

Andreas Gebhardt

Komplett
in Farbe

Additive Fertigungsverfahren

Additive Manufacturing und
3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion



5., aktualisierte und erweiterte Auflage

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

Additive Fertigungsverfahren

Additive Manufacturing und 3D-Drucken
für Prototyping – Tooling – Produktion

5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt

Geschäftsführer der CP – Centrum für Prototypenbau GmbH, Erkelenz/Düsseldorf

Professor an der Fachhochschule Aachen

Lehrgebiet: Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing

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.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Coverbild: Arup/Davidfotografie

Satz: Manuela Treindl, Fürth

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44401-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-44539-0

Widmung

*Allen Ingenieuren gewidmet,
die ihren Beruf in Ehrfurcht vor der Schöpfung ausüben.*¹

¹ Diese Widmung stellte Prof. Walter Traupel 1958 der ersten Auflage seines Standardwerkes *Thermische Turbomaschinen*, Springer Verlag, voran.
Auch 58 Jahre später kann eine Aufforderung an verantwortlich handelnde Ingenieure nicht eindrücklicher formuliert werden.

Vorwort

„Vom Labor in die Produktion“

„*Vom Spielzeug für Techniker zum Schlüssel für die schnelle Produktentwicklung*“ war 1995 das Vorwort der 1. Auflage dieses Buches überschrieben. Etwa sechs Jahre zuvor waren die ersten Stereolithographie-Maschinen in Europa installiert worden. Rapid Prototyping-Verfahren hatten sich seitdem in wenigen Jahren als effektive Werkzeuge für die schnellere Entwicklung besserer Produkte etabliert. Sie hatten sich gewandelt vom isoliert angewandten, technisch faszinierenden, aber wirtschaftlich nicht attraktiven Modellbauverfahren, zum geschwindigkeitsbestimmenden Element in der Produktentwicklungskette.

„*Vom Werkzeug für die schnelle Produktentwicklung zum Werkzeug für die schnelle Produktentstehung*“ wurde im Vorwort zur 2. Auflage die Entwicklung bis 2000 überschrieben. Triebfeder der Entwicklungen war der dringende Wunsch nach Bauteilen mit „Serieneigenschaften“. Dieser wurde durch die Entwicklung von Werkstoffen wie Metall, Sand, Keramik weitgehend erfüllt und durch Verfahren, die die Herstellung von Formen und Werkzeugen erlaubten unterstützt. Das Rapid Tooling erweiterte die Anwendung des Rapid Prototypings und verkürzte den mit traditionellen Methoden zeitaufwendigen und teuren „Schritt ins Werkzeug“ erheblich.

„*Generative Verfahren für die individuelle Fertigung*“ titelte die 3. Auflage 2007. Aufgrund des technischen Fortschritts, aber vor allem auch durch die Verifizierung des enormen Potenzials in immer weiteren Bereichen, hatte sich die direkte digitale Fertigung, das Rapid Manufacturing weiter etabliert. Dazu wurden neue Maschinen und Konzepte entwickelt: Der Prototyper wandelt sich zum Fabrikator. Die losgrößenunabhängige Fertigung von kundenspezifischen Serien mit Einzelteilcharakter wurde möglich und begann die Fertigungstechnik insgesamt zu revolutionieren.

„*Raus aus der Nische!*“ Die 4. Auflage beschreibt 2013 die (noch anhaltende) Verbreitung der Generativen Fertigungstechnik über alle Branchen und viele Anwendergruppen hinweg. Leistungsfähige Production Printer arbeiten in der Industrie und Fabber, kleine, preiswerte und meist selbst zu bauende 3D-Drucker, erschließen die additive Fertigung für semi Professionals und für Privatleute auch an entlegenen Orten.

Seriöse Journale und Tageszeitungen machen mit Drucker Erfolgsgeschichten auf. Drucker sind in aller Munde.

„*Vom Labor in die Produktion*“ greift die vorliegende 5. Auflage die anhaltend hochdynamische Entwicklung auf. Die Technik wird weiter verbessert, die Prozesse werden stabiler und vor allem reproduzierbar. Neue, auch erste kontinuierlich arbeitende, 3D-Druckverfahren drängen auf den Markt. Es entwickeln sich eine dezentrale weltumspannende private Anwenderlinie und eine Entwicklungslinie für Industrial Printer. Letztere reifen zu flexiblen additiven Fertigungssystemen heran. Eine wirkliche Massenproduktion von Einzelteilen ist damit realistisch.

Neben den notwendigen Aktualisierungen und Ergänzungen zeichnet dieses Buch vor allem diese Entwicklung nach.

Alle Aspekte der additiven Fertigungsverfahren sind weltweit Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Es kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass ein Wettbewerber die additiven Fertigungsverfahren nicht kennt oder nicht einsetzt.

Aachen im Oktober 2016

Andreas Gebhardt

Über den Autor



Dr.-Ing. Andreas Gebhardt, Jahrgang 1953, studierte an der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Motoren- und Turbinenbau. Er promovierte 1986 bei Professor Dibelius mit einer Arbeit über das instationäre Verhalten konventioneller Dampfkraftwerksblöcke.

Von 1986 bis 1991 war er Geschäftsführer eines Spezialbetriebes für Motoreninstandsetzung und die Fertigung von Spezialmotoren und Motorenteilen.

1991 wechselte er in die Geschäftsführung des Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrums NRW GmbH (LBBZ-NRW). Das LBBZ ist auf die lasergestützte Fertigung spezialisiert und beschäftigt sich bereits seit 1992 mit dem Rapid Prototyping.

1997 wurde die CP - Centrum für Prototypenbau GmbH, Erkelenz/Düsseldorf, gegründet, deren Geschäftsführung Andreas Gebhardt übernahm. Die CP-GmbH ist ein Rapid Prototyping-Dienstleister und fertigt Prototypen aus Kunststoff und Metall als Einzelstücke und in kleinen Serien. Vom 3D-CAD über additive Fertigungsanlagen bis hin zum Werkzeugbau verfügt die CP-GmbH über alle Elemente einer vollständig geschlossenen Additive Manufacturing-Prozesskette.

Die praktischen Erfahrungen in der CP-GmbH bilden das fachliche Rückgrat für die in diesem Buch aufbereitete Thematik.

Zum Sommersemester 2000 wurde Andreas Gebhardt als Professor für „Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing“ an die Fachhochschule Aachen berufen. Dort leitet er im Rahmen des „GoetheLab für Additive Manufacturing“ eine Forschergruppe zum Lasersintern von Metallen (SLM Verfahren), Polymerdrucken, 3D-Drucken (Pulver-Binder-Verfahren), Extrusionsverfahren (FDM) und zum Einsatz unterschiedlicher Fabber. Zum GoetheLab gehört auch der weltweit erste Technologiebus, ein rollendes Labor in einem Doppeldeckerbus, FabBus genannt.

Seit dem Wintersemester 2000 ist Andreas Gebhardt Gastprofessor am City College der City University New York. Im Herbst 2014, wurde er von der Tshwane University of Technology, TUT, in Pretoria, Südafrika zum „Professor Extraordinaire“ ernannt. Seit 2004 ist Andreas Gebhardt Herausgeber des RTeJournals (www.rtejournal.de), einer „open-access peer review“ online-Zeitschrift für Rapid Technologie.

Danksagung

Der interdisziplinäre Charakter und das anhaltend sehr hohe Entwicklungstempo der additiven Fertigungsverfahren machen es für eine einzelne Person nahezu unmöglich, dieses Gebiet vollständig, richtig und zeitnah darzustellen. Deshalb bin ich dankbar für die vielfältige Hilfe und Unterstützung, die mir zuteil wurde.

Die praxisgerechte Ausrichtung wurde wesentlich durch die enge Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des CP – Centrum für Prototypenbau GmbH – gewährleistet. Dafür bedanke ich mich bei allen Kollegen, insbesondere aber bei *Besima Sümer*, *Christoph Schwarz* und *Michael Wolf* für intensive Diskussionen und die praktische Umsetzung konzeptioneller Ansätze.

Das Team des „GoetheLab for Additive Manufacturing“ der Fachhochschule Aachen hat die Entstehung des Buches aktiv begleitet und mich konzeptionell und in zahlreichen Details unterstützt. Beteiligt waren vor allem: *Julia Kessler*, *Laura Thurn*, *Prasanna Rajaratnam*, *Stefan Thümmler*, *Dawid Ziebura*, *Jan Steffen Hötter* und *Miranda Fateri*.

Für zahlreiche Fachgespräche, Diskussionen und Detailbeiträge bedanke ich mich bei allen, die direkt oder indirekt zum Gelingen des Buches beigetragen haben, vor allem bei den Mitgliedern des VDI Fachausschusses 105 „Rapid Manufacturing“ und dem DVS Fachausschuss 13 „Generative Fertigungsverfahren – Rapidtechnologien“.

Aus den vorangegangenen Auflagen sind, gegebenenfalls in Auszügen, zahlreiche Informationen übernommen worden, die seinerzeit von folgenden Autoren beige-steuert wurden: *Konrad Wissenbach*, *Andres Gasser* und *Eckhard Hoffmann*, Aachen; *Sabine Sändig*, Jena.; *Wolfgang Steinchen*, Kassel; *Bernd Streich*, Kaiserslautern; *Frank Petzold*, Bremen; *Stefan Nöken*, *Christian Wagner*, Aachen.

Jens Hoffmann, Dresden, hat größere Beiträge zum STL-Format erarbeitet. *Edgar Hansjosten*, Karlsruhe, hat Abschnitt 9.1 verfasst. *Klaus Licher* danke ich für die Unterstützung beim Abschnitt 4.3.2.11 „Cabriovertdeck“.

Vielen Dank auch an *Alexander Schwarz*, der bei der Erarbeitung der Tabellen im Anhang unterstützt und viele Aspekte der Formatierung übernommen hat.

Herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit an den Carl Hanser Verlag und Frau Monika Stüve.

Inhaltsverzeichnis

Widmung	V
Vorwort	VII
Über den Autor	IX
Danksagung.....	XI
1 Einordnung und Begriffsbestimmung	1
1.1 Systematik der Fertigungsverfahren.....	1
1.2 Systematik der Additiven Fertigungsverfahren.....	2
1.2.1 Begriffsbestimmungen.....	3
1.2.2 Eigenschaften der Additiven Fertigungsverfahren.....	3
1.3 Einteilung der Additiven Fertigungsverfahren	6
1.3.1 Rapid Prototyping.....	6
1.3.2 Rapid Manufacturing	8
1.3.2.1 Rapid Manufacturing – Direct Manufacturing.....	9
1.3.2.2 Rapid Manufacturing – Direct Tooling (Rapid Tooling – Prototype Tooling).....	9
1.3.3 Nicht-additive Verfahren – Indirect Prototyping und Indirect Tooling	10
1.3.4 Rapid Prototyping oder Rapid Manufacturing?	11
1.3.5 Begriffsvielfalt.....	12
1.3.6 Wie schnell ist Rapid?	13
1.4 Integration der Additiven Fertigungstechnik in den Produktentstehungsprozess.....	13
1.4.1 Additive Verfahren in der Produktentwicklung.....	14
1.4.2 Additive Verfahren für die stückzahl-unabhängige Produktion.....	15
1.4.3 Additive Verfahren für die individualisierte Produktion	15
1.5 Maschinen für die Additive Fertigung	16
1.5.1 Fabber, Personal 3D-Drucker/Personal 3D Printer	17

1.5.1.1	Fabber	18
1.5.1.2	Personal 3D-Drucker/Personal 3D Printer	18
1.5.2	Professional 3D-Drucker/Professional 3D Printer	18
1.5.3	Production 3D-Drucker/Production 3D Printer oder Produktionsmaschinen	18
1.5.4	Industrial 3D-Drucker	19
1.5.5	Maschinenklassen und Bauteileigenschaften	19
2	Merkmale der Additiven Fertigungsverfahren	21
2.1	Verfahrensgrundlagen	21
2.2	Erzeugung der mathematischen Schichtinformation	26
2.2.1	Beschreibung der Geometrie durch einen 3D-Datensatz	27
2.2.1.1	Datenfluss und Schnittstellen	27
2.2.1.2	Modellierung dreidimensionaler Körper mittels 3D-CAD	29
2.2.1.2.1	CAD-Modelltypen	30
2.2.1.2.2	Anforderungen an CAD-Systeme	32
2.2.1.3	Modellierung dreidimensionaler Körper aus Messwerten	33
2.2.2	Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten	35
2.2.2.1	STL-Format	35
2.2.2.1.1	Fehler im STL-File	37
2.2.2.2	CLI/SLC-Format	40
2.2.2.3	PLY- und VRML-Format	43
2.2.2.4	AMF-Format	45
2.3	Physikalische Prinzipien zur Erzeugung der Schicht	47
2.3.1	Generieren aus der flüssigen Phase	48
2.3.1.1	Photopolymerisation – Stereolithographie (SL)	48
2.3.1.2	Grundlagen der Polymerisation	49
2.3.1.2.1	Laserinduzierte Polymerisation	51
2.3.1.2.2	Vorteile der Stereolithographie	57
2.3.1.2.3	Nachteile der Stereolithographie	59
2.3.2	Generieren aus der festen Phase	60
2.3.2.1	Schmelzen und Verfestigen von Pulvern und Granulaten – Sintern (Lasersintern, LS), Schmelzen	60
2.3.2.1.1	Materialien für das Sintern und Schmelzen	61
2.3.2.1.2	Vor- und Nachteile des Sinterns und Schmelzens	66
2.3.2.1.3	Proprietäre oder handelsübliche Pulver?	67
2.3.2.2	Ausschneiden aus Folien und Fügen – Layer Laminate Manufacturing (LLM)	68
2.3.2.2.1	Vor- und Nachteile der Schichtverfahren (LLM)	69

2.3.2.3	Schmelzen und Verfestigen aus der festen Phase – Fused Layer Modeling (FLM)	71
2.3.2.3.1	Extrudierende und ballistische Verfahren	71
2.3.2.3.2	Vor- und Nachteile der FLM-Verfahren	74
2.3.2.4	Verkleben von Granulaten mit Bindern – 3D Printing (3DP) – Pulver-Binder-Verfahren.	74
2.3.2.4.1	Vor- und Nachteile von Pulver-Binder-Verfahren	75
2.3.3	Generieren aus der Gasphase	76
2.3.3.1	Aerosoldruckverfahren	76
2.3.3.1.1	Vor- und Nachteile von Aerosoldruckverfahren	77
2.3.3.2	Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD).	77
2.3.4	Sonstige Verfahren	79
2.3.4.1	Sonolumineszenz.	79
2.3.4.2	Elektroviskosität.	80
2.4	Elemente zur Erzeugung der physischen Schicht	80
2.4.1	Bewegungselemente.	81
2.4.1.1	Plotter	81
2.4.1.2	Scanner	82
2.4.1.3	Parallelroboter (Delta Roboter).	83
2.4.2	Generierende und konturierende Elemente.	84
2.4.2.1	Laser	84
2.4.2.2	Druckköpfe	86
2.4.2.3	Extruder	90
2.4.2.4	Schneidmesser	90
2.4.2.5	Fräser	91
2.4.3	Schichterzeugendes Element.	91
2.5	Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren.	93
2.6	Zusammenfassende Betrachtung der theoretischen Potenziale der additiven Fertigungsverfahren	95
2.6.1	Werkstoffe	96
2.6.2	Bauteileigenschaften	98
2.6.3	Details	98
2.6.4	Genauigkeiten	99
2.6.5	Oberflächengüte	100
2.6.6	Entwicklungspotenzial	100
2.6.7	Kontinuierliche 3D-Modellierung	101
3	Additive Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing	103
3.1	Polymerisation – Stereolithographie (SL).	107
3.1.1	Maschinenspezifische Grundlagen.	107

3.1.1.1	Laser-Stereolithographie	107
3.1.1.2	Digital Light Processing (DLP)	117
3.1.1.3	PolyJet und Multi-Jet Modeling (MJM) und Paste Polymerization	119
3.1.1.4	Continuous Liquid Interface Production (CLIP)	119
3.1.2	Übersicht: Polymerisation – Stereolithographie	120
3.1.3	Stereo Lithography Apparatus (SLA) – 3D Systems	121
3.1.4	STEREOS – EOS GmbH	133
3.1.5	Stereolithographie – Fockele & Schwarze (F&S)	134
3.1.6	Mikrostereolithographie – microTEC	135
3.1.7	Solid Ground Curing – Cubital	138
3.1.8	Digital Light Processing – EnvisionTEC	139
3.1.9	Polymerdrucken – Stratasys/Objet	146
3.1.10	Multi-Jet-Modeling (MJM) – ProJet – 3D Systems	153
3.1.11	Digital Wax	158
3.1.12	Film Transfer Imaging – 3D Systems	161
3.1.13	Sonstige Polymerisationsverfahren	164
3.1.13.1	Paste Polymerization – 3D Systems/OptoForm	164
3.2	Sintern/Selektives Sintern – Schmelzen im Pulverbett	164
3.2.1	Maschinenspezifische Grundlagen	165
3.2.2	Übersicht: Sintern – Schmelzen	170
3.2.3	Lasersintern – 3D Systems	172
3.2.3.1	Laser Sintering, SLS – 3D Systems	172
3.2.3.2	Direct Metal Printing DMP-3D Systems	182
3.2.4	Lasersintern – EOS GmbH	189
3.2.5	Laserschmelzen – ReaLizer GmbH	201
3.2.6	Laserschmelzen – SLM Solutions GmbH	206
3.2.7	Laserschmelzen – Renishaw LTD	209
3.2.8	LaserCusing – ConceptLaser GmbH	212
3.2.9	Laser Metal Fusion (LMF) – TRUMPF	218
3.2.10	Elektronenstrahlsintern – ARCAM	221
3.2.11	Selective Mask Sintering (SMS) – Sintermask	227
3.2.12	Lasersintern – Phenix	228
3.3	Beschichten – Schmelzen mit der Pulverdüse	229
3.3.1	Verfahrensprinzip	230
3.3.1.1	Pulverdüsenkonzepte	232
3.3.1.2	Prozessüberwachung und -regelung	233
3.3.2	Laser Engineered Net Shaping (LENS) – OPTOMECC	233
3.3.3	Laser Metal Deposition (LMD), TRUMPF	237
3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Layer Laminate Manufacturing (LLM)	242
3.4.1	Übersicht: Schicht-Laminat-Verfahren	242

