowie der Tatsache, dass metallische Werkstoffe unter dem Gesichtspunkt der Produktgestaltung und den Potenzialen Leichtbau und Topologieoptimierung besser geeignet sind als kunststoffbasierte Werkstoffe.

Wie bei anderen Fertigungsverfahren gilt auch für die Additiven Verfahren, dass der Anwender bestimmte Konstruktionsregeln befolgen muss, um die Potenziale vollständig auszunutzen. Hierfür bedarf es jedoch eines grundlegenden Verständnisses über die Prozesstechnik, das Zusammenspiel von Anlagen und Materialien, der Möglichkeiten und Grenzen der Verfahren sowie der optimale Auslegung von Bauteilen in der Konstruktion. Dieses Grundverständnis soll anhand dieses Buches vermittelt werden.

Da dieses Arbeitsfeld verhältnismäßig jung ist und es sich noch in der Entwicklungsphase befindet, fehlt ein abgeschlossener Konstruktionsleitfaden, wie er für Gießen oder Fräsen vorliegt. Dennoch wurden bereits einige Designrichtlinien definiert, mit deren Hilfe die Fertigung und der Gebrauch von additiv gefertigten Bauteilen in optimaler Weise erfolgen können. Viele dieser Gestaltungsempfehlungen wurden durch Forschungsarbeiten entwickelt und im Rahmen von Abschlussarbeiten und Dissertationen veröffentlicht. Auf dieser Grundlage aufbauend haben verschiedene Gremien begonnen, Richtlinien und Normen zu erarbeiten. In Deutschland werden die Arbeiten vom VDI Fachausschuss FA 105 „Additive Manufacturing“ und dort vom Unterausschuss FA 105.3 „Additive Manufacturing – Konstruktionsempfehlungen“ vorangetrieben. Diese Ergebnisse sind durch das DIN an internationale Gremien weitergereicht worden, sodass bereits die deutsche VDI Richtlinie 3405 – Blatt 3 in den internationalen Normen DIN EN ISO 52911-1 und DIN EN ISO 52911-2, die momentan als Entwurf vorliegen, übernommen worden ist. Eine Besonderheit bei diesen Normen stellt die Tatsache dar, dass sie sowohl ISO- als auch ASTM-Normen sind und somit in beiden Geltungsbereichen gültig sind¹⁾.

¹⁾ (Weitere Informationen zu den Arbeiten des Fachausschusses 105 – Additive Manufacturing und den entsprechenden Unterausschüssen: <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/produktion-und-logistik/fachbereiche/produktionstechnik-und-fertigungsverfahren/fa105-fachausschuss-additive-manufacturing/>)

Dieses Buch trägt dazu bei, Haupteinflüsse und Besonderheiten, die sich bei der Konstruktion, Herstellung und dem zu verwendenden Material für additive Fertigungsverfahren erheblich von traditionellen Methoden unterscheiden, zu identifizieren und zu erörtern. Die Ausführungen sollen dem Leser und Anwender mögliche Probleme, die bei der Erstellung von qualitativ hochwertigen Bauteilen auftreten können, näherbringen. Die Ausführungen sind exemplarisch, erheben also keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

■ 1.2 Einordnung der additiven Fertigungsverfahren

Unter einem additiven Fertigungsverfahren (AF) versteht man einen automatisierten Prozess zur Herstellung maßstablicher dreidimensionaler physischer Objekte, die unmittelbar aus einem 3D-CAD-Datensatz (computer-aided design) generiert werden. Er basiert auf dem Schichtbauprinzip und benötigt keine bauteilabhängigen Werkzeuge wie beispielsweise einen Fräser oder Bohrer. Die Bauteile entstehen durch Auf- und Aneinanderfügen von Volumenelementen (sogenannten Voxeln). Ursprünglich wurde dieses Verfahren als „Rapid Prototyping“ bezeichnet, wie es auch heute noch häufig genannt wird. Zusammen mit den „Subtraktiven Fertigungsverfahren“, wie Fräsen oder Drehen, und den „Formativen Fertigungsverfahren“, wie Gießen oder Schmieden, stellen „additive Fertigungsverfahren“ die dritte Säule der gesamten Fertigungstechnologie dar [Bur1993].

