

HANSER



Leseprobe

zu

„Produktgestaltung für die Additive Fertigung“

von Andreas Gebhardt et al.

Print-ISBN: 978-3-446-45285-5

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45285-5>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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.

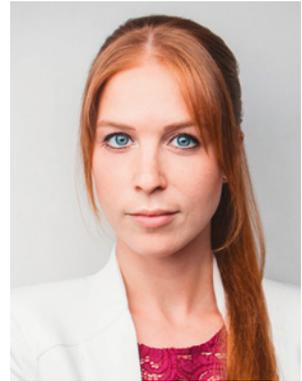
Im Sommersemester 2000 wurde Andreas Gebhardt zum Professor für Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing an der Fachhochschule Aachen ernannt. Dort leitete er im Rahmen des „GoetheLab for Additive Manufacturing“ an der Fachhochschule Aachen eine Forschergruppe, die sich 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

Branche: Medizintechnik

Anwendungsbeispiel: Individualisierte Hüftpfanne

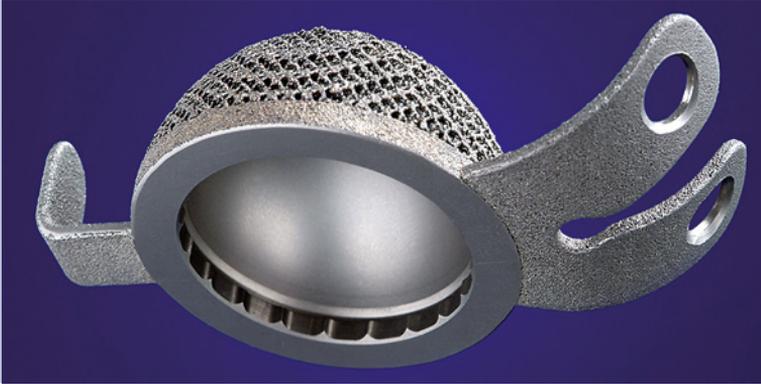


Bild 1.6 Individualisierte Hüftpfanne, SLM – Titan
(Quelle: Fraunhofer ILT)

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: 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)

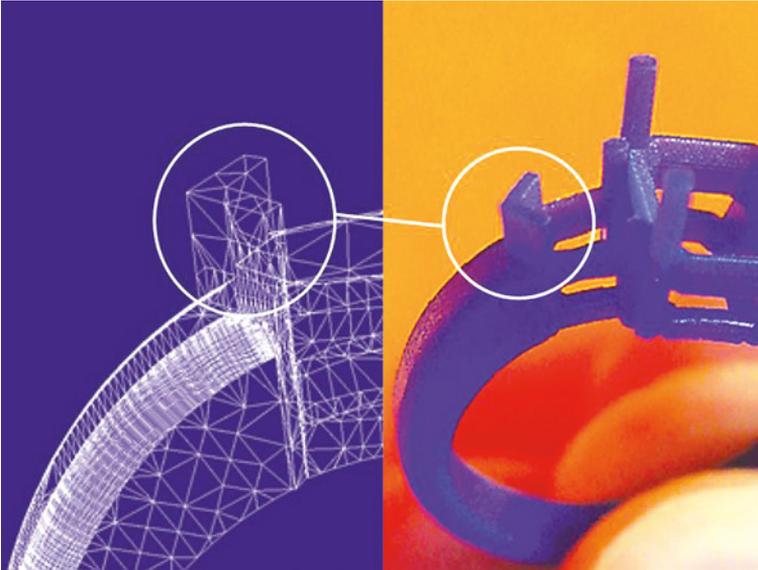


Bild 4.6 Triangulierte Oberfläche und zugehöriges additiv gefertigtes Bauteil
(Quelle: 3D Systems)

Die STL-Formulierung hat auch Nachteile:

- Sie erzeugt sehr große Datenmengen, insbesondere bei Verfeinerungen des Netzes, um zum Beispiel die Oberflächengüte zu verbessern
- STL-Datensätze enthalten nur die Geometrieinformation und keine Informationen über Farbe, Texturen, Material oder sonstige Bauteileigenschaften

Fehler im STL-Datenformat

Bei der Umsetzung der CAD-internen Geometriedaten in STL-Files können unterschiedliche Fehler auftreten, die die Qualität des additiv gefertigten Bauteils zuweilen stark beeinträchtigen. Hoffmann [HOF95] systematisiert sie wie folgt:

- Konstruktionsfehler,
- Umsetzungsfehler,
- Beschreibungsfehler.

Konstruktionsfehler konzentrieren sich auf überflüssige Daten im Inneren des Körpers, die unter anderem auf die fehlerhafte Vereinigung von Einzelementen im CAD-System zurückzuführen sind (Bild 4.7). Daraus können sich Probleme für additive Verfahren ergeben. Die Folgen reichen von zusätzlichem Aufwand während des Bauprozesses bis zum Totalverlust des Teils. Bei den Polymerisations- und Sinterverfahren wirken sich diese Fehler nicht, oder nur marginal durch Doppelbelichtungen, auf das Bauteil aus.