3.4.2	Maschinenspezifische Grundlagen	242
3.4.3	Laminated Object Manufacturing (LOM) – Cubic Technologies	247
3.4.4	Rapid Prototyping System (RPS) – Kinergy	252
3.4.5	Selective Adhesive and Hot Press Process (SAHP) – Kira	252
3.4.6	Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann	252
3.4.7	Stratoconception – rp2i	253
3.4.8	Selective Deposition Lamination (SDL) – Mcor	254
3.4.9	Plastic Sheet Lamination – Solido	258
3.4.10	Sonstige Schicht-Laminat-Verfahren	258
3.4.10.1	Bauteile aus Metalllamellen – Laminated Metal Prototyping	258
3.5	Extrusionsverfahren – Fused Layer Modeling (FLM)	259
3.5.1	Übersicht: Extrusionsverfahren	259
3.5.2	Fused Deposition Modeling (FDM) – Stratasys	260
3.5.3	Wachsprinter – Solidscape	272
3.5.4	Multi-Jet-Modeling (MJM) – ThermoJet – 3D Systems	276
3.5.5	ARBURG Kunststoff-Freiformen (AF) – ARBURG GmbH	276
3.6	Three Dimensional Printing (3DP)	282
3.6.1	Übersicht: 3D Printing	282
3.6.2	3D Printer – 3D Systems/Z-Corporation	283
3.6.3	Metall und Formsand Printer – ExOne	287
3.6.3.1	Metall-Linie: Direct Metal Printer	289
3.6.3.2	Formsand-Linie: Direct Core and Mold Making Machine	292
3.6.4	Direct Shell Production Casting (DSPC) – Soligen	295
3.6.5	3D-Drucksystem – Voxeljet	298
3.6.6	Maskless Masoscale Material Deposition (M3D) – OPTOMECC	302
3.7	Hybridverfahren	306
3.7.1	Laserauftragsschweißen und Fräsen – Controlled Metal Build Up (CMB) – Röders	307
3.7.2	Laminieren und Ultraschallschweißen – Ultrasonic Consolidation – Fabrisonic/Solidica	310
3.7.3	Metallpulverauftragsverfahren (MPA) – Hermle	314
3.7.4	Hybrid (Additive and Subtractive manufacturing) – DGM-MORI	319
3.7.5	Extrudieren und Fräsen – Big Area Additive Manufacturing (BAAM) – Cincinnati	323
3.8	Zusammenfassende Betrachtung der Additiven Fertigungsverfahren	328
3.8.1	Charakteristische Eigenschaften der Additiven Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren	329
3.8.2	Genauigkeit	332
3.8.3	Oberflächen	335
3.8.4	Benchmark-Tests und User-Parts	339

3.9	Entwicklungsziele	342
3.10	Folgeprozesse	343
3.10.1	Zielwerkstoff Kunststoff	343
3.10.2	Zielwerkstoff Metall	343
4	Rapid Prototyping	345
4.1	Einordnung und Begriffsbestimmung	345
4.1.1	Eigenschaften von Prototypen	345
4.1.2	Charakteristika des Rapid Prototyping	347
4.2	Strategische Aspekte beim Einsatz von Prototypen	348
4.2.1	Produktentwicklungsschritte	348
4.2.2	Time to market	348
4.2.3	Frontloading	349
4.2.4	Digitales Produktmodell	352
4.2.5	Die Grenzen der physischen Modellierung	353
4.2.6	Kommunikation und Motivation	355
4.3	Operative Aspekte beim Einsatz von Prototypen	355
4.3.1	Rapid Prototyping als Werkzeug zur schnellen Produktentwicklung	356
4.3.1.1	Modelle	356
4.3.1.2	Modellklassen	356
4.3.1.3	Modellklassen und Additive Verfahren	360
4.3.1.4	Zuordnung von Modellklassen und Modelleigenschaften zu den Familien der <i>Additiven Fertigungsverfahren</i>	364
4.3.2	Anwendung des Rapid Prototyping in der industriellen Produktentwicklung	367
4.3.2.1	Beispiel: Pumpengehäuse	367
4.3.2.2	Beispiel: Büroleuchte	369
4.3.2.3	Beispiel: Einbauleuchtenfassung	373
4.3.2.4	Beispiel: Modellbaggerarm	373
4.3.2.5	Beispiel: LCD-Projektor	377
4.3.2.6	Beispiel: Kapillarboden für Blumentöpfe	379
4.3.2.7	Beispiel: Gehäuse einer Kaffeemaschine	380
4.3.2.8	Beispiel: Ansaugkrümmer eines Vierzylindermotors	381
4.3.2.9	Beispiel: Cocktailbecher	382
4.3.2.10	Beispiel: Spiegeldreieck	382
4.3.2.11	Beispiel: Cabrioverdeck	383
4.3.3	Rapid Prototyping Modelle zur Visualisierung von 3D-Daten	387
4.3.4	Rapid Prototyping in der Medizin	387
4.3.4.1	Charakteristika medizinischer Modelle	387
4.3.4.1.1	Große Datenmengen	388

4.3.4.1.2	Nicht exakt definierte Modellabmessungen	388
4.3.4.1.3	Mehrere Modelle	388
4.3.4.1.4	Transparenz	388
4.3.4.1.5	Sterilisierbarkeit	389
4.3.4.1.6	Biokompatibilität	389
4.3.4.1.7	Stützstrukturen	389
4.3.4.1.8	Unverbundene Modellteile	389
4.3.4.2	Anatomische Faksimiles	390
4.3.4.3	Beispiel: Anatomisches Faksimile für eine Umstellungsosteotomie	392
4.3.5	Rapid Prototyping in Design, Kunst und Architektur	393
4.3.5.1	Modellbildung in Design und Kunst	393
4.3.5.2	Beispiel Kunst: Computer-Skulptur	393
4.3.5.3	Beispiel Design: Flaschenöffner	394
4.3.5.4	Angewandte Kunst – Bildhauerei und Plastiken	395
4.3.5.5	Beispiel Archäologie: Büste der Königin Teje	397
4.3.5.6	Modellbildung in der Architektur	398
4.3.5.7	Beispiel Architektur: Deutscher Pavillon für die Expo '92	399
4.3.5.8	Beispiel Architektur: Ground Zero	400
4.3.5.9	Beispiel Architekturdenkmäler: Dokumentation von baugeschichtlich relevanten Gebäuden	401
4.3.6	Rapid Prototyping zur Überprüfung von Rechenverfahren	402
4.3.6.1	Spannungsoptische und thermoelastische Spannungsanalyse	402
4.3.6.1.1	Spannungsoptische Spannungsanalyse	403
4.3.6.1.2	Thermoelastische Spannungsanalyse (THESA)	404
4.3.6.2	Beispiel: Spannungsoptische Spannungsanalyse an einem Kipphebel eines Lkw-Verbrennungsmotors ..	404
4.3.6.3	Beispiel: Thermoelastische Spannungsanalyse zum Festigkeitsnachweis an einer Automobilfelge	406
4.4	Ausblick	409
5	Rapid Tooling	411
5.1	Einordnung und Begriffsbestimmung	411
5.1.1	Direkte und indirekte Verfahren	412
5.2	Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge	414
5.2.1	Strategische Aspekte beim Einsatz Additiver Werkzeuge	414
5.2.1.1	Schnelligkeit	414
5.2.1.2	Umsetzung neuer technischer Konzepte	415

5.2.2	Konstruktive Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge	416
5.2.2.1	Prototypwerkzeuge	417
5.2.2.1.1	Weiche gegossene Werkzeuge	417
5.2.2.1.2	Harte gegossene Werkzeuge	418
5.2.2.1.3	Harte direkt gefertigte Werkzeuge und Werkzeugeinsätze	418
5.2.2.2	Bereitstellung der Daten	420
5.3	Indirekte Rapid Tooling-Verfahren – Abformverfahren und Folgeprozesse	421
5.3.1	Eignung Additiver Verfahren zur Herstellung von Urmodellen für Folgeprozesse	422
5.3.2	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile	423
5.3.2.1	Abgießen in weiche Werkzeuge oder Formen	424
5.3.2.1.1	Vakuumgießen	424
5.3.2.1.2	Nylongießen	427
5.3.2.1.3	Silikonabguss	428
5.3.2.1.4	Photocasting	428
5.3.2.1.5	Spincasting	428
5.3.2.2	Abgießen in harte Werkzeuge	429
5.3.2.2.1	Metallspritzen	429
5.3.2.2.2	Gießharzwerkzeuge	430
5.3.2.2.3	Maskenwerkzeuge, Polyurethangießen	431
5.3.2.2.4	Niederdruckspritzgießen, Reaction Injection Molding (RIM)	432
5.3.2.2.5	3D Keltool – Course4 Technology	432
5.3.2.3	Andere Abformverfahren für harte Werkzeuge	433
5.3.2.3.1	Ford Sprayform-Verfahren	433
5.3.2.3.2	Rapid Solidification Process, RSP	433
5.3.3	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen	434
5.3.3.1	Der Feingussprozess mit additiven Prozessschritten	434
5.3.3.2	Werkzeuge durch Feinguss von Rapid Prototyping Urmodellen	437
5.4	Direkte Rapid Tooling-Verfahren	438
5.4.1	Prototype Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Kunststoff – 3D-Druckverfahren	438
5.4.1.1	Ausgießen von 3D gedruckten Bauteilen	438
5.4.1.2	3D gedruckte Werkzeugeinsätze	439
5.4.1.2.1	ACES Injection Molding, AIM	439
5.4.1.2.2	3D printed injection molding, 3D-IM	440
5.4.1.3	Tiefziehen oder Thermoformen	441

5.4.1.4	Herstellung von Kernen und Formen für den Metallguss.	442
5.4.1.4.1	Sandguss.	442
5.4.1.4.2	Druckguss.	443
5.4.2	Metallwerkzeuge auf der Basis von mehrstufigen additiven Prozessen.	444
5.4.2.1	Selektives Lasersintern von Metallen – IMLS – 3D Systems.	444
5.4.2.2	Paste Polymerization – 3D Systems.	445
5.4.2.3	3D Printing von Metallen – ExOne GmbH.	445
5.4.3	Direct Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Metall 3D-Druckverfahren.	446
5.4.3.1	Mehrkomponenten-Metallpulver-Lasersintern.	446
5.4.3.2	Einkomponenten-Metallpulver-Verfahren – Sintern und Generieren.	447
5.4.3.2.1	DirectTool – EOS GmbH.	447
5.4.3.2.2	Laserschmelzen – SLM-Solutions.	448
5.4.3.2.3	LaserCusing – Concept Laser.	449
5.4.3.2.4	TruPrint und Direktes Laserformen – TRUMPF.	450
5.4.3.2.5	Elektronenstrahlsintern – ARCAM.	451
5.4.3.2.6	Lasersintern – 3D Systems/Phenix.	451
5.4.3.3	Laser-Generieren mit Pulver und Draht.	452
5.4.3.3.1	Laser Engineered Net Shaping (LENS) – OPTOMECH.	452
5.4.3.3.2	Laser Metal Deposition (LMD).	453
5.4.3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Metalllamellenwerkzeuge – Laminated Metal Tooling.	454
5.4.3.4.1	Ultrasonic Consolidation – Fabrisonic/Solidica.	454
5.4.3.4.2	Lamellenwerkzeug – Weihbrecht.	454
5.5	Ausblick.	454
6	Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing.	457
6.1	Einordnung und Begriffsbestimmungen.	458
6.1.1	Begriffe.	458
6.1.2	Vom Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing.	459
6.1.3	Workflow für das Rapid Manufacturing.	461
6.1.4	Anforderungen an die direkte Fertigung.	461
6.2	Potenziale der additiven Fertigung von Endprodukten.	462
6.2.1	Erhöhte Konstruktionsfreiheit.	462
6.2.1.1	Erweiterte konstruktive und gestalterische Möglichkeiten.	462
6.2.1.2	Geometrie- und Funktionsintegration.	464

6.2.1.3	Neuartige Konstruktionselemente	464
6.2.2	Herstellung traditionell nicht herstellbarer Produkte.	465
6.2.3	Variation von Massenprodukten	466
6.2.4	Personalisierung von Massenprodukten	467
6.2.4.1	Passive Personalisierung – Hersteller Personalisierung	468
6.2.4.2	Aktive Personalisierung – Kunden Personalisierung . .	470
6.2.5	Realisierung neuer Werkstoffe	471
6.2.6	Realisierung neuer Fertigungsstrategien.	472
6.2.7	Entwurf neuer Arbeits- und Lebensformen	474
6.3	Anforderungen an additive Verfahren für die Fertigung	475
6.3.1	Anforderungen an die additive Herstellung eines Bauteils	475
6.3.1.1	Prozess	475
6.3.1.2	Materialien	477
6.3.1.3	Organisation	479
6.3.1.4	Konstruktion.	480
6.3.1.5	Qualitätssicherung.	480
6.3.1.6	Logistik	481
6.3.2	Anforderungen an die additive Serienfertigung mit heutigen Verfahren.	481
6.3.2.1	Prozess	481
6.3.2.2	Materialien	483
6.3.2.3	Organisation	484
6.3.2.4	Konstruktion.	484
6.3.2.5	Qualitätssicherung.	484
6.3.2.6	Logistik	485
6.3.3	Zukünftige Anforderungen an die additive Serienfertigung	485
6.3.3.1	Prozess	485
6.3.3.2	Materialien	487
6.3.3.3	Organisation	488
6.3.3.4	Konstruktion.	489
6.3.3.5	Qualitätssicherung.	490
6.3.3.6	Logistik	491
6.4	Fertigungsanlagen zur Realisierung des Rapid Manufacturing.	492
6.4.1	Additive Fertigungsanlagen als Elemente einer Fertigungskette . .	492
6.4.1.1	Industrielle Komplettfertigung.	493
6.4.1.2	Individuelle Komplettfertigung (Personal Fabrication) . .	495
6.4.2	3D-Drucker als Flexible AM-Systeme (FAMS)	496
6.4.2.1	Vom Personal 3D-Drucker zum Flexiblen Additive Manufacturing System, FAMS	497
6.4.2.2	Concept Laser, Factory of Tomorrow	498
6.4.2.3	EOS M400	499

6.4.2.4	Additive Industries (AI) MetalFAB1	499
6.5	Anwendungen des Direct Manufacturing	501
6.5.1	Anwendungsfelder nach Werkstoffen	501
6.5.1.1	Metallische Werkstoffe und Legierungen	501
6.5.1.2	Hochleistungskeramiken	502
6.5.1.3	Kunststoffe	504
6.5.1.4	Neue Werkstoffe	504
6.5.2	Anwendungsfelder nach Branchen	505
6.5.2.1	Werkzeugbau	505
6.5.2.2	Gießereiwesen	507
6.5.2.2.1	Dentaltechnik	508
6.5.2.2.2	Schmuckindustrie	509
6.5.2.3	Medizinische Geräte und Hilfsmittel, Medizintechnik ..	511
6.5.2.3.1	Zahnspangen: Aligner – Invisalign	511
6.5.2.3.2	Hörgeräteschalen, Otoplastiken	512
6.5.2.3.3	Technische Medizingeräte	514
6.5.2.4	Design und Kunst	515
6.5.2.5	Automobilbau	521
6.6	Perspektiven	524
7	Sicherheitsvorschriften und Umweltschutz	527
7.1	Gesetzliche Grundlagen für das Betreiben und das Herstellen von Generativen Fertigungsanlagen und den Umgang mit den zugehörigen Werkstoffen	529
7.1.1	Baurecht	529
7.1.2	Wasserrecht	530
7.1.3	Gewerberecht	531
7.1.4	Immissionsschutzrecht	533
7.1.5	Abfallrecht	534
7.1.6	Chemikalienrecht	535
7.1.6.1	Sicherheitsdatenblätter	537
7.1.6.2	REACH	538
7.2	Anmerkungen zu Materialien für die Generative Fertigung	539
7.3	Anmerkungen zur Benutzung von additiv gefertigten Bauteilen	541
8	Aspekte zur Wirtschaftlichkeit	543
8.1	Strategische Aspekte	544
8.1.1	Strategische Aspekte für den Einsatz additiver Verfahren in der Produktentwicklung	544
8.1.1.1	Qualitative Ansätze	544
8.1.1.2	Quantitative Ansätze	545

8.2	Operative Aspekte	546
8.2.1	Auswahl geeigneter additiver Fertigungsverfahren	547
8.2.2	Ermittlung der Kosten von Additiv-Manufacturing-Verfahren	547
8.2.2.1	Variable Kosten	548
8.2.2.2	Fixkosten	550
8.2.3	Charakteristika additiver Fertigungsverfahren und ihre Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit	553
8.3	Make or buy?	559
9	Zukünftige Rapid Prototyping-Verfahren	561
9.1	Mikrobauteile	561
9.1.1	Mikrobauteile aus Metall und Keramik	562
9.1.2	Mikrobauteile aus Metall und Keramik mittels Laserschmelzen	562
9.1.2.1	Schmelzvorgang beim selektiven Laserschmelzen	563
9.1.2.2	Mikrostrukturen aus Metallpulver	564
9.1.2.3	Mikrostrukturen aus Keramikpulver	566
9.2	Contour Crafting	569
9.3	D-Shape-Prozess	570
9.4	Selective Inhibition of Sintering (SIS)	572
9.4.1	SIS-Polymer-Prozess	572
9.4.2	SIS-Metall-Prozess	573
9.4.3	Continuous Liquid Interface Production (CLIP) – Carbon 3D	575
9.5	Fazit, Trends und Ausblick	578
9.5.1	Trends	578
9.5.2	Ausblick	578
10	Anhang	581
	Kritische Erfolgsfaktoren und Wettbewerbsstrategien	581
	Wirtschaftlichkeitsmodell nach Siegart und Singer	582
	Technische Daten und Informationen	587
	CAD-Systeme und Software für die additive Fertigung	588
	Additive Fertigungsanlagen (Prototyper und Fabrikatoren)	588
	Werkstoffe für additive Prozesse und Gießharze	589
	Begriffe und Abkürzungen	668
11	Literaturverzeichnis	679
	Stichwortverzeichnis	689

1

Einordnung und Begriffsbestimmung

Zur Einordnung der „*Additiven Fertigungsverfahren*“ ist es hilfreich, sich mit der Systematik der Fertigungsverfahren insgesamt zu befassen.