Die Begriffe „Rapid Prototyping“ oder „Generative Herstellung“, die im Jahr 1987 entstanden, als die ersten Ansätze für „additive Fertigungsverfahren“ auf den Markt kamen, sind heute noch geläufig. Dennoch wurden in den folgenden Jahren viele abweichende Namen präsentiert und häufig weitere hinzugefügt (zum Beispiel Desktop Manufacturing, Freeform Manufacturing usw.). Obwohl jede der Bezeichnungen aus dem besonderen Blickwinkel der Erfinder als perfekt betrachtet wird, rufen viele von ihnen Verwirrung hervor. Dies ist oft einer der Gründe, warum sich besonders Neulinge in dem Technologiefeld der Additiven Fertigung schwer zurechtfinden.

Der englische Begriff zur deutschsprachigen Ausführung „additive Fertigungsverfahren“ ist Additive Manufacturing (abgekürzt und häufig genannt: AM). Dieser Begriff wurde von der internationalen Standardisierungsorganisation ASTM und ISO (ISO/ASTM Standards [ISO/ASTM 52900:2015]) wie folgt definiert: „Additive Manufacturing is a process of joining materials to make objects from three-dimensional (3D) model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies. As a new tool in the entrepreneurial toolbox, additive

manufacturing systems use computer-aided design models (CAD) and 3D scanning systems for production.“ Im Rahmen einer Zusammenarbeit der Normungsorganisationen ISO und ASTM sind bereits gemeinsame Standards für die Additive Fertigung eingeführt. Die deutsche Bezeichnung ist durch die VDI Richtlinie VDI 3405 [VDI 3405] genormt.

3D Printing, im Deutschen 3D-Drucken, verdrängt zurzeit alle anderen Bezeichnungen. Das liegt vor allem daran, dass dieser Begriff sehr einfach zu vermitteln ist. Es zeichnet sich heute schon ab, dass ungeachtet gültiger Normen der Begriff 3D-Drucken in wenigen Jahren als generische Bezeichnung für alle automatisierten Schichtbauverfahren und die Bezeichnung 3D-Drucker oder 3D Printer weltweit akzeptiert sein werden.

Dennoch gilt hier, die Verwechslung von 3D-Drucken und 3D Printing als generische Begriffe mit dem gleichnamigen Pulver-Binder-Verfahren zu vermeiden.

Um die additiven Fertigungsverfahren und deren Bezeichnungen besser einordnen zu können, folgt in Tabelle 1.1 eine Auswahl häufig benutzter Begriffe, die einer ganzen Gruppe mit ihnen einhergehender Schlüsselbegriffe zugeordnet sind.

Tabelle 1.1 Gängige Bezeichnungen

Bezeichnung	Erläuterung
„additiv“	3D-Drucken (3D Printing), additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing, AM), Schichtbauverfahren (Additive Layer Manufacturing, ALM), Direkte Additive Fertigung (Additive Digital Manufacturing, DM)
„Schicht“ (Layer)	Schichtbauverfahren (Layer Manufacturing, Layer Based Manufacturing), Schichtorientierte Fertigungsverfahren (Layer Oriented Manufacturing)
„schnell“ (Rapid)	Schnelle additive Fertigungsverfahren (Rapid Technology), additive Herstellung von Modellen und Prototypen (Rapid Prototyping), additive Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen (Rapid Tooling), additive Herstellung von Produkten (Rapid Manufacturing)
„digital“	Direkte additive Herstellung von Produkten (Digital Fabrication), additive Herstellung von Konzeptmodellen zur Visualisierung (Digital Mock-Up)
„direkt“ (direct)	Direkte additive Herstellung von Produkten (Direct Manufacturing), Direkte additive Herstellung von Werkzeugen, Werkzeugeinsätzen, Lehren, Formen (Direkt Tooling)
3D	Dreidimensional

Darüber hinaus gibt es alle möglichen (und sogar zunächst unvorstellbaren) Kombinationen dieser Schlüsselbegriffe.

Einige dieser Begriffe unterliegen dem Copyright-Schutz!