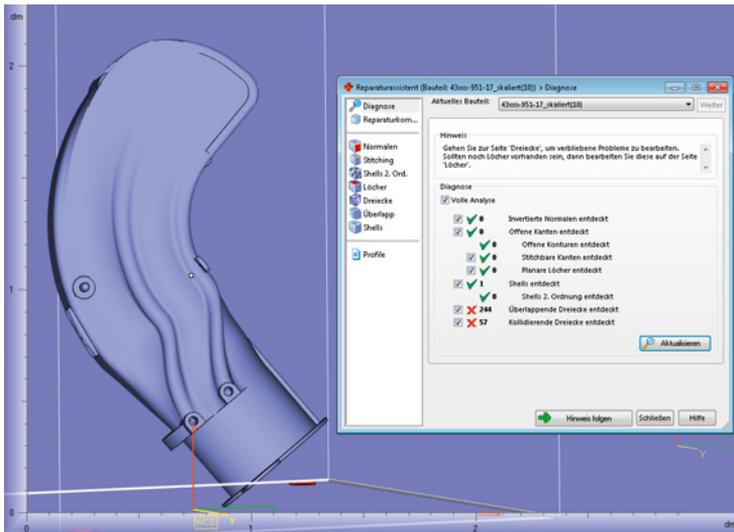


Bild 4.102 Fehleranalyse des Bauteils
(Quelle: GoetheLab for Additive Manufacturing, Fachhochschule Aachen)

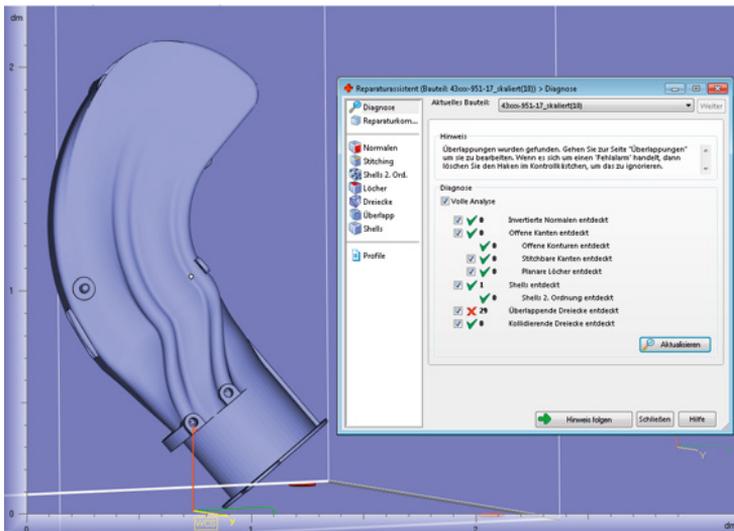


Bild 4.103 Fehlerkorrektur nach erster Korrekturschleife
(Quelle: GoetheLab for Additive Manufacturing, Fachhochschule Aachen)

Bevor die Stützstrukturen am Bauteil angebracht werden können, muss eine vorteilhafte Orientierung im Bauraum festgelegt werden. Die Ausrichtung von Bauteilen hat einen entscheidenden Einfluss auf den reibungslosen und wirtschaftlichen Ablauf eines L-PBF-Prozesses, da die Bauzeit zum einen von der Bauhöhe und zum

Index

Symbole

3D-CAD-Modell 141
3D-Datensätze 29
3D-Drucken 5, 45, 53, 66
3D Printing 5

A

abgewinkelte Stützstrukturen 245
Additive Fertigung 1
Additive Fertigungsverfahren 4, 45
Additive Manufacturing 4
Agents 57
AMF-Datenformat 148
AM-Software Suites 257
Anti-Quietsche-Effekt 162
Anwendungsbeispiele 35
Anwendungsgebieten 8
Application Program Interfaces 139, 257
ASTM 79
Aufbaurate 93
Automotiv 40

B

Bandsäge 243
Baukammer 120
Bauplatzform 120
Bauteilgestaltung 137
Bauteilparameter 91
Berichtswesen 259
Beschichtungssystem 120
Beschichtungszeit 90

Beschreibungsfehler 147
Bewegliche Baugruppen 207, 218
Break Out 61

C

CAD-Modell 29
CAD-System 30, 141
Carbonfasern 60
Cladding 61
Cloud-Lösungen 260
Constructive Solid Geometry 142

D

Datensicherheit 259
Designspace 200
Designverbesserung 258
Deutsche Institut für Normung 78
Differenzdarstellung 259
Digital Mock Up 141
Dosierfaktor 90
Drahterodieren 243
Dreidimensionales Drucken 53
Dreiecks Patches 147

E

EIGA-Verfahren 112
Einheitszelle 169
elektro-chemische Verfahren 253
Elektronenstrahl-Schmelzen 52, 62
Elementarzelle 154

Engineering-Diskussion 259
Extrusion 53, 70

F

File-Analyse 258
File-Konvertierung 258
Finite-Element-Analyse 184
Flächenbegrenzungsmodelle 142
Flächenkühlung 214
Flächenmodelle 141
Füllmaterial 54
Funktionsintegration 16, 19, 33, 207
Fused Deposition Modeling 53, 71
Fused Layer Manufacturing 53, 70
Fusing 61