■ 1.1 Systematik der Fertigungsverfahren

Im Deutschen werden die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 sehr detailliert in sechs Hauptgruppen mit zahlreichen tief gestaffelten Untergruppen eingeteilt [DIN 8580], [Witt06]. Zur Diskussion der *Additiven Fertigungsverfahren* ist die im angelsächsischen gebräuchliche gröbere Einteilung besser geeignet [Burns93]. Sie orientiert sich ausschließlich an der Erzeugung der Geometrie. Danach wird die Gesamtheit der Fertigungsverfahren unterschieden in:

- Subtraktive Fertigungsverfahren
- Formative Fertigungsverfahren
- Additive Fertigungsverfahren.

Subtraktive Verfahren erzeugen die gewünschte Geometrie aus einem Halbzeug durch Abtragen definierter Bereiche, z. B. durch Drehen oder Fräsen. *Formative* Verfahren formen ein gegebenes Volumen in die gewünschte Geometrie um. Randbedingung ist die Volumenkonstanz. Beispiele sind das Schmieden oder das Tiefziehen. *Additive* Fertigungsverfahren schaffen die gewünschte Geometrie durch Aneinanderfügen von Volumenelementen. Diese Vorgehensweise wurde in der jüngeren Vergangenheit mit dem Begriff „Generative Fertigungsverfahren“ gekennzeichnet. Man nennt sie Schichtbauverfahren, wenn die Geometrie aus einzelnen Schichten zusammengesetzt wird.

Das Schichtbauprinzip beruht darauf, dass alle Körper (zumindest gedanklich) in Scheiben geschnitten und somit auch aus diesen Schnitten aufgebaut werden können. Dies verdeutlicht das auf Bild 1.1 dargestellte, sogenannte *Sculpture-Puzzle*: Eine Skulptur muss aus mehr als 100 – jeweils circa 1,5 mm dicken – horizontalen

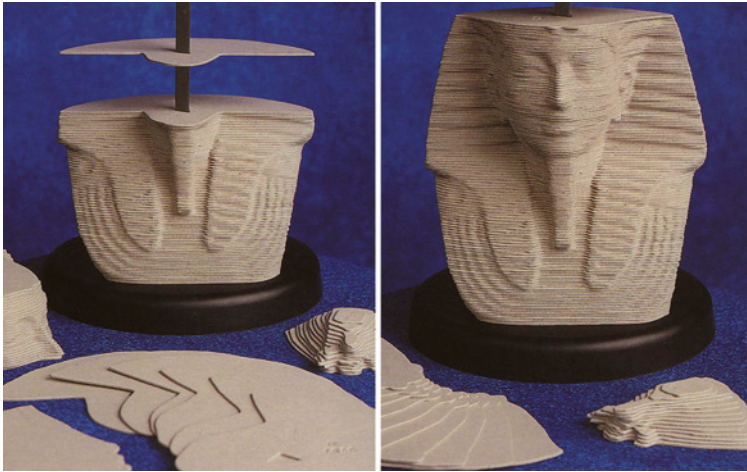


Bild 1.1 Schichtbauprinzip am Beispiel eines Sculpture-Puzzles
Quelle: HASBRO/MB Puzzle

Scheiben zusammengefügt werden. Das geschieht, indem die Schichten in der richtigen Reihenfolge (das ist die eigentliche Puzzle-Aufgabe) auf einer vertikalen Säule angeordnet werden.

Additive Fertigungsverfahren automatisieren das Schichtbauprinzip. Sie erzeugen die Einzelschichten und fügen sie Schicht für Schicht in der richtigen Reihenfolge aneinander. Beide Teilprozesse laufen computergesteuert ab und benötigen dazu lediglich die 3D-Computerdaten des Bauteils. *Additive Fertigungsverfahren* sind demnach dadurch gekennzeichnet, dass nicht nur die Geometrie, sondern simultan auch die Stoffeigenschaften während des Herstellprozesses entstehen.

■ 1.2 Systematik der Additiven Fertigungsverfahren

Im Folgenden werden die Begriffe erläutert, die im Kontext der Additiven Fertigungsverfahren gebräuchlich sind. Die mit diesen Begriffen verbundenen Eigenschaften sowie ihre Wechselwirkungen im Sinne einer Hierarchie werden dargestellt.

Verwendet werden die heute akzeptierten generischen Bezeichnungen. Alternativ gebrauchte Bezeichnungen werden diesen gegenübergestellt. Davon abzugrenzen sind Produktnamen und Herstellerbezeichnungen, die in der Praxis oft mit den generischen Namen vermischt werden. Das führt häufig zu Verwirrungen. Die Produktnamen und Herstellerbezeichnungen werden in Kapitel 3 „Additive Ferti-

gungsverfahren für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing“ gemeinsam mit den Maschinen aufgeführt und den generischen Bezeichnungen zugeordnet.

1.2.1 Begriffsbestimmungen

Als *Additive Fertigungsverfahren* werden alle Fertigungsverfahren bezeichnet, die Bauteile durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen (Voxeln), vorzugsweise schichtweise, automatisiert herstellen.

Additive Manufacturing ist das englische Pendant zum deutschen Begriff Additive Fertigungsverfahren. Beide Bezeichnungen sind genormt; in Deutschland in der VDI Richtlinie VDI 3405) [VDI 3405] und in den USA durch die gemeinsamen ISO/ASTM Standards [ISO/ASTM 52900:2015].

3D Printing, im Deutschen *3D-Drucken*, verdrängt zurzeit alle anderen Bezeichnungen. Das liegt vor allem daran, dass dieser Begriff sehr einfach zu vermitteln ist. Jeder, der ein Textprogramm (einen Word-Prozessor) bedienen und das Ergebnis mithilfe eines 2D-Druckers als Brief ausdrucken kann, versteht unmittelbar, dass mithilfe eines Konstruktionsprogramms (eines Part Prozessors) und eines 3D-Druckers ein dreidimensionales physisches Bauteil entstehen kann.

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.

3D-Drucken und *3D Printing* als generischer Begriff ist nicht mit dem gleichnamigen Pulver-Binder-Verfahren (Abschnitt 3.6 „Three Dimensional Printing (3DP)“) zu verwechseln.

1.2.2 Eigenschaften der Additiven Fertigungsverfahren

Die *Additiven Fertigungsverfahren* weisen vor allem aufgrund des Schichtbauprinzips besondere Eigenschaften auf:

- Die Generierung der Schichtgeometrie erfolgt direkt aus den 3D-CAD-Daten.
- Es ist kein Einsatz produktspezifischer Werkzeuge notwendig.
- Die Erzeugung der mechanisch-technologischen Eigenschaften (Materialeigenschaften) geschieht während des Bauprozesses.
- Die Bauteile können grundsätzlich in jeder beliebigen Orientierung gebaut werden (Entfall der Spannproblematik).

- Alle heute auf dem Markt befindlichen Maschinen können mit dem gleichen (STL)-Datensatz angesteuert werden.

Additive Fertigungsverfahren gewährleisten damit die direkte Umsetzung der 3D-CAD-Daten (des virtuellen Bauteils) in ein physisches Bauteil.

Aus dem gleichen Datensatz können durch Skalieren Bauteile von unterschiedlicher Größe und aus unterschiedlichen Materialien hergestellt werden. Die Türme eines Schachspiels, Bild 1.2, wurden auf der Basis des gleichen Datensatzes auf unterschiedlichen Maschinen gebaut. Die Materialien reichen von Formsand über Stärkepulver, Acrylate und Epoxidharze bis zu Metall.

Eines der größten additiv gefertigten Bauteile ist ein circa 2,5 m hoher Turm aus Formsand. In Bild 1.3 ist er im Größenvergleich zum Voxeljet-Geschäftsführer und Technologieentwickler Ingo Ederer abgebildet.

Im Kontrast dazu zeigt Bild 1.4 einen circa 5 mm hohen Turm, wie er durch das Mikro-Lasersintern entsteht.

Mit additiven Verfahren können Geometrien gefertigt werden, die mit subtraktiven oder formativen Verfahren nicht oder nur bedingt herstellbar sind. Der Turm enthält eine interne Wendeltreppe mit einer zentralen doppelten Wendel. Das Detail ist, wie in Bild 1.5 zu sehen, offensichtlich nur additiv herzustellen.

Ein anderes Beispiel für Geometrien, die nur generativ herstellbar sind, zeigt Bild 2.5.



Bild 1.2 Additive Fertigung. Aus dem gleichen Datensatz abgeleitete, aber mit unterschiedlichen Verfahren hergestellte Türme.

Große Türme (von links): Formsand (3D Printing, *ExOne*)

Stärkepulver (3D Printing, *3D Systems*). Höhe etwa 20 cm.

Kleine Türme (von links): PMMA (3D-Drucksystem, *Voxeljet*), Metall (Lasersintern, *EOS*), Acrylat, transparent (Stereolithographie, *EnvisionTEC*). Höhe etwa 3 cm

Quellen: Hersteller

**Bild 1.3**

Turm aus Formsand, Höhe circa 2,5 m, 3D-Drucken von Formsand

Quelle: voxeljet

**Bild 1.4** Schachspiel aus Metall mit Türmen, Höhe circa 5 mm, Mikro-Lasersintern

Quelle: 3D Micromac/EOS

**Bild 1.5**

Internes Detail eines Turmes aus Formsand
(wie Bild 1.2 hinten links)

Quelle: 3D Systems

■ 1.3 Einteilung der Additiven Fertigungsverfahren

Für eine exakte Strukturierung ist die Unterscheidung in Technologie und Technik hilfreich. Aus methodischer Sicht bezeichnet Technologie die Lehre von den Prinzipien und den Wirkungsweisen einer Disziplin im Sinne einer Verfahrenskunde. Unter Technik (aus dem Griechischen *téchne*: Kunst, Fertigkeit) wird die technische Umsetzung dieser Prinzipien im Sinne einer Anwendung verstanden. Entsprechend wird beispielsweise die Technologie der spanenden Fertigungsverfahren deutlich von ihren Anwendungen, z. B. dem Fräsen oder Schleifen unterschieden.

Die Technologie der *Additiven Fertigungsverfahren* (Additive Manufacturing/3D Printing) gliedert sich in die Anwendungen zur Herstellung von Prototypen und Modellen (*Rapid Prototyping*) sowie zur Fertigung von Produkten (*Rapid Manufacturing*). Die Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen wird üblicherweise mit *Rapid Tooling* bezeichnet, obwohl sie technologisch keine eigene Gruppe begründet, sondern je nach Bauteil dem Rapid Prototyping oder dem Rapid Manufacturing zuzuschlagen ist und damit eine Querschnittsmenge bildet (Bild 1.6).

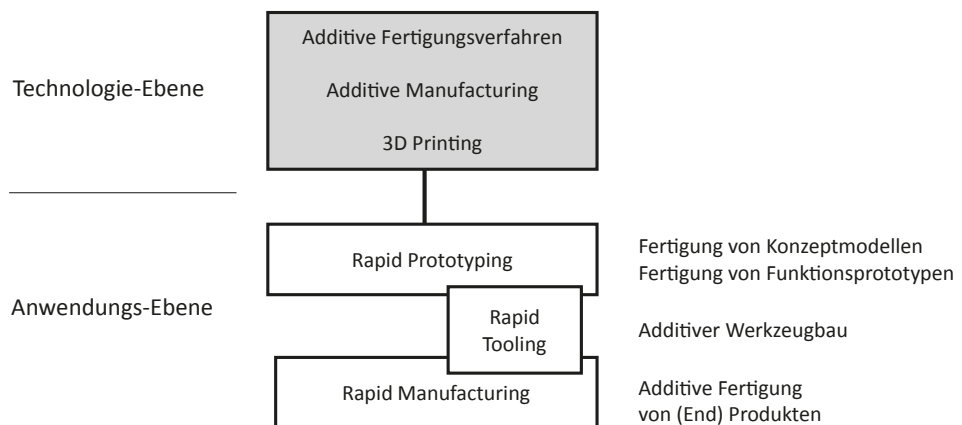


Bild 1.6 Technologie der Additiven Fertigungsverfahren/Additive Manufacturing/3D Printing und ihre Gliederung in die Anwendungen Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing und Rapid Tooling

1.3.1 Rapid Prototyping

Rapid Prototyping bezeichnet die Anwendung der Technologie der *Additiven Fertigungsverfahren* zur Herstellung von Modellen und Prototypen, also von physischen Bauteilen ohne Produktcharakter. Die Bauteile weisen lediglich einzelne, für die

jeweilige Anwendung besonders repräsentative Eigenschaften eines späteren Produktes auf. Sie sind somit gegenüber dem späteren Produkt durch eine größtmögliche Abstraktion gekennzeichnet. Ziel ist es, sehr schnell möglichst einfache, aber aussagekräftige Modelle herzustellen, um damit möglichst frühzeitig einzelne Produkteigenschaften abzusichern. Rapid Prototyping Bauteile sind daher im Sinne der bestimmungsgemäßen Verwendung des zu entwickelnden Produktes meist nicht einsetzbar. Das wird auch bewusst nicht beabsichtigt und meist schon durch die Bezeichnung *Modelle* unterstrichen. *Serienidentische Prototypen* gibt es folglich nicht, auch wenn der Begriff zur Verdeutlichung eines strategischen Ziels zuweilen beschönigend eingesetzt wird.

Wenn ein Rapid Prototyping Modell im Wesentlichen der 3D-Visualisierung dient, nennt man es Konzeptmodell, Solid Image (dreidimensionale Abbildung) oder Mock-Up respektive Rapid Mock-Up (Attrappe, Lehrmodell). Die Verfahren heißen analog *Solid Imaging* oder *Concept Modeling*¹ (Bild 1.7).

Wenn ein Rapid Prototyping Bauteil einzelne Funktionen aufweist und zur Absicherung von Produkteigenschaften eingesetzt wird, nennt man es Funktionsprototyp und den Herstellungsprozess *Functional Prototyping*.

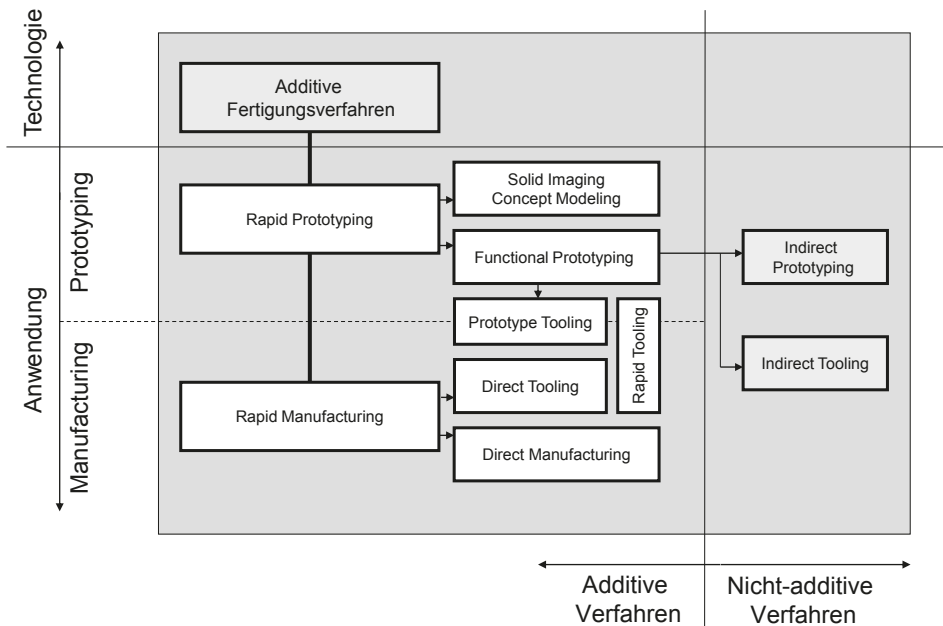


Bild 1.7 Struktur der Technologie der Additiven Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von ihren Anwendungen Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing

¹ Die angelsächsischen Begriffe werden häufig auch im Deutschen verwendet. Weil Rapid Prototyping im Deutschen ebenfalls Rapid Prototyping genannt wird, geschieht dies bewusst auch in diesem Buch. Gelegentlich finden sich in der Literatur auch (teilweise) eingedeutschte Bezeichnungen.