Außerdem sind zusätzliche Begriffe in Gebrauch, die im Zusammenhang mit neuen und innovativen Herstellungsverfahren gebildet wurden, wie

- Desktop Manufacturing (Herstellung im Büro/auf dem Schreibtisch)
- On-Demand Manufacturing (Herstellung nach individueller Anforderung)
- Freeform Manufacturing (Herstellung von Bauteilen mit beliebigen Freiformflächen)

Da immer viel Zeit verstreicht, bis neu definierte Begriffe allgemein akzeptiert werden, ist nach wie vor eine große Vielfalt verschiedener Begriffe, vermehrt durch Marken- und von Herstellern propagierte Bezeichnungen, in Gebrauch; manchmal sogar in gegenseitiger Konkurrenz.

■ 1.3 Marktsituation

Die Marktsituation der Additiven Fertigung hat sich in den letzten Jahren drastisch verändert. Wenn auch aktuell keine verlässlichen Marktabschätzungen vorliegen, werden einige Studien zur Abschätzung durchgeführt. Eine im Jahr 2016 durchgeführte Studie hat über 900 Unternehmen aus zwölf Ländern zur additiven Fertigungstechnologie befragt. Das Ergebnis zeigte, dass bereits 24% aller Unternehmen diese Technologie in ihrer strategischen Unternehmensausrichtung als wichtig betrachten. Besonders die Deutschen Unternehmen nehmen mit 37% einen großen und führenden Anteil bei der Erfahrung mit Additiver Fertigung ein. Weitere 12% ziehen eine Einführung für die Zukunft in Betracht (EY's Global 3D printing Report 2016). Besonders für AF-Güter, wie 3D-Drucker, Material, Zubehör und Software sowie Dienstleistungen, die zur Herstellung von additiv gefertigten Produkten genutzt werden, lässt sich eine positive Entwicklung erkennen, siehe Bild 1.1. So ist der globale Umsatz durch den Verkauf von Gütern und Dienstleistungen im Bereich AF in den Jahren 2014 bis 2018 um das Dreifache, von 4,1 auf 12,74 Milliarden US\$, gestiegen. Der geschätzte Wert des globalen Umsatzes für 2020 liegt bei 21,20 Milliarden US\$.

Laut aktuellen Zahlen (Ende 2018) des amerikanischen Forschungsunternehmens SmarTech Publishing hat der Markt der Additiven Fertigung im Jahr 2018 9,3 Milliarden US\$ erwirtschaftet, was einem Anstieg von 18% im Vergleich zum Vorjahr 2017 entspricht Bild 1.2. Diese Umsätze beinhalten den Maschinen-, Software-, Material- und Dienstleistungsanteil. Allein die deutschen Unternehmen setzen bereits hochgerechnet knapp eine Milliarde Euro mit Produkten aus 3D-Druck um. Das Unternehmen ist in seinen Prognosen noch einen Schritt weiter gegangen: Bis 2027 soll der Markt 41 Milliarden US\$ übersteigen.

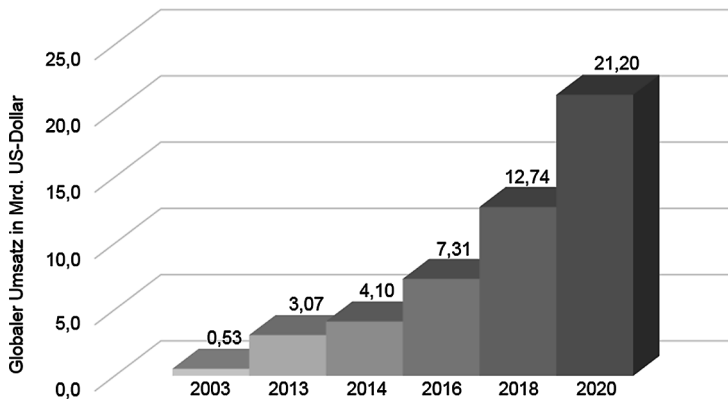


Bild 1.1 Globaler Umsatz durch den Verkauf von Gütern und Dienstleistungen im Bereich der Additiven Fertigung

