

# 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.

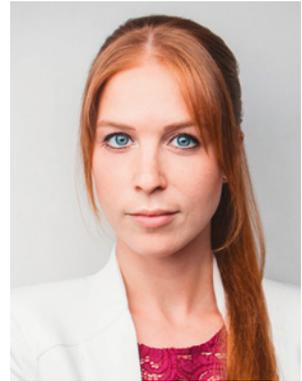
Im Sommersemester 2000 wurde Andreas Gebhardt zum Professor für Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing an der Fachhochschule Aachen ernannt. Dort leitete er im Rahmen des „GoetheLab for Additive Manufacturing“ an der Fachhochschule Aachen eine Forschergruppe, die sich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

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>VII</b>
<b>Die Autoren</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Additive Fertigung .....</b>	<b>45</b>
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

<b>3</b>	<b>Lasert Powder Bed Fusion</b>	<b>85</b>
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
<b>4</b>	<b>Bauteilgestaltung für den L-PBF-Prozess</b>	<b>137</b>
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
<b>5</b>	<b>Nachbearbeitung .....</b>	<b>239</b>
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
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick .....</b>	<b>255</b>
6.1	Schlussfolgerung .....	255
6.2	Ausblick .....	256
<b>Index .....</b>		<b>263</b>

# 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 sind<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> (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

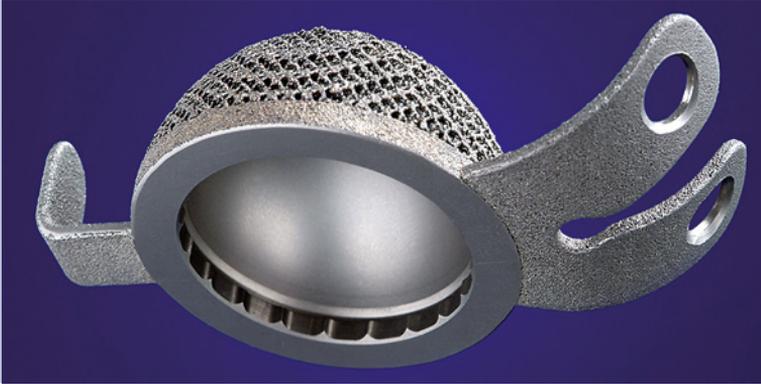
Unter einem additiven Fertigungsverfahren (AF) versteht man einen automatisierten Prozess zur Herstellung maßstäblicher dreidimensionaler physischer Objekte, die unmittelbar aus einem 3D-CAD-Datensatz (computer-aided design) generiert werden. Er basiert auf dem Schichtbauprinzip und benötigt keine bauteilabhängigen 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

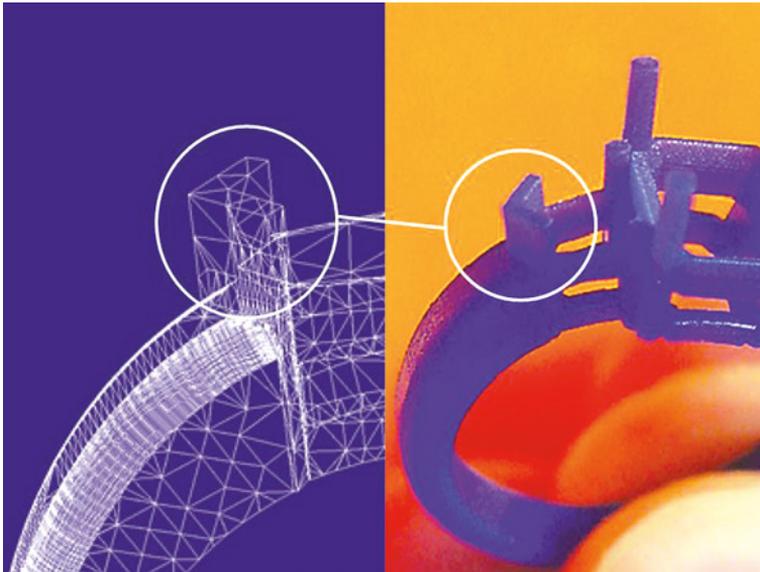


**Bild 1.10** Kürbis-Spinne aus dem 3D-Drucker  
(Quelle: Megawillbot Designs)

**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:

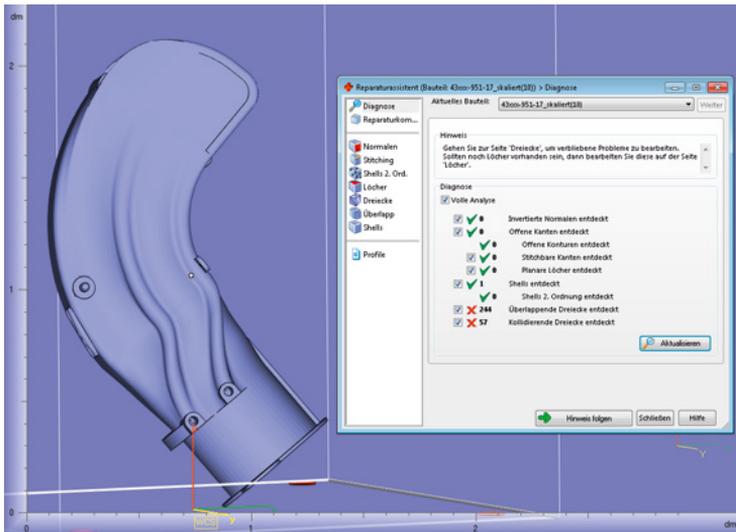
- Sie erzeugt sehr große Datenmengen, insbesondere bei Verfeinerungen des Netzes, um zum Beispiel die Oberflächengüte zu verbessern
- STL-Datensätze enthalten nur die Geometrieinformation und keine Informationen über Farbe, Texturen, Material oder sonstige Bauteileigenschaften

### Fehler im STL-Datenformat

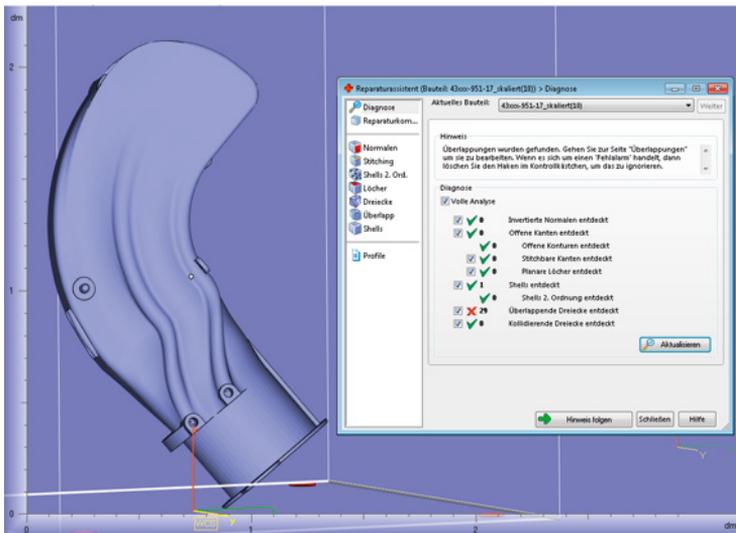
Bei der Umsetzung der CAD-internen Geometriedaten in STL-Files können unterschiedliche Fehler auftreten, die die Qualität des additiv gefertigten Bauteils zuweilen stark beeinträchtigen. Hoffmann [HOF95] systematisiert sie wie folgt:

- 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  
Schrumpfungsverhalten 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