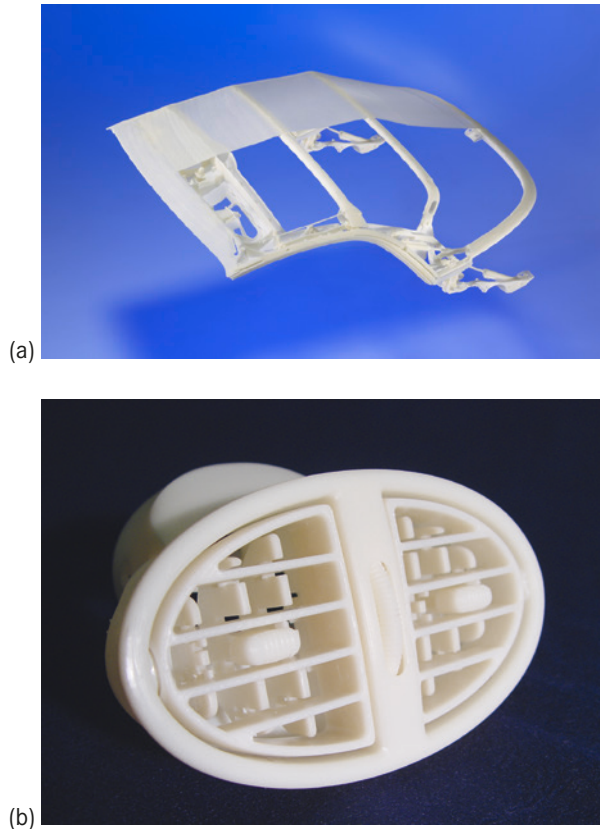


Bild 1.8 Rapid Prototyping: Konzeptmodell oder Solid Image

(a) Cabriodach, *Quelle: CP-GmbH*

(b) Funktionsprototyp „Ausströmdüse“, *Quelle: 3D Systems*

Je ein Beispiel für ein Konzeptmodell und einen Funktionsprototyp ist im Bild 1.8 dargestellt. Auf die dazugehörigen AM-Prozesse wird in Kapitel 3 „Additive Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing“ und auf Anwendungen in Kapitel 4 „Rapid Prototyping“ eingegangen.

1.3.2 Rapid Manufacturing

Rapid Manufacturing bezeichnet die Anwendung der *Additiven Fertigungsverfahren* zur Herstellung von Bauteilen, die die Eigenschaften von Endprodukten (häufig auch ungenau: Serienprodukten, allgemein: Zielteilen; Kapitel 6, „Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing“ (siehe Kapitel 6, Fußnote 1) aufweisen. Diese können sowohl Positive, beispielsweise Stecker und dergleichen als Einzelstücke oder in Kleinstserien, als auch Negative, also Werkzeuge oder Werkzeugeinsätze, sein.

Die generative Herstellung von Bauteilen (Positiven) wird *Direct Manufacturing*, die von Werkzeugeinsätzen und Werkzeugen *Direct Tooling* genannt (Bild 1.7).

1.3.2.1 Rapid Manufacturing – Direct Manufacturing

Die direkte additive Fertigung von (End)Produkten nennt man *Direct Manufacturing (DM)*. Häufig und aus historischen Gründen wird sie ebenfalls *Rapid Manufacturing (RM)* genannt und so direkt mit dem Oberbegriff assoziiert. Gebräuchlich sind auch: *e-Manufacturing*, *Digital Manufacturing*, *Tool-less Fabrication* und andere.

Direct Manufacturing fußt auf der gleichen Technologie wie das Rapid Prototyping und verwendet (heute noch) die gleichen Maschinen. Das Ziel ist die Fertigung von Bauteilen mit Endprodukt-Charakter. Ob das gelingt, hängt davon ab, ob die der Konstruktion zugrunde liegenden mechanisch-technologischen Eigenschaften mit den verfügbaren Materialien und Prozessen erreicht werden können, die geforderten Genauigkeiten zu realisieren sind und ob ein wettbewerbsfähiger Preis dargestellt werden kann. Als Beispiel für ein mittels Direkt Manufacturing hergestelltes Bauteil ist auf Bild 1.9 (a) eine dreigliedrige Brücke dargestellt. Auf die dazugehörigen AM-Prozesse wird in Kapitel 3 „Additive Fertigungsverfahren für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing“, auf Anwendungen in Kapitel 6 „Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing“ eingegangen.



(a)



(b)

Bild 1.9 Rapid Manufacturing

(a) Direct Manufacturing, *Quelle: Bego*

(b) Direct Tooling, *Quelle: EOS*

1.3.2.2 Rapid Manufacturing – Direct Tooling (Rapid Tooling – Prototype Tooling)

Direct Tooling bezeichnet die additive Herstellung von Werkzeugeinsätzen, Werkzeugen, Lehren und Formen. Im Englischen spricht man auch von *Mold Making* und von *Pattern Making*.

Dass man die Fertigung von Negativen mit dem eigenen Namen *Rapid Tooling* belegt, hat historische Gründe. Die direkte Herstellung von Werkzeugeinsätzen ist älter als die direkte Fertigung von Endprodukten und wurde vor allem unter Marketinggesichtspunkten als Weiterentwicklung des Rapid Prototyping eingeführt. Deshalb finden sich in der Literatur auch Einteilungen der generativen Fertigungsverfahren, die dem Rapid Tooling eine eigene Anwendungsebene zusprechen.

Tatsächlich ist die Herstellung einsatzfähiger Werkzeuge direkt im generativen Prozess dem Rapid Manufacturing zuzuordnen. Sie wird *Direct Tooling* oder, um den generativen Charakter zu unterstreichen, *Direct Rapid Tooling* genannt (Bild 1.7). Ein Beispiel für ein mittels Direct Tooling hergestelltes Werkzeug zur Fertigung von Golfbällen ist auf Bild 1.9 (b) zu sehen.

Davon zu unterscheiden ist das sogenannte *Prototype Tooling*. Prototype Tooling bezeichnet die Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen aus Modell- und Prototypmaterialien, beispielsweise aus Stereolithographie-Material (vergleiche Abschnitt 5.4.1.2.1 „ACES Injection Molding, AIM“). Es ist deshalb dem Functional Prototyping zuzuordnen. Prototype Tooling wird auch *Bridge Tooling* genannt, weil es geeignet ist, die Kluft zwischen Prototyp- und Serienwerkzeugen zu überbrücken.

Rapid Tooling bezeichnet somit keine horizontale Anwendungsebene der Technologie der additiven Fertigungsverfahren, sondern fasst im Sinne einer vertikalen Gliederung unterschiedliche Anwendungen zur Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen zusammen (Bild 1.7).

1.3.3 Nicht-additive Verfahren – Indirect Prototyping und Indirect Tooling

Die Begriffe *Indirect Prototyping* und *Indirect Tooling* bezeichnen keine additiven Verfahren. Indirekt heißen Prozessketten, die auf dem Abformen von additiv gefertigten Urmodellen basieren, selbst aber nicht-additiv arbeiten. Beispiele sind Abformverfahren wie Vakuumgießen und verwandte Prozesse.

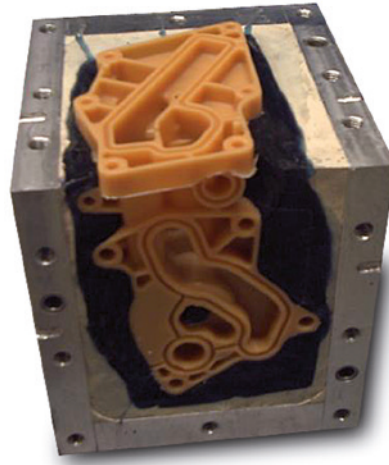
Wenn durch indirekte Verfahren Bauteile (Positive) entstehen, nennt man den Prozess *Indirect Prototyping* (Bild 1.10 (a)), entstehen Negative (Formen) heißt er *Indirect Tooling* (Bild 1.10 (b)). Die Abformverfahren werden unpräzise, ebenfalls als Rapid Prototyping oder Rapid Tooling-Verfahren bezeichnet. Dazu trägt auch bei, dass das Indirekte Tooling im Amerikanischen häufig als *Secondary Rapid Prototyping Application* bezeichnet wird.

In der Praxis wird vor allem der Begriff Rapid Tooling häufig auch dann gewählt, wenn die Verfahren nicht-additiv arbeiten. Dies geschieht bewusst zur Steigerung der Attraktivität der Verfahren.

Auf die Anwendung der additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von Werkzeugen wird im Kapitel 5 „Rapid Tooling“ detailliert eingegangen.



(a)



(b)

Bild 1.10 Indirekte Prozesse(a) Indirect Prototyping, *Quelle: CP-GmbH*(b) Indirect Tooling, *Quelle: BeNe Gusstechnik GmbH*

1.3.4 Rapid Prototyping oder Rapid Manufacturing?

Die Frage, ob wir es nun mit *Rapid Prototyping* oder *Rapid Manufacturing* zu tun haben, ist häufig scheinbar nicht eindeutig zu beantworten. Tatsächlich kann das gleiche Bauteil ein Prototyp oder ein Produkt sein und folglich das Produktionsverfahren Rapid Prototyping (hier: Functional Prototyping) oder Rapid Manufacturing (hier: Direkt Manufacturing) heißen. Wenn ein Bauteil für die additive Herstellung konstruiert wurde und alle in der Konstruktion festgelegten Eigenschaften aufweist, ist es ein Produkt. Wenn es aber beispielsweise zur Herstellung aus dem Kunststoff PEEK konstruiert wurde, dann aber generativ aus Polyamid (PA) hergestellt wird, ist es (bestenfalls) ein Prototyp.

Material und Verfahren spielen bei dieser Diskussion keine Rolle. Ein Bauteil aus Papier oder Gips kann z. B. durchaus ein Produkt sein.

Der Begriff Rapid Prototyping wird zunehmend auch von klassischen Fertigungsverfahren vereinnahmt, die damit ihre besondere Schnelligkeit ausdrücken oder auch einfach nur eine moderne Bezeichnung verwenden wollen.

1.3.5 Begriffsvielfalt

Anstelle des Begriffs „Additive Fertigungsverfahren“ im Sinne einer generischen Bezeichnung werden oft auch alternative Bezeichnungen verwendet. Ihre Bedeutung ändert sich zuweilen auch mit der Zeit.

Rapid Prototyping war Ende der 1980er-Jahre die Bezeichnung für die ersten additiven Verfahren und ihre Anwendungen. Deshalb werden alle verwandten Verfahren bis heute mit dem Attribut „rapid“ identifiziert und, auch im Deutschen, Rapid ... ing genannt. Die Bezeichnung Rapid Prototyping war zu diesem Zeitpunkt korrekt. Die Verfahren führten viel schneller zu Bauteilen als die bis dato bekannten, weil erstmalig die Herstellung von Werkzeugen entfallen konnte. Sie waren insofern „rapid“. Die Bauteile konnten aber nur als Prototypen verwendet werden, weil die Verfahren die Herstellung von nur wenigen Exemplaren erlaubte, die zudem aus kaum belastbarem Material bestanden.

Rapid Technologie wird im Deutschen auch neben den genormten Begriffen Additive Manufacturing, Additive Fertigungsverfahren und 3D-Drucken verwendet.

Das Gleiche gilt für die Benennung Schichtbauverfahren bzw. schichtorientierte Fertigungsverfahren. Sie werden im Englischen als *Layer Manufacturing* oder *Additive Layer Manufacturing (ALM)* bezeichnet, wobei anstelle von Manufacturing auch *Fabrication*, seltener *Production*, verwendet wird.

In der Literatur gibt es darüber hinaus eine Vielzahl von Bezeichnungen, die oft den Anspruch erheben, als umfassender Oberbegriff zu gelten. Tatsächlich stellen sie meist einzelne Aspekte der Bauteilherstellung in den Vordergrund. *Solid Freeform Manufacturing (SFM)* betont die Eigenschaft, Festkörper (Solids) herzustellen, die durch Freiformflächen berandet werden. *Desktop Manufacturing (DMF)* weist auf die Herstellung der Bauteile in einer Büroumgebung (auf dem Schreibtisch) hin.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von (vorzugsweise amerikanischen) Bezeichnungen, die meist in der Gestalt von drei (zunehmend auch vier) Buchstabenabkürzungen auftreten und häufig eher verwirren als erklären. Die gebräuchlichsten sind im Text erklärt oder im Anhang „*Begriffe und Abkürzungen*“ aufgeführt.

In der Praxis werden die exakten Begriffe nicht konsequent verwendet. Oft werden nicht einmal generische Bezeichnungen und Oberbegriffe von Verfahrens- und Produktnamen unterschieden. So sprechen viele davon, dass sie Stereolithographie einsetzen, wenn sie additive Verfahren insgesamt meinen.

1.3.6 Wie schnell ist Rapid?

In den Definitionen kommt häufig der Prefix „Rapid“, also „schnell“ vor. Er ist sicher nicht der geeignetste, möglicherweise sogar einer der schlechtesten, die zur Wahl stehen. Rapid sagt bei näherem Hinsehen gar nichts. „Schnell“ ist relativ. Eine Qualität bekommt der Begriff „rapid“ nur, wenn gesagt wird „wie schnell“ oder „schneller als was“ er abläuft. Zudem liegt eine gewisse Gefahr in dem Begriff „Rapid“. „Schnell“ könnte signalisieren, dass die Verfahren grundsätzlich, also verfahrensbedingt, schneller sind als andere. Dies gilt so nicht und kann insbesondere nicht verallgemeinert werden. Die Schnelligkeit der Rapid Prototyping-Verfahren ist stark geometrieabhängig. Wer lediglich eine Platte von 250 × 250 × 10 mm benötigt, greift zum Halbzeug und zur Säge. Schneller ist kein *Additives Fertigungsverfahren*. „Schnell“ sind additive Verfahren also nur unter bestimmten Bedingungen; beispielsweise wenn die Konstruktion und Fertigung von Werkzeugen vermieden werden kann oder unter dem Aspekt einer von Losgrößen unabhängigen Fertigung individualisierter Produkte.

Die Begriffe Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing haben aber einen unschlagbaren praktischen Vorteil: Sie sind akzeptiert und werden international verstanden. Sie haben sich als Synonyme für computergesteuerte und daher automatisierte Verfahren zur Fertigung von Prototypen und Produkten in die Köpfe eingepreßt. Sie sprechen für sich und erfüllen so die wichtigste Voraussetzung eines generischen Begriffs. In diesem Buch werden daher neben der exakten Bezeichnung *Additive Fertigungsverfahren* auch *Rapid Prototyping*, und *Rapid Manufacturing* mit seinen Untergliederungen *Rapid Tooling* und *Direct Manufacturing* verwendet.

■ 1.4 Integration der Additiven Fertigungstechnik in den Produktentstehungsprozess

Additive Fertigungsverfahren sind, der Name unterstreicht das, Verfahren zur Herstellung von Bauteilen. Aufgrund ihrer Eigenschaften (Abschnitt 1.2.2 „Eigenschaften der Additiven Fertigungsverfahren“) sind sie über die eigentliche Fertigung hinaus in besonderem Masse geeignet, vorhandene Prozesse zu verbessern, neuartige Produkte oder Produkteigenschaften zu realisieren und die Entwicklung neuartiger Produktentwicklungsstrategien zu unterstützen.

1.4.1 Additive Verfahren in der Produktentwicklung

Die industrielle Produktentstehung umfasst die Zeitspanne von der ersten Produktidee bis zur Präsentation des Produktes auf dem Markt. Sie schließt die Entwicklung des Produktes, die Entwicklung und Fertigung der Produktionsmittel sowie die Fertigung des Produktes ein. Ziel aller Produzenten ist es, diese Zeitspanne ohne Einnahmen so kurz wie möglich zu halten und deshalb die Teilprozesse zu optimieren. Additiv gefertigte Bauteile sind aufgrund ihrer Herstellung ohne zeitraubende und kostenintensive Werkzeuge besonders geeignet, den Prozess der Produktentstehung zu beschleunigen und gleichzeitig zu verbessern. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn in den Phasen der Produktentstehung die jeweils optimalen additiven Verfahren eingesetzt werden. Dazu ist es vorteilhaft, die Korrelation zwischen den additiven Anwendungen (Bild 1.7) und den Phasen der Produktentstehung nach VDI 2221 ff. [VDI 2221] herzustellen (Bild 1.11).

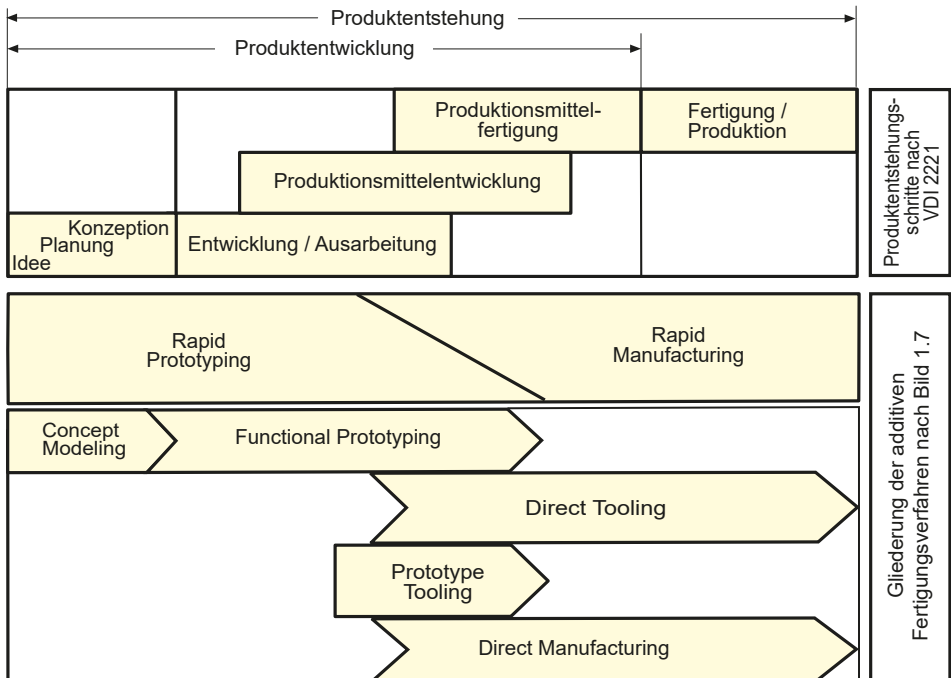


Bild 1.11 Produktentwicklungsphasen nach VDI 2221 (oben) und ihre Zuordnung gemäß Bild 1.7 zum Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing (Mitte), sowie zu deren Untergliederung in Concept Modeling, Functional Prototyping, Direct Tooling, Prototype Tooling und Direct Manufacturing (unten)

Der Produktentwicklung ist das Rapid Prototyping und der Fertigung (von Produktionsmittel und Produkt) das Rapid Manufacturing zuzuordnen, Bild 1.11 Mitte. Im Einzelnen wird die Ideenfindung, Planung und Konzeption durch das Concept Modeling und die Entwicklung und Ausarbeitung durch das Functional Prototyping unterstützt. Die Herstellung der Produkte erfolgt mittels Direct Manufacturing.