(Quelle: Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0; Studie „Additive Fertigungsmethodik“, Daten aus EFI 2015, Wohlers 2015)

Marktgröße der Additiven Fertigung, Einteilung nach Technologien (nur professionelles Umfeld)

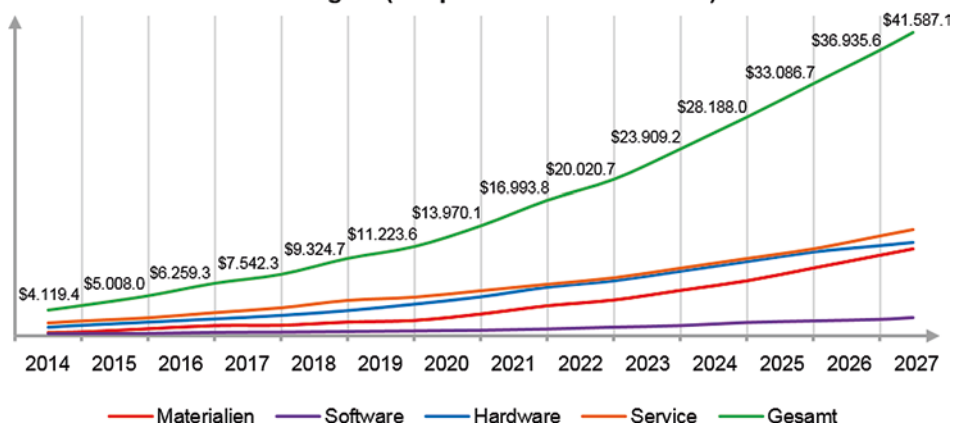


Bild 1.2 Entwicklung Additive Fertigung der Jahre 2014 bis 2027

(Quelle: <https://www.3dnatives.com/de/additive-fertigung-im-jahr-2018-241220181/>)

Der globale Markt für Additive Fertigung wächst stark, unabhängig von den unterschiedlichen Sektoren und Anwendungen der Technologie. Es ist unschwer zu erkennen, dass Luft- und Raumfahrt, Gesundheits- und Automobilwesen weiterhin die Schlüsselmärkte bleiben werden und dass Konsumgüter und der Energiebereich zunehmende Bedeutung auf dem Markt haben werden.

■ 1.4 Anwendungsgebiete

Dieser Abschnitt befasst sich im Allgemeinen mit den Anwendungsgebieten und Industriezweigen der Additiven Fertigung. In Abschnitt 1.8 „Herausforderungen für Konstrukteure“ werden die Anwendungsbereiche unter dem Aspekt Herausforderungen für den Konstrukteur in Bezug auf das Produktdesign näher betrachtet. Vorab soll der Leser eine Übersicht über die aktuellen Branchen, in denen die Additive Fertigung bereits ihren Einzug gefunden hat, erhalten. Die im Folgenden aufgeführten Beispiele (Bilder 1.3 bis 1.15) unterstreichen die Tatsache, dass keine starre Verbindung zwischen einer spezifischen Anwendung oder einer Branche und einem besonderen additiven Fertigungsprozess existiert. In der Praxis gibt es folglich meist mehrere miteinander konkurrierende und alternativ anwendbare Prozesse. Häufig müssen indirekte oder sekundäre AF-Prozesse zur Erzielung der gewünschten Ergebnisse nachgeschaltet werden.

Die Auswahl der Beispiele erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie ist auch nicht als ausschließlich anzusehen, da sie vermutlich weder die optimale noch die einzig mögliche Lösung darstellt. Da nahezu jeder Industriezweig additive Fertigungsprozesse einsetzt, wird nicht jede einzelne Branche erwähnt. Die Erörterung der Beispiele in diesem Abschnitt kann als phänomenologische Herangehensweise an die Anwendungen der Additiven Fertigung betrachtet werden.