G

Generative Design 205
Generative Herstellung 4
Geometriesuche 259
geometrische Möglichkeiten 31
Gestaltungsgrundlagen 77
Gipskeramik 68
Gitterstrukturen 18, 163
Gitterstrukturtypen 176
Gleitschleifen 251
Graphical User Interface 139
Grundkörpermodelle 142
Grünling 53

H

Harz 53
Heiß-Isostatische Pressen 241
Hochtemperaturthermoplast 72
HP Multi Jet Fusion 57
Hybridmodelle 142
Hybridverfahren 66

I

Individualisierung 16, 24
In-Prozess-Überwachung 259

Integrierte Funktionalität 19
ISO 79

K

Kerbspannungen 138
komplexe Geometrien 17
Komplexität 15
Konstruktionsfehler 145
Konturabstand 91
Kubische Gitterstruktur 169
Kühlkanäle 18, 207, 211

L

Laboranlagen 119
Laminated Metal Prototyping 66
Laminated Object Manufacturing 53, 63
Laser Powder Bed Fusion 52, 85
Laser Powder Bed Fusion Prozess 61
Laser-Scanner-Einheit 55, 120
Laserschmelzen 49, 52, 58, 61
Lasersintern 49, 52, 58
Laser-Stereolithographie 52
Layer Laminated Manufacturing 53, 63
Leichtbau 16, 18, 32, 259
Leichtbaumaterialien 18
Leistungssteigerung 34
Lieferanten-Quotierung 259
Lizensierung 259
Losgrößen 16, 22
Luft- und Raumfahrt 36

M

manuelle Nachbearbeitung 244
Marktsituation 6
Maschinenanalyse 259
Maschinensteuerung 259
Material-Handling 259
Materialvielfalt 16, 23, 73
Monolithische Bauweisen 207, 221
Monomers 55
Multi Jet Fusion 50

N

Nachbehandlung 48
Nachbehandlungsofen 53
Nesting 51, 81
Netzreparatur 258
Normalenvektor 143
Normung 78
Nullpunktspannsysteme 246
Nurbs 206

O

Oberflächen 150
Oberflächenrauheiten 106
Oberflächenstrukturen 150
Orientierung 259

P

Packen 51
Packing 51
Parallelkühlung 216
Patches 147
pay-per-use 260
PEEK 60
Periodische Gitterstruktur 168, 169
Personalisierung 16, 26
piezoelektrischer Druckkopf 56
PolyJet Matrix 56
Polymerdrucken 52
Polymerdruckverfahren 55
Polymerisation 52, 53
Polymer Jetting 55
Polynurbs 204
Polyphenylsulfon 72
Post-Processing 54
Potenziale 15
Preisangabe 258
Produktionsanlagen 119
Produktionsprotokoll 259
Programmierschnittstellen 257
Prozesseinfluss 80
Prozessfamilien 52
Prozesskette 46, 85
Pulverkosten 118

Pulverkreislauf 121
Pulverkuchen 59
Pulververluste 118

Q

Querschnittsänderungen 138

R

Rapid Prototyping 4
Recoating 53
Rendering 258
Ressourceneffizienz 32
Ressourcenschonung 16, 21

S

Sandstrahlen 250
Scangeschwindigkeit 94
Scanstrategie 95
Schachbrettbelichtung 95
Schichtbautechnologie 45
Schichtdicke 46
Schrumpungsverhalten 137
Schutzgaskreislauf 120
Selective Deposition Lamination 65
Selektives Laserschmelzen 52
Selektives Lasersintern 52
Serienproduktion 51
Sicherungskopie 258
Simulation 259
Softwareplattform 258
Solids 46
Spannungsspitzen 138
Spurabstand 94
Spurbreitenkompensation 91
Standardisierung 78
Stereolithographie 52, 55
Stereolithographie-Prozess 49
STL-Datenformat 143
Stochastische Zellstrukturen 168
Streifenbelichtung 95
Strömungstechnik 161
Strukturtyp 169

Stützen 54
Stützengeneratoren 143
Stützenoptimierung 259
Stützstrukturen 224
Supportstrukturen 81

T

Thermojet-Drucken 55
Third-Party-Software 143
Topologieoptimierung 198
Treppenstufeneffekt 46
Trowalisieren 251
T-Splines 206

U

Umsetzungsfehler 146
UV-Kammer 54
UV-Map 157
UV-Mapping 154

V

VBA-Skript 160
Verein Deutscher Ingenieure 78

Verschachtelung 259
Versionsüberwachung 259
Verzug 137
VIGA-Verfahren 112
Viper 54
Virtual Reality 141
Visual Basic for Application 139, 158
Volumenelemente 143
Volumenenergiedichte 93
Volumenmodelle 141

W

Wabenstrukturen 167
Wärmebehandlung 241
Wasserzeichen 259
Werkzeugbau 42
Werkzeugweg 259
Wiederbeschichtung 59

Z

Zeitplanung 259
Zellenbereich 169
Zelluläre Materialien 166
Zertifizierung 259