Werkzeuge und Formen werden durch das Rapid Tooling, also in der Prototypphase, mittels Prototype Tooling und in der Produktionsphase durch Direct Tooling realisiert (Bild 1.11, unten).

Eine feinere Struktur ergibt sich in Verbindung mit den Modellklassen, die im Kapitel 4 „Rapid Prototyping“ definiert und den Verfahrensfamilien aus Kapitel 3 „Additive Fertigungsverfahren für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing“ zugeordnet werden.

Die Übergänge sind in der Praxis fließend. Die Bereiche überlappen sich und hängen zudem stark vom jeweiligen Produkt ab. Auch müssen nicht notwendigerweise alle Anwendungen vorkommen.

1.4.2 Additive Verfahren für die stückzahl-unabhängige Produktion

Da die Herstellung schichtweise und ohne Werkzeuge erfolgt, ist es unerheblich, wie viele Bauteile in einem Bauraum parallel gefertigt werden und ob die Bauteile identisch oder voneinander verschieden sind. Additive Verfahren ermöglichen daher die stückzahlunabhängige Fertigung unterschiedlicher Bauteile in einem Bauprozess.

1.4.3 Additive Verfahren für die individualisierte Produktion

Neben dem Losgrößen-Effekt ermöglichen Additive Verfahren die Herstellung individuell veränderter Produkte und damit die Realisierung der mit werkzeuggebundenen Verfahren nicht zu verwirklichenden Strategie des „Customizing“.

Die Individualisierung kann durch konstruktive Überarbeitung des 3D-Datensatzes im 3D-CAD-System der Konstruktion erfolgen oder durch die Integration von Scandaten in eine bestehende Konstruktion (Bild 1.12).

Neben diesen industriell-professionellen Anwendungen werden in Bibliotheken (z. B. im Internet) zur Verfügung gestellte Produktdaten und einfach zu bedienende CAD-Systeme auch privaten Nutzern die direkte Herstellung von (Einzel-) Bauteilen ermöglichen.

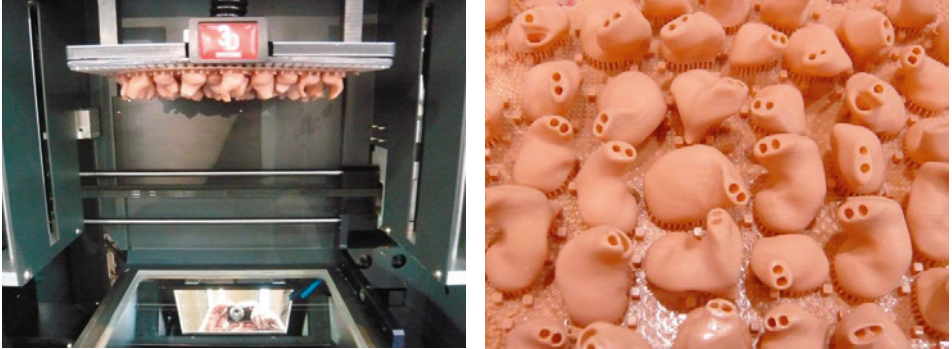


Bild 1.12 Individualisierte Produktion oder Customizing am Beispiel der Herstellung patientenindividueller Hörgeräteschalen
Quelle: 3D Systems

■ 1.5 Maschinen für die Additive Fertigung

Den Anwendungsebenen nach Bild 1.6 entsprechend werden Maschinen für die additive Fertigung (Additive Fertigungsanlagen) als Prototypen² bezeichnet, wenn sie für die Herstellung von Prototypen eingesetzt werden und als Fabrikatoren³, wenn es sich um Endprodukte handelt. Zunehmend werden alle als „Drucker“ bezeichnet. Da die Einteilung nach Bild 1.6 sehr grob ist, wird vorzugsweise eine Klassifizierung nach Modellklassen entsprechend Bild 1.7 gewählt.






Danach unterteilen sich die Maschinen in solche zur Herstellung von:

- Ansichts- und Konzeptmodellen,
 - Funktionsbauteilen (oder -prototypen),
 - Endprodukten (oder Komponenten davon)
 - Serienprodukten. (Endprodukte in großen Stückzahlen und beliebigen Chargen)
- und werden bezeichnet als:
- Fabber, Personal 3D-Drucker („Personal Grade“ 3D Printer).
 - Professional 3D-Drucker („Professional Grade“ 3D Printer).
 - Production 3D-Drucker („Production Grade“ 3D Printer).
 - Industrial 3D-Drucker („Industrial Grade“ 3D Printer).

² Der Begriff Prototypen wurde von Professor Erich Schmachtenberg, Universität Erlangen, heute RWTH Aachen, und dem Autor in einer Fachdiskussion auf der Euromold Fachmesse 1995 geprägt.

³ Der Begriff Fabrikator (im Englischen: Fabricator) wurde systematisch vor allem von Burns [Burns93] verwendet und vermutlich auch von ihm geprägt.

Tabelle 1.1 Einteilung der Maschinen für die additive Fertigung

Bezeichnung	3D-Drucker				
	Prototypen		Fabrikatoren		
	Fabber	Desktop Printer	Professional 3D-Drucker	Production 3D-Drucker	Industrial 3D-Drucker
Anwendung	Privat zu Hause	Semi-professionell im Büro	Professionell im Büro oder der Werkstatt	Professionell in der Produktion	Professionell in der Serienproduktion
Anwendungsebenen (Bild 1.7)					
Prototypen					
▪ Ansichtsmodelle	X				
▪ Konzeptmodelle		X			
▪ Funktionsbauteile			X		
▪ Endprodukte				X	X
Baumaterial	Kunststoff	Kunststoff	Kunststoff (Metall)	Kunststoff, Metall, Keramik	Metall
Preisniveau	500 bis 4.000 €	1.000 bis 10.000 €	20.000 bis 70.000 €	130.000 bis 900.000 €	1.200.000 bis über 2 Mio. €
Beispiel					

* Die Bezeichnungen sind nicht genormt und werden von unterschiedlichen Herstellern und Anwendern unterschiedlich gehandhabt. Die hier verwendeten lehnen sich an den Vorschlag von 3D Systems an und folgen einer in der Praxis häufig verwendeten Systematik.

Anstelle von Drucker tritt auch im Deutschen oft die Bezeichnung Printer. Die Zusammenhänge sind in Tabelle 1.1 dargestellt.

1.5.1 Fabber, Personal 3D-Drucker/Personal 3D Printer

Kleine, einfach zu bedienende und einfach aufgebaute, preiswerte und vorzugsweise am Arbeitsplatz (semi-professionell) eingesetzte 3D-Drucker werden in Analogie zu Personal-Computern als Personal (3D)-Drucker bezeichnet.

Verarbeitet werden fast ausschließlich Kunststoffe (erste Maschinen zur Verarbeitung von Metallen, vorzugsweise vom Typ „Lote“, wurden vorgestellt).

Sie untergliedern sich in Fabber, Personal 3D-Drucker und Professional.

1.5.1.1 Fabber

Fabber sind vor allem im privaten Bereich eingesetzte 3D-Drucker, die in den meisten Fällen auch selbst gebaut oder montiert werden. Der Begriff Fabber ist die Kurzform von Fabricator (im Deutschen Fabrikator) und weist auf die dahinter steckende Philosophie hin, dass mit solchen Maschinen jeder alles herstellen kann. Entsprechend gibt es Web-basierte Blogs und Fabber Communities, die sich über den Bau und mögliche Modifikationen (pimpen) der Fabber austauschen und neue Kooperationsformen wie Cloud Fabling propagieren. Die Bediener schulen sich gegenseitig oder sind Autodidakten. Als Vorkenntnis reicht es aus, einen Computer bedienen zu können; als Infrastruktur genügt der Küchentisch.

1.5.1.2 Personal 3D-Drucker/Personal 3D Printer

Sind vorzugsweise im professionellen oder semi-professionellen Bereich eingesetzte 3D-Drucker. Sie sind an der unteren Preisgrenze angesiedelte Maschinen, aber keine Selbstbausysteme, sondern einfache, nach kurzer Schulung zu bedienende Drucker mit ausreichend hoher Genauigkeit. Die Produktivität steht eher im Hintergrund.

1.5.2 Professional 3D-Drucker/Professional 3D Printer

Als Professional 3D-Drucker oder Office Printer werden kompakte, einfach zu bedienende, wartungsarme und auch in einem Büro oder einer Werkstatt einsetzbare Maschinen bezeichnet, die aber insgesamt ein höheres Niveau bezüglich der Qualität der Anlage und der Bauteile aufweisen.

Sie verfügen über Materialwechselsysteme, eine Bauteilentnahme ohne Verschmutzung von Bedienern und Räumlichkeiten und über entsprechende externe Systeme zur Entfernung von Stützstrukturen. Die Bedienung wird als kurze Herstellerschulung vermittelt. Computer- und CAD-Kenntnisse sind von Vorteil. Es gibt keine besonderen Anforderungen an die Infrastruktur.

1.5.3 Production 3D-Drucker/Production 3D Printer oder Produktionsmaschinen

Maschinen, bei denen gleichmäßig hohe Qualität im Vordergrund steht, werden als Produktionsmaschinen oder Shop Floor (englisch: Produktionshalle) Maschinen bezeichnet. Sie verfügen meist über große Bauräume, ein (teil)automatisiertes Materialhandling sowie mehr und mehr über Zusatzeinrichtungen zur Nachbearbeitung. Ziele sind reproduzierbare Prozesse und Bauteile hoher Qualität. Die Produktivität spielt eine größere Rolle als bei den Professional 3D-Druckern. Die Anlagen sind größer und erzeugen für Produktionsmaschinen übliche Emissionen.

Ihr Einsatz erfordert deshalb eine Werkstatt und einen großen Installationsaufwand. Das Personal wird mit Unterstützung der Hersteller intensiv geschult.

1.5.4 Industrial 3D-Drucker

Industrial 3D-Drucker sind flexible Fertigungssysteme, flexible AM-Systeme (FAMS) genannt. Sie liefern eine mit den Production 3D-Druckern identische gleichbleibend hohe Bauteilqualität, und eine hohe Ausbringungsmenge. Die Produktivität spielt eine entscheidende Rolle. Manuelle Arbeiten sind auf ein Mindestmaß reduziert. Einrichtungen zur Überwachung und Regelung des Prozesses sind integriert. Ein mannloser Betrieb ist gewährleistet. Eine Mehrmaschinenbedienung ist möglich. Eine Produktionsinfrastruktur ist erforderlich.

1.5.5 Maschinenklassen und Bauteileigenschaften

Es gibt einen tendenziellen Zusammenhang zwischen den Maschinenklassen und den mit den Maschinen herstellbaren Bauteilen und ihren Eigenschaften. Personal 3D-Drucker liefern vorzugsweise Anschauungsobjekte oder nicht belastbare Bauteile mit eingeschränkter geometrischer Komplexität und geringer Detailtreue. Sie sind (aktuell 2016) wie die Professional 3D-Drucker auf die Verarbeitung von Kunststoffen beschränkt.

Professional 3D-Drucker erzeugen vorzugsweise Anschauungsobjekte oder wenig belastbare Bauteile, die aber über deutlich bessere Detailtreue verfügen und deshalb häufig mittels Folgeverfahren zu hochwertigen Endprodukten verarbeitet werden.

Production 3D-Drucker werden zur additiven Fertigung von Einzelstücken oder (Klein)Serien von unterschiedlichen Bauteilen eingesetzt und liefern nach externer verfahrenstypischer Nachbearbeitung einsatzfertige Bauteile. Sie sind für die Verarbeitung von Kunststoffen, Metallen oder Keramiken verfügbar.

Industrial 3D-Drucker werden zur additiven Fertigung von Serien beliebiger Größe von identischen oder unterschiedlichen Bauteilen eingesetzt. Sie integrieren die verfahrenstypische Nachbearbeitung und liefern einsatzfertige Bauteile. Sie sind bisher (2016) nur für die Verarbeitung von Metallen verfügbar.

Dieser tendenzielle Zusammenhang zwischen den Maschinenklassen und den mit den Maschinen herstellbaren Bauteilen folgt aber keiner Gesetzmäßigkeit. Es gibt mit Fabern hergestellte einfache Kunststoffklammern, die als Produkte eingesetzt werden und komplexe mit Produktionsmaschinen gefertigte Bauteile, z. B. innendurchströmte Turbinenschaufeln aus Kunststoff, die nur zur Anschauung eingesetzt werden können.

2

Merkmale der Additiven Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsanlagen unterliegen nach wie vor einem hohen Entwicklungstempo. Neue, zurzeit noch im Laborstadium oder in der Entwicklung befindliche Verfahren werden auf den Markt drängen. Gleichzeitig werden bewährte Systeme in relativ kurzen Zeitspannen im Detail überarbeitet (Updates) oder durch neuere Versionen ersetzt (Upgrades). Die heutigen Systeme werden daher in vergleichsweise kurzer Zeit nicht mehr oder nicht mehr ganz aktuell sein. Aus diesem Grund werden im Folgenden längerfristig gültige physikalisch-technologische Grundlagen und ihre kommerzielle Umsetzung getrennt behandelt. Die Grundlagen werden in diesem Kapitel ausführlich dargestellt und diskutiert. In Kapitel 3 „Additive Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing“ wird gezeigt, welche industriell angebotenen Anlagen sich aus welchen grundlegenden Verfahren ableiten. Dieses Vorgehen erleichtert nicht nur die Beurteilung der aktuellen Verfahren, sondern liefert auch die Grundlage für die Beurteilung zukünftiger industrieller Verfahren durch den Leser.

Bei diesem Vorgehen können Überschneidungen und Wiederholungen leider nicht immer vermieden werden.

■ 2.1 Verfahrensgrundlagen

Bei allen *Additiven Fertigungsverfahren* entstehen die Bauteile durch das Fügen von Schichten gleicher Dicke (Bild 1.1). Die Konturierung (Formgebung) jeder Schicht erfolgt in der x - y -Ebene, der sogenannten Bauebene und damit flächig (2D). Die dritte Dimension entsteht nicht als kontinuierliche z -Koordinate sondern durch das Aufeinanderfügen der Einzelschichten. Additive Verfahren sind deshalb streng genommen 2½D-Verfahren.

Die Bauteile sind in der Bauebene sehr präzise und in z -Richtung stufige dreidimensionale Gebilde, die dem Original umso genauer entsprechen, je kleiner die z -Stufung gewählt wird. Bild 2.1 zeigt als Beispiel ein dreidimensionales Volumenmodell

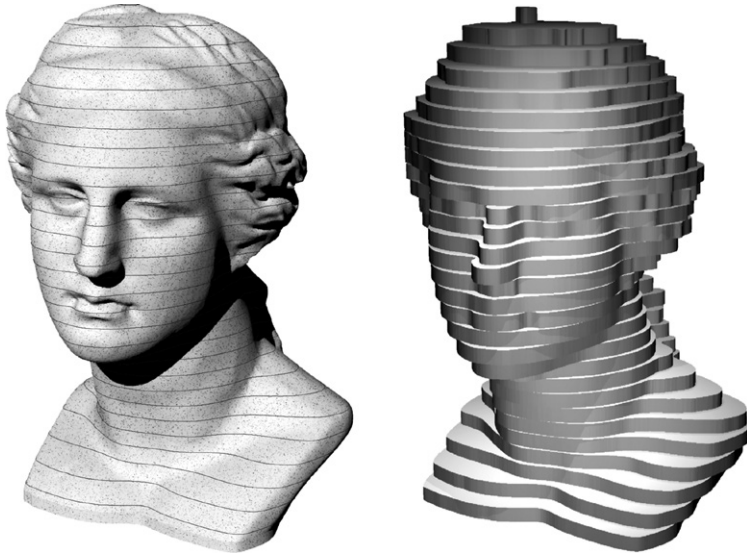


Bild 2.1 Stufige Oberfläche als Folge des Schichtbauverfahrens, Prinzip.
 Dreidimensionales Volumenmodell (links) mit angezeichneten äquidistanten Schichten und das daraus entwickelte Schichtenmodell (rechts)
 Quelle: FH Aachen

einer Plastik mit angezeichneten äquidistanten Schichtabständen und das daraus entstehende stufige Schichtenmodell.

Diese Treppenstufeneffekte sind ein Charakteristikum der *additiven Fertigungsverfahren*. Sie können durch Verringerung der Schichtdicke reduziert, aber nie ganz beseitigt werden. Bild 2.2 zeigt die Verhältnisse an einem realen Bauteil bei Schichtstärken um 0,125 mm.