Branche: Automobilindustrie und Zulieferer

Anwendungsbeispiel: Automobilindustrie – Interieur



Bild 1.3 Innenraumbelichtung; Designvarianten; Stereolithographie und RTV mit Einbauteilen (Quelle: CP-GmbH)

Branche: Automobilindustrie und Zulieferer

Anwendungsbeispiel: Automobilindustrie – Exterieur



Bild 1.4 Modifizierter Frontspoiler für eine Fahrzeugsonderedition; Laser-Stereolithographie, RTV und Polieren, Lackierung
(Quelle: CP-GmbH)

Branche: Luftfahrtindustrie

Anwendungsbeispiel: Heißluftkanal für eine Luftfahrtturbine



Bild 1.5 Heißluftkanal für eine Luftfahrtturbine, 3D Printing (Metall), Nachbehandlung
(Quelle: FhG-IFAM/Airbus)

Branche: Medizintechnik

Anwendungsbeispiel: Individualisierte Hüftpfanne

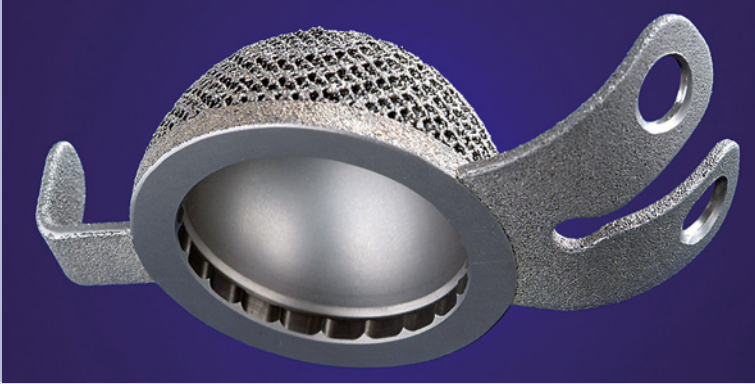


Bild 1.6 Individualisierte Hüftpfanne, SLM – Titan
(Quelle: Fraunhofer ILT)

Branche: Architektur und Design

Anwendungsbeispiel: Modell Aachener Dom



Bild 1.7 Modell des Aachener Doms
(Quelle: GoetheLab for Additive Manufacturing, Fachhochschule Aachen/IwF GmbH)

Branche: Elektrotechnik- und Elektronikindustrie
Anwendungsbeispiel: Schaltungsträger

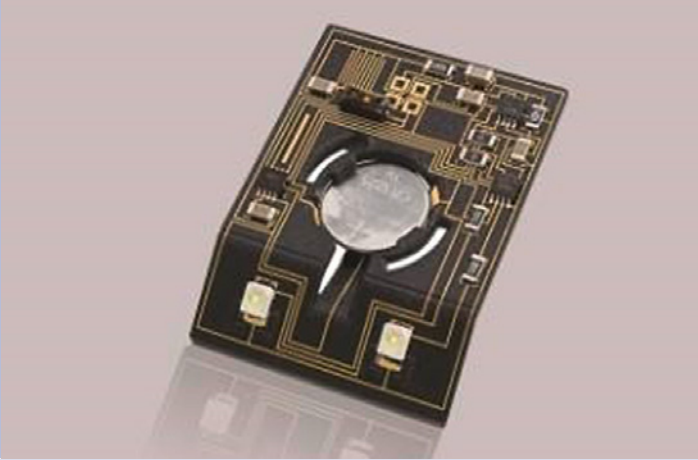


Bild 1.8 Bestückter und damit funktionsfähiger Schaltungsträger, der mittels Additiver Fertigung aus PA 3200 GF hergestellt wurde (Quelle: Beta LAYOUT)

Branche: Nahrungsmittelindustrie
Anwendungsbeispiel: Tortendekoration



Bild 1.9 Bild einer fertigen Torte, deren Strukturen mithilfe von einem 3D-Drucker entstanden sind (Quelle: 3D-grenzenlos)

Branche: Spielwarenindustrie
Anwendungsbeispiel: Kürbis-Spinne



Bild 1.10 Kürbis-Spinne aus dem 3D-Drucker
(Quelle: Megawillbot Designs)

Branche: Formenbau (Rapid Tooling)
Anwendungsbeispiel: Bionisch optimierter Halter



Bild 1.11 Bionisch optimierter Halter für das Crew Rest Compartment im Airbus A350 XWB
(Quelle: Airbus)