Die Schichtstärken aktueller Maschinen betragen heute (2016) 0,1–0,05 mm und im Minimum 0,016 mm für Maschinen, die makroskopische Bauteile (charakteristische Abmessung: einige mm bis einige 100 mm) herstellen. Maschinen, die Mikrobauteile fertigen, arbeiten mit geringeren Schichtdicken bis in den 5 nm-Bereich. Größere Schichtdicken bis circa 0,2 mm und vereinzelt darüber werden bei den meisten Fabbern eingesetzt, aber auch bei anderen Maschinen gezielt zur Verkürzung der Bauzeit verwendet. Die Folge ist allerdings eine geringere Genauigkeit. Schichtfräsverfahren verwenden Platten mit bis zu 40 mm Dicke (Abschnitt 3.4.6 „Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann“).

Abhängig von der Art der Konturierung (scannen, plotten, etc.) und dem additiven Verfahren wird in der x - y -Bauebene kontinuierlich konturiert oder es treten an der Berandung Sekanten-Effekte (siehe auch: Bild 2.12 (a)) oder ebenfalls Treppenstufeneffekte auf, die aber meist viel weniger ausgeprägt sind als in z -Richtung. Deshalb haben additiv hergestellte Bauteile in x - y - und in z -Richtung unterschiedliche

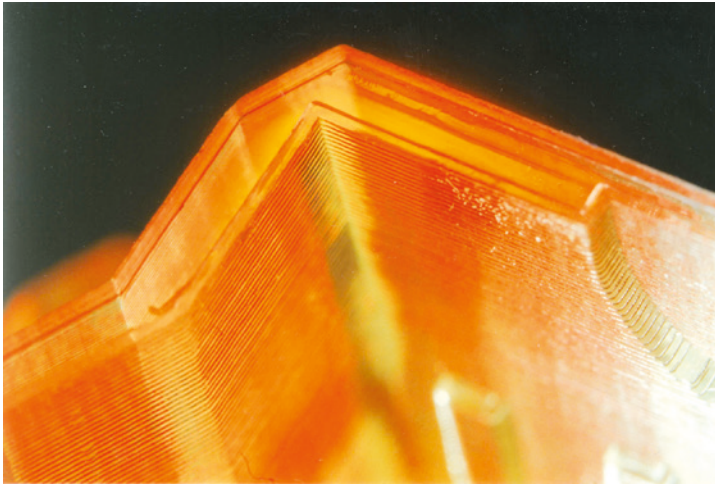


Bild 2.2 Treppenstufeneffekt an einem Stereolithographie-Bauteil (Schichtstärke 0,125 mm)
 Quelle: CP-GmbH, Foto: Gebhardt

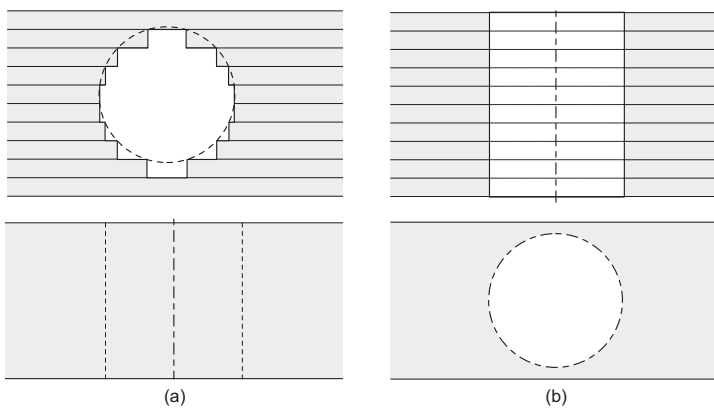


Bild 2.3 Prinzipbedingte Stufung bei schichtorientierten Verfahren am Beispiel einer Bohrung:
 (a) in der Schichtebene; (b) senkrecht zur Schichtebene

Genauigkeiten. Bild 2.3 zeigt dies schematisch. Gegenübergestellt sind eine Bohrung parallel zur Schichtebene und eine senkrecht dazu. Im Beispiel wird davon ausgegangen, dass in den Schichten (x - y -Ebene) kontinuierliche Kreiskonturen erzeugt werden.

Kontinuierliche Berandung in z -Richtung

Obwohl alle heute bekannten additiven Verfahren in dieser Weise als $2\frac{1}{2}$ D-Verfahren arbeiten, sind einige Verfahren (z. B. Extrusionsverfahren) grundsätzlich 3D fähig und könnten inkrementale Volumenelemente (Voxel) an jeder beliebigen Stelle des Bauteils anfügen. Dies wurde bisher technisch aber nicht umgesetzt. Es gibt jedoch zunehmend Ansätze, um das Problem der Stufigkeit zu überwinden.

Eine kontinuierliche z -Konturierung wird heute mit Schichtfräsverfahren erreicht (vergleiche Abschnitt 3.4.6 „Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann“), ist aber tatsächlich ein abtragendes Verfahren.

Die erste kommerzielle kontinuierlich arbeitende additive Maschine ist der Sanddrucker VXC 800 von Voxeljet (Vergleiche Abschnitt 3.6.5 „3D-Drucksystem-Voxeljet“).

Einen Durchbruch bezüglich Produktivität aufgrund einer um den Faktor 100 höheren Baugeschwindigkeit verspricht die CLIP Technologie (Continuous liquid interface production) von John Tumblestone. Dabei handelt es sich um einen Polymerisationsprozess nach dem Muster der DLP Geräte (Vergleiche Abschnitt 3.1.8 „Digital Light Processing -EnvisionTEC“). Die Verfestigung durch UV-Licht wird durch Inhibitoren (Sauerstoff) lokal so unterbunden (tote Zone), dass das Monomer kontinuierlich nachfließen kann und eine gezielte Verfestigung erst außerhalb dieser Zone realisiert wird. [Tumb15].

Es ist ein wichtiges Charakteristikum, aber kein Alleinstellungsmerkmal von additiven Verfahren, dass die Fertigung von physischen Bauteilen unmittelbar aus Computerdaten erfolgt. Der Datensatz muss das 3D-Volumen vollständig und fehlerfrei beschreiben. Dabei ist es unerheblich, welchen Ursprung die Daten haben. In der Technik stammen die Daten in der Regel aus 3D-CAD-Konstruktionen. Messwerte aller Art, z. B. von Koordinatenmessmaschinen, CT- oder MRT-Scannern und dergleichen oder von 3D Tracking-Systemen können gleichermaßen in physische Bauteile umgesetzt werden, wenn entsprechende Auswertprogramme die Aufbereitung der Messwerte in 3D-Datenmodelle ermöglichen.

Für das *Additive Manufacturing* können die additiv gefertigten Bauteile als dreidimensionale Plots oder Faksimiles der zugrunde liegenden CAD-Daten betrachtet werden. Der entscheidende Vorteil gegenüber klassischen manuellen oder teilautomatisierten Herstellungsverfahren besteht darin, dass die Daten im Zuge des Fertigungsprozesses nicht verändert werden, vor allem, dass die *Additive Fertigung* (mit Ausnahme der automatisch generierten Stützen) keine fertigungsbedingte Anpassung der Konstruktionen benötigt. Die Konstruktion wird für die additive Fertigung weder verändert, noch müssen Daten vom Bauteil abgenommen und in den Konstruktionsprozess zurückgeführt werden. Weil die gemeinsame Datenbasis nicht verändert wird, sind additive Verfahren zu einem wichtigen Element moderner Produktentwicklungsstrategien – wie dem *Simultaneous Engineering* – und damit zum integrierten Bestandteil der computergestützten Produktentstehung geworden. Mit der Verfügbarkeit additiver Anlagen zur direkten Fertigung (*Rapid Manufacturing*) ist das 3D-Datenmodell gleichzeitig Produktmodell und Fertigungsgrundlage. Damit ist *Additive Manufacturing* heute ein integrierter Bestandteil der direkten computergestützten Produktion.

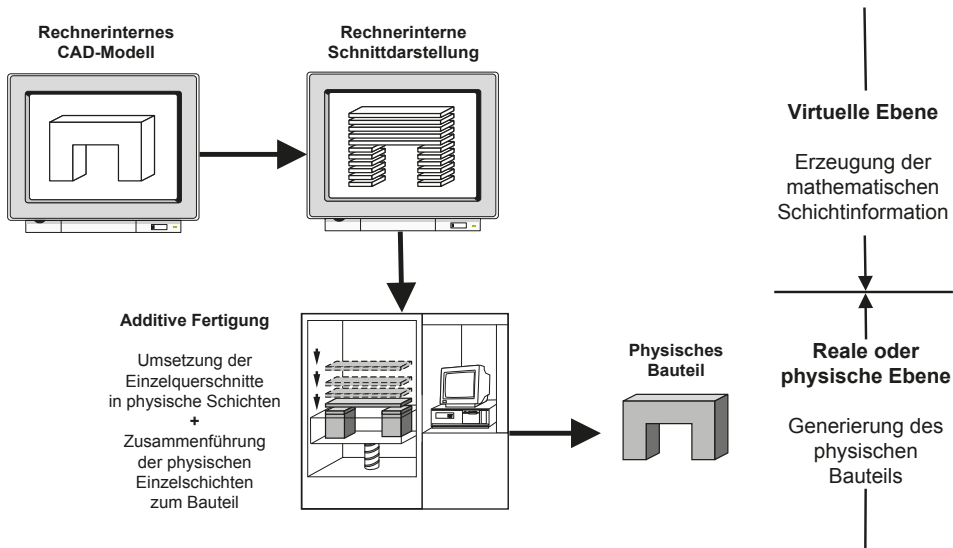


Bild 2.4 Prinzip der Additiven Fertigung

Der Vorteil gegenüber nicht-additiven computergesteuerten Fertigungsverfahren besteht in einem für alle heute verfügbaren additiven Maschinen gleichen und von allen verarbeitbaren Datenformat, dem sogenannten STL-Datensatz (vergleiche Abschnitt 2.2.2.1 „STL-Format“) und seinem leistungsfähigeren Nachfolger, dem AMF-Format (vergleiche Abschnitt 2.2.2.4 „AMF-Format“). Nicht-additive numerisch gesteuerte Verfahren, z. B. das CNC-Fräsen, verlangen in der Regel maschinenspezifische oder steuerungsspezifische Datensätze.

Das Prinzip der *Additiven Fertigung* oder des *Additive Manufacturing* zeigt Bild 2.4. Ausgangspunkt ist ein vollständig geschlossenes 3D-Volumenmodell. Zur Generierung eines Bauteils wird dieses CAD-Modell mit mathematischen Methoden in Schichten (von üblicherweise) gleicher Stärke geschnitten. Diese virtuelle Schichtinformation wird in einer additiven Fertigungsanlage in physische Schichten umgewandelt und die Einzelschichten werden zum vollständigen Bauteil aufeinander geschichtet. Abhängig vom Verfahren geschieht die Verbindung zwischen den Schichten während der Generierung der neuen Schicht oder nach deren Fertigstellung. Das physische Bauteil kann ein Prototyp oder Endprodukt sein.

Das Schichtbauprinzip erlaubt die Fertigung geometrisch komplexer Strukturen, die mit traditionellen Verfahren nicht oder nur sehr aufwendig zu realisieren sind. Es gewährt weitestgehend Geometriefreiheit und öffnet so den Weg zu völlig neuen Konstruktionen. Zu den beeindruckendsten Beispielen gehören die mathematischen Kompositionen von *George Hart* (www.georgehart.com). Auf Bild 2.5 ist ein (mathematisches) 4D-Objekt zu sehen, das aus 120 abgeflachten Dodekaedern (12-Flächlern) und 600 Tetraedern (4-Flächlern) besteht.

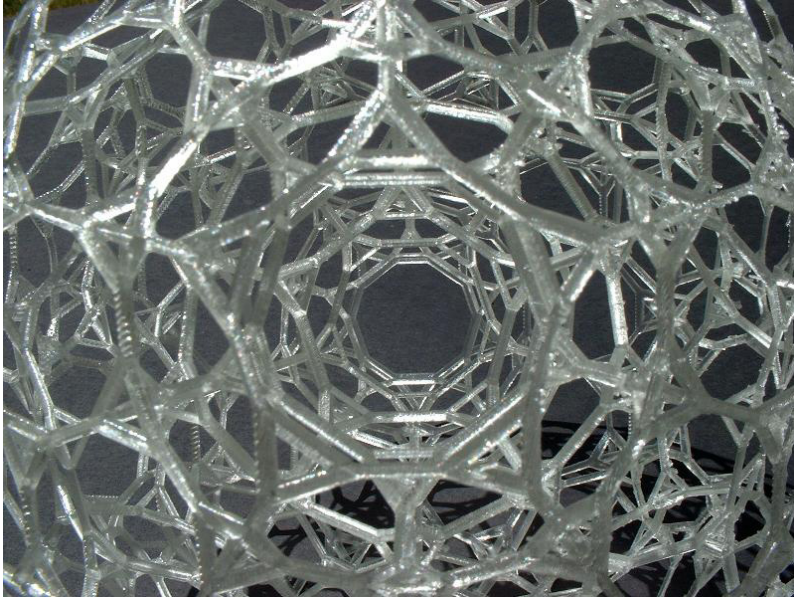


Bild 2.5 Komplexe, nur additiv herstellbare Geometrie, Polymer Printing

Quelle: George Hart

Die Herstellung von Bauteilen mittels *Additiver Fertigungsverfahren* erfolgt in zwei grundlegenden Verfahrensschritten (Bild 2.4):

1. Erzeugung der mathematischen Schichtinformation (Abschnitt 2.2).
2. Generierung des physischen Bauteils (Schichtenmodells) (Abschnitt 2.3).

■ 2.2 Erzeugung der mathematischen Schichtinformation

Da die additive Fertigung die Abbildung des virtuellen Datensatzes in ein physisches Faksimile darstellt, kommt der Erzeugung des Datensatzes und der ihn bestimmenden mathematischen Schichtinformation besondere Bedeutung zu. Der Prozess besteht aus drei Teilschritten:

1. Beschreibung der Geometrie durch einen 3D-Datensatz (Abschnitt 2.2.1),
2. Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten (Abschnitt 2.2.2),
3. Umsetzung der Schichtinformationen der Einzelschicht zur Erzeugung der Schicht (Abschnitt 2.4).

2.2.1 Beschreibung der Geometrie durch einen 3D-Datensatz

2.2.1.1 Datenfluss und Schnittstellen

Für die additive Fertigung muss die Geometrie des Bauteils als vollständiges 3D-Volumenmodell in Form eines digitalen 3D-Datensatzes vorliegen. Dieser entsteht bei den weitaus meisten industriellen Anwendungen durch Konstruktion mithilfe eines 3D-CAD-Programms. Die Daten können aber auch aus Messungen unterschiedlicher Art oder aus Bibliotheken stammen. Die 3D-Daten werden in jedem Fall unabhängig von der Fertigung erzeugt und müssen an die Maschine via Daten-Schnittstelle (Interface) übertragen werden. Der Datensatz wird als digitales oder *virtuelles Produktmodell* bezeichnet.

Zur additiven Fertigung eines Bauteils sind neben den so festgelegten Geometriedaten weitere material-, verfahrens- und anlagenspezifische Daten notwendig. Diese werden mithilfe von Programmen festgelegt, die zur Maschine gehören und vom Hersteller mitgeliefert werden (Frontend Software) oder Bestandteil einer von unabhängigen Dritten angebotenen Additive Manufacturing Software (Third-Party-Software) sind. Die Bereiche werden durch Datenschnittstellen miteinander verknüpft (Bild 2.6).

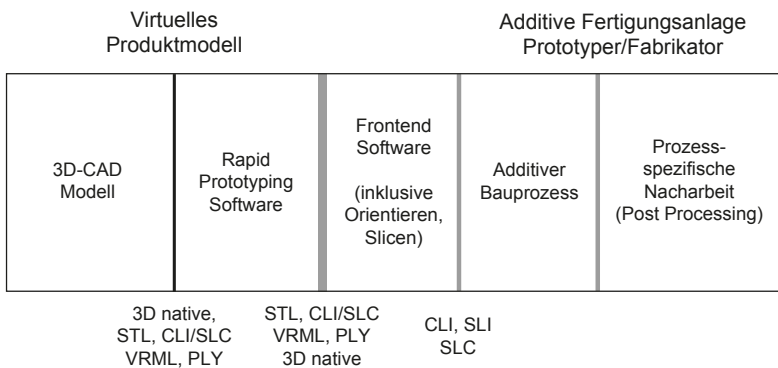


Bild 2.6 Datenfluss bei der Additiven Fertigung

Als Quasi-Industriestandard haben sich das *STL-Format* und das daraus hervorgegangene eng verwandte und voll kompatible *AMF-Format* weltweit etabliert (STL-Schnittstelle, Abschnitt 2.2.2 „Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten“). Andere Formate sind möglich und gebräuchlich (Abschnitte 2.2.2.2 „CLI-/SLC-Format“ und 2.2.2.3 „PLY- und VRML-Format“).

Vor dem eigentlichen additiven Bauprozess müssen einige nicht im CAD-Datensatz enthaltene Daten mithilfe der *Frontend-* oder der *Additive Manufacturing Software* festgelegt werden. Dazu gehören die optimale Baurichtung, also die Orientierung

des Bauteils im Bauraum, die Platzierung auf der Bauplattform und verfahrensspezifische Besonderheiten wie Stützen, Bases oder Entlastungsschnitte (Details werden im Kapitel 3 „Additive Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing“ im Zusammenhang mit der jeweiligen Maschine besprochen). Zur optimalen Nutzung der Maschine werden mehrere Bauteile nebeneinander – bei einigen Verfahren wie dem Sintern auch in- und übereinander – auf einer Plattform respektive in einem Bauraum arrangiert.

Die Additive Manufacturing-Programmsysteme freier Hersteller enthalten zudem Zusatzfunktionen, die die Arbeit erleichtern, aber nicht direkt im Bezug zur additiven Fertigung stehen (z. B. die Ableitung von 2D-Werkstattzeichnungen).

Zur reinen Visualisierung werden häufig auch externe Viewer, auf einfachste Funktionalitäten reduzierte CAD-Programme, eingesetzt, die auch einen STL-Ausgang haben können.

Nach diesem Schritt ist die Geometrie inklusive der Orientierung des Bauteils vollständig beschrieben. Zum Datensatz werden Materialdaten sowie prozess- und maschinenspezifische Parameter hinzugefügt.

Zur physischen Fertigung der Bauteile müssen die geometrischen Informationen bestehend aus der konstanten Schichtdicke und der Kontur für jede Schicht vorliegen. Das dazu notwendige Schneiden der Datensätze in (virtuelle) mathematische Schichten wird als „slicen“ bezeichnet. Die meisten Anlagen slicen den gesamten Datensatz und verarbeiten ihn dann im „Batch“-Betrieb. Es gibt aber auch Prozesse, die jede Schicht erst direkt vor dem Verarbeiten slicen. Das lag früher vor allem an der geringen Kapazität der Rechner. Heute werden sogenannte adaptive Slice-Verfahren (oft auch als *slicing on the fly* bezeichnet) bei Maschinen eingesetzt, die regelmäßig die Modellhöhe messen und danach die aktuelle Schichtstärke berechnen. Auf diese Weise werden Baufehler in z-Richtung vermieden oder verringert, die sich durch Fehlerfortpflanzung bei den Schichtdicken ergeben.

Auf der Basis dieses Datensatzes wird das Bauteil additiv gefertigt und ist nach den prozessspezifischen Nacharbeiten (Post-Processing) einsatzbereit.

Neben diesem als Standard zu betrachtenden direkten Pfad gibt es sowohl im Bereich der Konstruktion als auch bei der Fertigung Varianten. Die Geometriedaten können statt im STL-Format auch in alternativen Formaten wie SLI/SLC (Abschnitt 2.2.2.2 „CLI/SLC-Format“), PLY (Abschnitt 2.2.2.3 „PLY- und VRML-Format“) oder AMF (Abschnitt 2.2.2.4 „AMF-Format“) übergeben werden.

Häufig werden zur Datenübertragung auch sogenannte *Neutrale Schnittstellen* verwendet. Sie haben insbesondere dann Vorteile, wenn die Konstruktion bereits abgeschlossen ist, aber vor dem Bau, dann schon im Bereich der Fertigung, noch Modifikationen eingebracht werden sollen, weil Konstruktionen auf STL-Basis zwar möglich, aber nicht so komfortabel sind wie mit vollwertigen CAD-Systemen.

Die wichtigsten Neutralen Schnittstellen, die von den meisten 3D-CAD-Systemen unterstützt werden, sind:

- IGES Initial Graphics Exchange Specification
- VDAIS Verband der Automobilhersteller – IGES-Schnittstelle
- VDAFS Verband der Automobilhersteller – Flächenschnittstelle
- DXF Drawing Exchange Format
- HPGL Hewlett Packard Graphics Language
- SET Standard déchange et de transfer
- STEP Standard for the Exchange of Product Model Data.

IGES definiert einen weltweiten Standard als Geometrieschnittstelle, weist aber viele Variationen auf, die genau bezeichnet werden müssen.

VDAIS ist eine vom Verband der Automobilhersteller (VDA) in seinem Elementumfang eingeschränkte IGES-Schnittstelle, die ebenfalls zahlreiche Varianten umfasst, sodass im Einzelfall genauestens geprüft werden muss, welche Schnittstellenformulierung dem Datenaustausch zugrunde liegt.

VDAFS ist auf die Übertragung von Freiformflächen spezialisiert und hat deshalb insbesondere in der Automobilindustrie eine herausragende Bedeutung.

HPGL ist ein konturorientiertes Plotterformat, das insbesondere vor dem Hintergrund der direkten Konturierung im CAD auch für additive Verfahren eingesetzt wird.

STEP ist eine Schnittstelle, die sich nach einer längeren Probephase zunehmend durchsetzt. Mit STEP werden neben den reinen Geometrieinformationen auch andere Informationen übergeben. STEP stellt damit einen Ansatz dar, tatsächlich CAD-Modelle und nicht nur Geometrieinformationen (mit Zusätzen) zwischen CAD-Programmsystemen zu übergeben.

2.2.1.2 Modellierung dreidimensionaler Körper mittels 3D-CAD

Die vollständige Beschreibung der Geometrie durch einen 3D-Datensatz ist die unabdingbare Voraussetzung für die additive Fertigung eines Bauteils. Die Anwendung additiver Verfahren ist im Kontext der industriellen Produktentstehung deshalb in besonderem Maße mit CAD-Verfahren verknüpft. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle soweit auf 3D-CAD-Verfahren eingegangen werden, wie dies für das Verständnis der prinzipiellen Zusammenhänge bei der additiven Herstellung erforderlich ist.

Jedes CAD-System nutzt bestimmte individuelle Datenelemente und Datenstrukturen, um ein Bauteil vollständig zu beschreiben. Der Datensatz umfasst nicht nur die Bauteilgeometrie sondern auch die Werkstoffe, die Oberflächengüte, das Fertigungsverfahren und vieles mehr. Die Bauteilgeometrie stellt also nur einen Teil der Informationen dar. Die Gesamtheit aller in der Datenbasis eines CAD-Systems

zu einem Bauteil niedergelegten Informationen wird als 3D-CAD-Modell (oft kurz: CAD-Modell) oder auch als *Digitales Produktmodell* bezeichnet.

Die Auswahl eines CAD-Systems wird durch andere Kriterien bestimmt als durch das später angewandte *additive Fertigungsverfahren*. Mit der Wahl eines CAD-Systems legt sich der Benutzer auf dessen Datenbasis fest. Die Struktur und die Datenelemente beeinflussen maßgeblich die Qualität des CAD-Modells und die Kompatibilität mit anderen Systemen über Schnittstellen. Allerdings bestimmt das CAD-System auch Art, Umfang und Qualität der additiven Fertigung mit.

2.2.1.2.1 CAD-Modelltypen

Unabhängig von bestimmten CAD-Systemen werden CAD-Modelle in Modelltypen unterschieden. Aus Bild 2.7 wird deutlich, dass nicht alle Modelltypen, die zur 3D-Darstellung geeignet sind, auch genügend Informationen für eine additive Fertigung enthalten.

Das durch Punkte beschriebene *Eckenmodell* ist von geringer praktischer Bedeutung und für die additive Fertigung nicht einsetzbar. Verwendet wird es zum Beispiel als

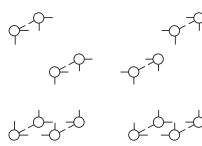
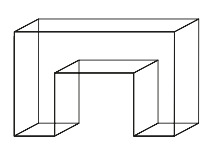
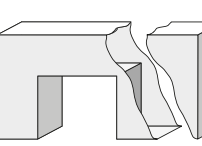
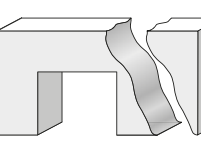
Dimension der Elemente	Element	Modelltyp
0D	<p>Punkt</p> 	Eckenmodell
1D	<p>Linie</p> 	Kantenmodell
2D	<p>Fläche</p> 	Flächenmodell
3D	<p>Volumen</p> 	Volumenmodell (Körpermodell)

Bild 2.7 CAD-Elemente und Modelltypen

Zwischenmodell bei der teilautomatisierten Umsetzung von Rasterdaten oder von 2D-CAD-Modellen in 3D-CAD-Modelle.

Das *Kantenmodell* ermöglicht aufgrund seiner geringen Datenmenge die schnelle grafische Darstellung von 3D-Elementen auch bei kleiner Rechnerleistung. Im Zusammenhang mit *Virtual Reality* (VR) Anwendungen und *Digital Mock Up* (DMU) gewinnt es deshalb wieder an Bedeutung. Der gravierende Nachteil des Kantenmodells ist die fehlende Information über die exakte Lage der Flächen und der Volumina. Deshalb ist es wie das Eckenmodell nicht als Ausgangsbasis für die additive Fertigung zu empfehlen.

Flächenmodelle sind prinzipiell gut geeignet für die additive Fertigung. Das Bauteil wird über seine inneren und äußeren Begrenzungsflächen (verallgemeinert seine Außenflächen) beschrieben. Damit sind auch das Bauteilvolumen und die Lage der Volumina bekannt. Dazu wird in der Regel für jede Fläche ein vom Bauteil weg weisender Normalenvektor zusätzlich festgelegt und abgespeichert. Die Orientierung des Bauteilvolumens muss daher für die vollständige Beschreibung eines Bauteils unbedingt bekannt sein.

Volumenmodelle (Körpermodelle, Solids) sind optimal für das Modellieren von CAD-Modellen, die auch für die additive Fertigung verwendet werden. Die Orientierung des Volumens und damit der das Volumen definierenden Flächen ist exakt vorgegeben und muss nicht vom Benutzer explizit festgelegt werden.

Unterschieden werden bei Volumenmodellen:

- Grundkörpermodelle,
- Flächenbegrenzungsmodelle,
- Hybridmodelle.

Bei *Grundkörpermodellen* wird das Bauteil im CAD-System durch das Verknüpfen von Grundkörpern (sogenannten geometrischen Primitiven) wie Quadern, Kugeln, Zylindern usw. definiert. Dies geschieht mit Booleschen Operationen. Diese, und damit die Entstehungsgeschichte des Bauteils, werden im CSG-Baum (*Constructive Solid Geometry*) abgespeichert und sind bei Bedarf zugänglich. Das Grundkörpermodell beinhaltet zwar den CSG-Baum, enthält jedoch keine Informationen über die einzelnen Flächen. Wird ein Grundkörpermodell als STL-Datei ausgegeben, werden in einem ersten Schritt die Begrenzungsflächen der Grundkörper berechnet. Fehler durch nicht exakt aneinander grenzende Flächen können deshalb nicht auftreten.

Beim *Flächenbegrenzungsmodell* werden im Extremfall nur die Einzelflächen und die Lage des Volumens abgespeichert. Die Lage des Volumens, die auch über einen auf jeder Fläche stehenden, nach außen zeigenden Normalenvektor festgelegt ist, muss nicht vom Benutzer definiert werden. Durch diesen Modelltyp können auch bezüglich der äußeren Berandung extrem komplexe Körper dargestellt werden, was sonst nur mithilfe von Flächenmodellen möglich ist.

Hybridmodelle vereinigen die Vorteile beider Modellarten. Sie enthalten sowohl Elemente der Grundkörpermodelle als auch der Flächenmodelle. CAD-Systeme, die mit Hybridmodellen arbeiten, erzeugen meist fehlerfreie Daten, die für die additive Fertigung hervorragend geeignet sind, weil die ausgegebenen Flächen bei der Entstehung des Hybridmodells vom System selbst exakt aufeinander berandet werden.

2.2.1.2.2 Anforderungen an CAD-Systeme

Bei der Bewertung eines CAD-Systems in Bezug auf die Eignung für die additive Fertigung sollten möglichst viele der im Folgenden diskutierten Eigenschaften von CAD-Systemen erfüllt sein. Grundvoraussetzung ist, dass es sich um einen 3D-Volumenmodellierer handelt und dass eine Schnittstelle für den Export der Daten für die additive Fertigung (vergleiche Abschnitt 2.2.2 „Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten“) zur Verfügung steht. Der Weg über *Neutrale Schnittstellen* in ein anderes CAD-System und von dort über eine Schnittstelle zur additiven Maschine sollte eher als Umweg angesehen werden.

Die folgenden Eigenschaften haben sich bei der Auswahl von CAD-Systemen zur Erzeugung von Datensätzen für die additive Fertigung als vorteilhaft erwiesen:

- *Parametrische 3D-Konstruktionen*
Anstelle von festen Maßvorgaben werden Parameter vereinbart, die zudem über mathematische Funktionen miteinander korreliert werden können.
- *Hybridmodelle*
Hybridmodelle vereinen die Vorteile der Grundkörper und der Flächenmodelle und sind deshalb für die additive Fertigung hervorragend geeignet.
- *Durchgängige Datenbasis*
Das CAD-System und alle mit ihm verknüpften Module müssen stets auf eine gemeinsame, verbindliche Datenbasis zurückgreifen.
- *Redundanzfreiheit*
Mit der Durchgängigkeit der Datenbasis hängt auch die Redundanzfreiheit, also die Freiheit von unnötig doppelt gespeicherten Daten zusammen. Solche Mehrfachspeicherungen sind auch im Hinblick auf die Speicherkapazität, die Schnelligkeit und Eindeutigkeit des Programms zu vermeiden.
- *Offenes System*
Die Verknüpfung mit Spezialmodulen freier Hersteller (Flächenrückführung, CT-Modellierung, Additive Manufacturing Software) muss gewährleistet sein.
- *Assoziativität*
Die innere Architektur des CAD-Systems muss so beschaffen sein, dass bei Änderungen alle Abhängigkeiten überprüft werden und entsprechende Modifikationen erfolgen.

Darüber hinaus spielen eine Reihe von Überlegungen, beispielsweise eine leichte Erlernbarkeit oder die Unterstützung bei bestimmten, gegebenenfalls auch branchentypischen Aufgaben, eine Rolle bei der Auswahl eines CAD-Systems.

Der Markt bietet eine schier unübersehbare Anzahl von CAD-Systemen an, die sich oft nur durch branchentypische Besonderheiten voneinander unterscheiden. Es kann heute davon ausgegangen werden, dass alle wichtigen CAD-Systeme über Standard-Schnittstellen (STL) verfügen. Ergänzend stehen häufig auch andere Schnittstellen, z. B. SLC, PLY, VRML oder HPGL zu Verfügung.

Im Anhang ist eine Liste von CAD-Systemen aufgeführt (*Technische Daten und Informationen*), die eine Additive Manufacturing-Schnittstelle besitzen. Auf die tabellarische Auflistung spezieller Eigenschaften dieser CAD-Systeme wurde bewusst verzichtet. Die angegebenen Internet-Adressen stellen sicher, dass der interessierte Leser schnell und zuverlässig den aktuellen Stand recherchieren kann.

Wer sich mit den Details von CAD-Systemen nicht befassen will, sollte darauf achten, dass das ausgesuchte CAD-System eine STL-Schnittstelle hat und diese mittels Testbau verifizieren.

2.2.1.3 Modellierung dreidimensionaler Körper aus Messwerten

Grundsätzlich spielt es keine Rolle, wie der 3D-Datensatz erzeugt wird. Wie Bild 2.8 zeigt, gibt es eine Reihe alternativer Wege, um zu einem 3D-Datenmodell zu gelangen.

Als Eingangsdaten können neben 3D-CAD-Konstruktionen grundsätzlich auch 2D-CAD-Zeichnungen, Handskizzen und dergleichen verarbeitet werden. Um daraus additive Bauteile zu fertigen, müssen die Daten über Zwischenoperationen in 3D-Volumeninformationen überführt werden. In den meisten Fällen geschieht dies durch manuelles Erstellen einer 3D-CAD-Zeichnung und ist nicht weniger aufwendig als eine Neukonstruktion. Sind die zugehörigen Schichthöhen bekannt, können die letztlich benötigten Konturdaten von einigen Systemen auch direkt verarbeitet werden. Für die Übergabe reichen dann 2D-Daten, z. B. im HPGL Format.

Dreidimensionale Datensätze erhält man zum Beispiel auch aus Messungen. Zunehmend werden dazu 3D-Scanner eingesetzt. Sie sind im Begriff die Koordinatenmessmaschinen zu verdrängen. Bei beiden Prozessen werden die ermittelten Punktdaten in der Regel mithilfe spezieller Programmsysteme in ein 3D-CAD-Modell überführt.

Im Maschinenbau wird die Umsetzung von als geometrisch niederwertigen zu betrachtenden Punktdaten in geometrisch höherwertige Flächendaten als „Reverse Engineering“ bezeichnet. Diese mathematisch nicht eindeutige Prozedur ist daher auch heute noch aufwendig und nur dann wirklich notwendig, wenn mit den gewonnenen CAD-Daten weiter konstruiert werden soll. Das Thema der Flächenrückführung ist zu komplex, als dass es hier annähernd erschöpfend behandelt werden könnte. Einen Überblick vermittelt z. B. [Back05].

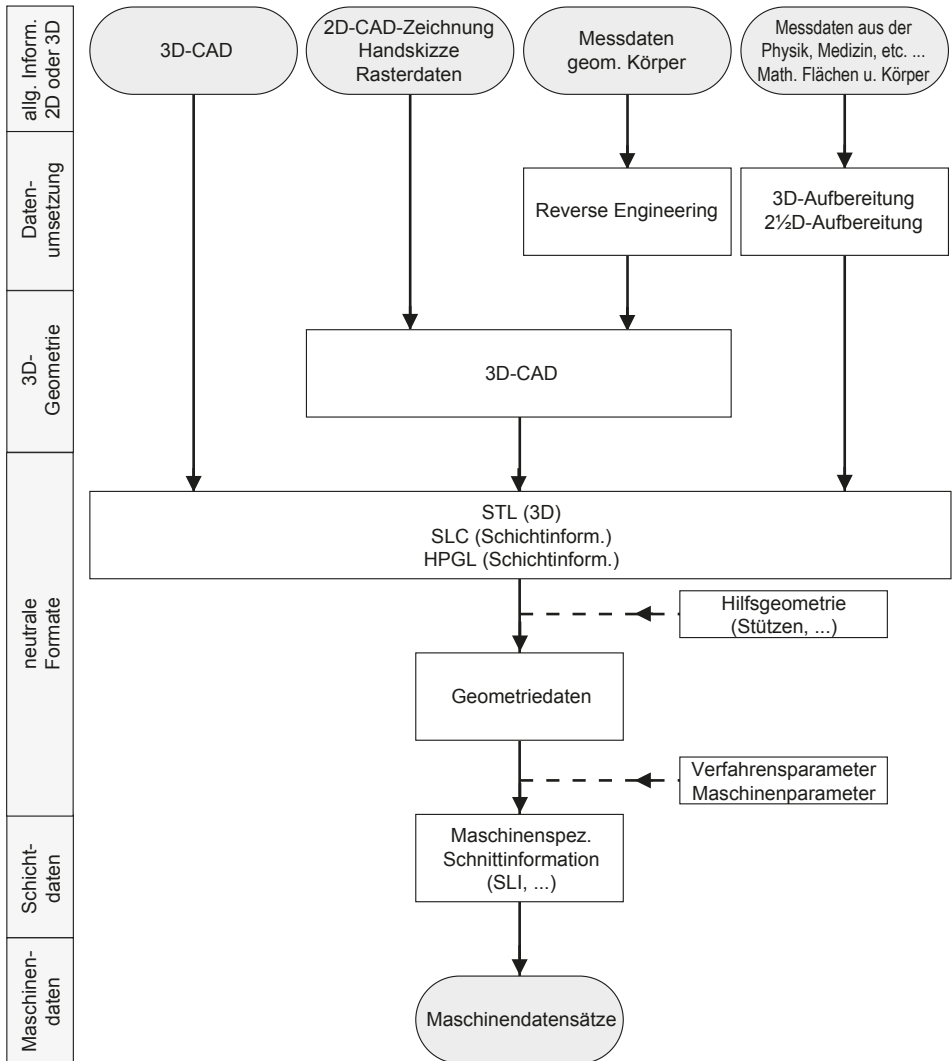


Bild 2.8 Verallgemeinerte Darstellung der Datenwege für die additive Fertigung

Punktwolken können aber auch direkt zur additiven Fertigung verwendet werden, wenn sie zur Körperbeschreibung in ein neutrales Datenformat überführt werden. Davon wird vor allem dann Gebrauch gemacht, wenn, wie z. B. beim Body-Scannen zum Bau von Plastiken (Bild 6.12), nur das physische Bauteil aber keine CAD-Zeichnung benötigt wird.

3D-Messdaten erhält man zudem aus Computer-Tomographie (CT)-Scannern, die außer in der Medizin zunehmend in der Technik, z. B. zur zerstörungsfreien Prüfung, aber auch nur zur Aufnahme der 3D-Daten eingesetzt werden. Die CT-Daten werden mithilfe von 3D-Rekonstruktionsprogrammen in 3D-Volumendaten konvertiert und

stehen damit für die additive Fertigung zur Verfügung (Abschnitt 4.3.4 „Rapid Prototyping in der Medizin“). Anwendungsfelder in der Technik sind unter anderem die definierte Erfassung von beschädigten Geometrien als Ausgangsbasis für individuelle Reparaturen oder für die Reproduktion von Bauteilen, für die es keine Fertigungsunterlagen mehr gibt, also beispielsweise von Ersatzteilen für Oldtimer-Fahrzeuge. Insbesondere bei privater Nutzung von Fabbern werden auch Bibliotheken verwendet, die ein direktes Herunterladen aus dem Netz erlauben. Je nach Anbieter können diese Datensätze zusätzlich modifiziert werden.

2.2.2 Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten

Für die additive Fertigung dreidimensionaler Bauteile muss das 3D-CAD-Volumenmodell mathematisch in Schichten gleicher Stärke zerlegt werden. Für jede dieser Schichten muss die Kontur definiert vorliegen, um in der Maschine physisch umgesetzt zu werden. Den Vorgang der Erzeugung der Schichten nennt man *slicen*.

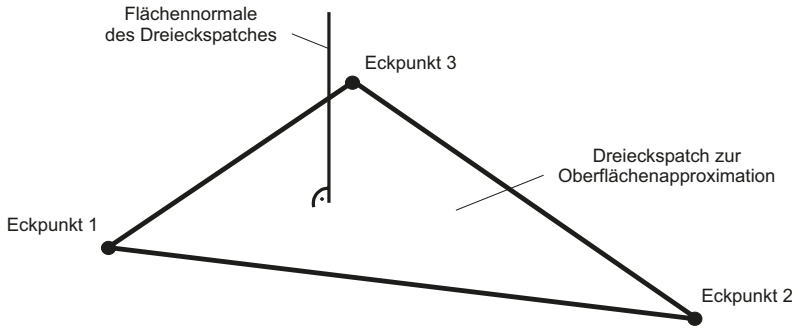
Dazu gibt es im Wesentlichen zwei Verfahren: Die Triangulation und das direkte Schneiden im CAD. Die Triangulation führt auf das STL-Format, das direkte Schneiden auf das CLI- (SLI-) Format.

2.2.2.1 STL-Format

Bei der STL-Formulierung wird die Oberfläche des Bauteils mit unterschiedlich großen ebenen Dreiecken überzogen und die tatsächliche Geometrie damit angenähert. Da Volumenelemente mindestens zwei Oberflächen, die innere und die äußere, aufweisen, die sich nur durch die Normalenvektoren unterscheiden, muss dies für beide Flächen geschehen. Die Beschreibung der Modelloberfläche durch Dreiecke nennt man Triangulation oder Tessellation. Sie führt auf einen sogenannten STL-Datensatz¹. Dieser stellt de facto einen Industriestandard für die additive Fertigung dar, ist aber tatsächlich nicht standardisiert.

Dazu beigetragen hat die Tatsache, dass dieses Verfahren, lange bevor es für die additive Fertigung entdeckt wurde, zur Schattierung und damit zur Visualisierung von dreidimensionalen CAD-Gittermodellen diente. Entscheidend für die Etablierung des STL-Formats als Schnittstelle zur additiven Fertigung war die frühzeitige Veröffentlichung der Schnittstellenformulierung. So konnte die STL-Schnittstelle, die seitdem als Stereolithographie- oder ungenau als Rapid Prototyping Schnittstelle bezeichnet wird, sowohl von allen Maschinenherstellern als auch von freien Softwarehäusern (Third-Party-Software) verwendet werden. Das kam insbesondere der Entwicklung

¹ „STL“ steht für **S**tandard **T**ransformation **L**anguage.



```
FACET NORMAL 0.000000e+00 0.000000e+00 -
OUTER LOOP
VERTEX 9.999990e+00 9.999990e+00
VERTEX 9.999990e+00 1.100001e+01
VERTEX 1.100001e+01 9.999990e+00
ENDLOOP
ENDFACET
```

Flächennormale Dreiecksfacette 1
 Beginn der Eckpunktdaten
 Dreiecksfacette 1, Endpunkt 1
 Dreiecksfacette 1, Endpunkt 2
 Dreiecksfacette 1, Endpunkt 3
 Ende der Eckpunktdaten
 Ende Facettenbeschreibung Facette 1

Bild 2.9 Definition eines Dreieckspatches im STL-Format und zugehöriger ASCII Datensatz [Hoffmann95], [BRITE/EuRAM94]

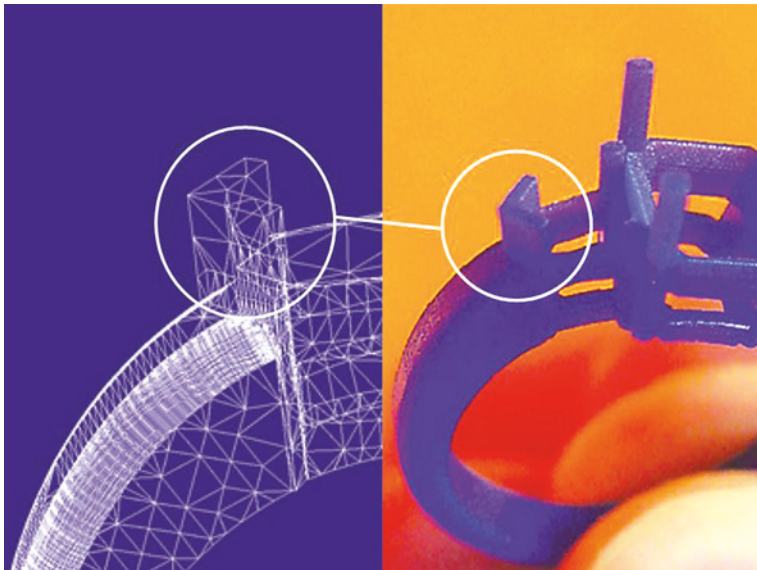


Bild 2.10 Triangulierte Oberfläche und zugehöriges additiv gefertigtes Bauteil
 Quelle: 3D-Systems

von Spezialsoftware (z. B. Stützengeneratoren) zugute, die von unabhängigen Entwicklern angeboten wird und nachhaltig zur Anwenderfreundlichkeit der additiven Anlagen beigetragen hat.

Der STL-Datensatz enthält den Normalenvektor (positive Richtung nach außen, vom Volumen weg) und die Koordinaten der drei Eckpunkte eines jeden Dreiecks (Bild 2.9). Er kann als ASCII- oder als Binärfile erstellt werden. Die Datenmenge ist bei Binärfiles wesentlich geringer, dafür sind ASCII-Files auch im Quellcode vergleichsweise leicht zu lesen und zu kontrollieren. Bild 2.9 zeigt ein solches Dreieckspatch und den zugehörigen ASCII Datensatz, der pro Dreieck von den Befehlen FACET und ENDFACET eingeschlossen wird.

Die mit Dreieckspatches überzogene, sogenannte triangulierte Oberfläche zeigt Bild 2.10 an einem realen Bauteil.

Die STL-Formulierung hat vor allem praktische Vorteile:

- Die einfache mathematische Beschreibung der Oberfläche durch Dreiecke ermöglicht das problemlose Schneiden an jeder beliebigen z -Koordinate, auch wenn das für die Konstruktion verwendete CAD-Programm nicht verfügbar ist. Die STL-Modelle lassen sich ohne Rückführung in das CAD-Programm beliebig skalieren.
- Da die Schnittstelle nur Datenelemente eines Typs aufweist, die mit relativ einfachen Mitteln beschrieben werden können, sind in der ASCII Version Syntaxfehler bei der Programmierung der Schnittstelle sehr leicht zu erkennen und zu eliminieren und stellen deshalb praktisch kein Problem dar.
- Im Gegensatz zu konturorientierten Schnittstellen lassen sich kleinere Fehler mit relativ geringem Aufwand reparieren. Hierbei ist es von Vorteil, dass ein Dreieck eine höherwertige Geometrieinformation beschreibt als der Vektor eines Konturzuges.

Die STL-Formulierung hat auch Nachteile:

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

2.2.2.1.1 Fehler im STL-File

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 [Hoffmann95] systematisiert sie wie folgt:

- Konstruktionsfehler,
- Umsetzungsfehler,
- Beschreibungsfehler.

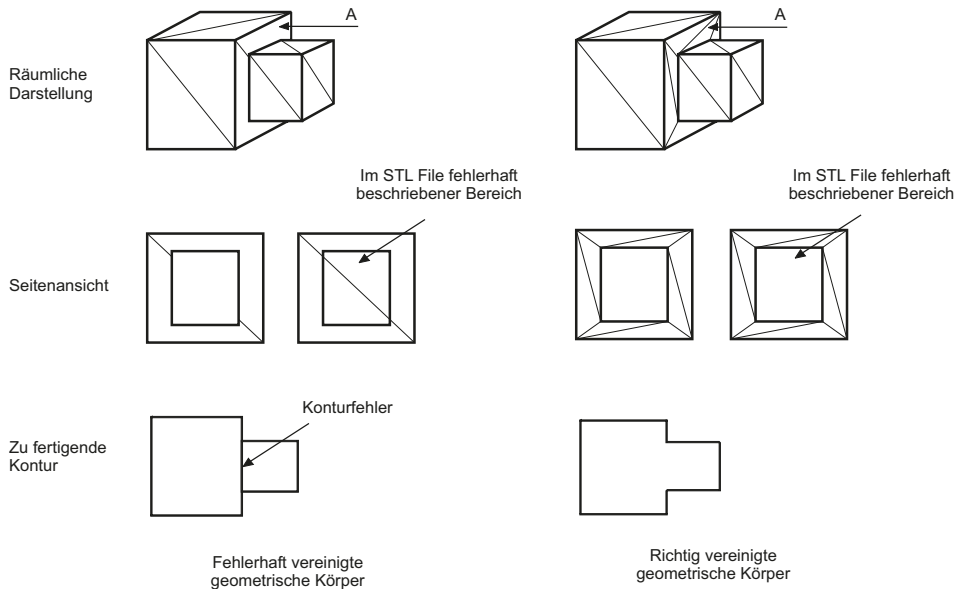


Bild 2.11 Auswirkungen fehlerhaft vereinigter geometrischer Körper [Hoffmann95]

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 2.11). Daraus können sich Probleme für additive Verfahren ergeben. LLM-Verfahren fügen z. B. an diesen Stellen nicht erforderliche Schnitte ein. Die Folgen reichen von zusätzlichem Aufwand während des Bauprozesses bis zum Totalverlust des Teils. Bei den Polymerisations- und Sinterverfahren wirken sich diese Fehler nicht auf das Bauteil aus.

Umsetzungsfehler entstehen, weil die Annäherung der mathematisch exakten Kontur durch Dreiecke prinzipiell eine Ungenauigkeit darstellt, die von der Anzahl der Dreiecke abhängt. In Bild 2.12 (a) ist dieser Sekantenfehler am Beispiel der Annäherung eines Kreises durch vier ($f/4$), acht ($f/8$) oder zwölf ($f/12$) Sekanten dargestellt. Bild 2.12 (b) zeigt den Effekt am Beispiel der Modellierung der Oberfläche einer Kugel.

Bei genauerer Formulierung der Oberfläche, die durch die Erhöhung der Anzahl der Dreiecke erreicht wird, steigt die Datenmenge schnell enorm an. In einem veröffentlichten Beispiel wurde das Anwachsen um den Faktor 22 nachgewiesen [Donahue91]. Kritiker sehen dies als Nachteil der STL-Formulierung. Allerdings stellen alternative Verfahren, beispielsweise die konturorientierte Formulierung, die geschlossenen Kurven letztlich auch als Polygonzüge dar. Mit wachsender Anforderung an die Genauigkeit steigen die dieser Darstellung zugrunde liegenden Datenmengen ebenfalls enorm an.

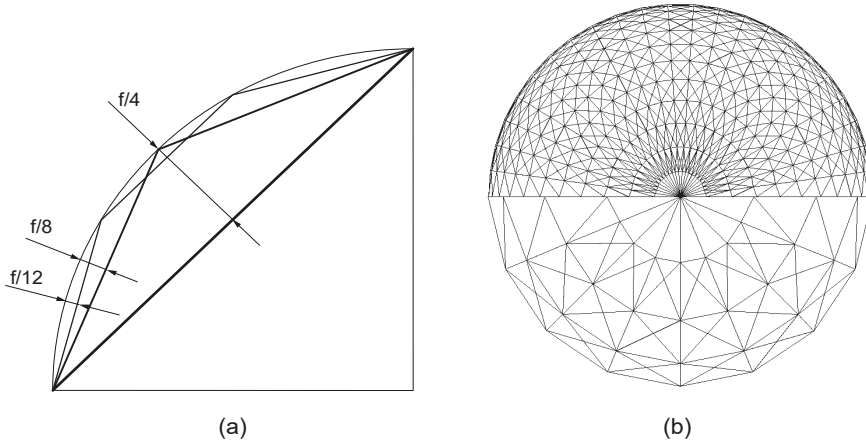


Bild 2.12 (a) Sekantenfehler bei der Annäherung eines Kreises durch 4 ($f/4$), 8 ($f/8$) oder 12 ($f/12$) Geradenabschnitte;
 (b) Einfluss der Anzahl der Dreiecke auf die Modellierung der Oberfläche einer Kugel (STL-Format)

In der Praxis ist die Feinheit der Triangulation meist kein Problem, wenn man sich an bewährte Voreinstellungen hält.

Beschreibungsfehler sind im Wesentlichen drei Ursachen zuzuordnen:

- Lücken zwischen Dreieckspatches (Berandungsfehler),
- Doppelte Dreieckspatches (Überlappungen),
- Falsche Orientierung einzelner Patches (Fehlorientierung).

Bild 2.13 zeigt diese Fehler schematisch.

Lücken (und *doppelte Dreieckspatches* als Sonderform einer Lücke) entstehen durch ungenaue Berandung von aneinander grenzenden Patches. Bereits die ungleiche Auflösungsdichte von Geometrien kann an gegenüberliegenden Kanten zu Berandungsfehlern führen und die sogenannten „Naked Edges“ (nackte Kanten) verursachen.

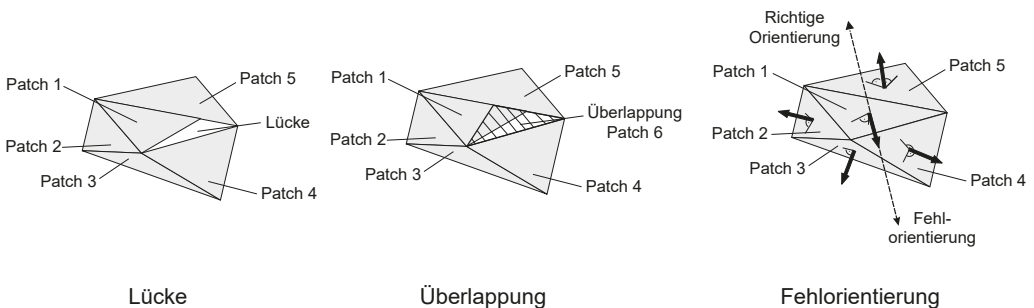


Bild 2.13 Beschreibungsfehler: Lücke, Überlappungen und Fehlorientierung

Solche Fehlstellen spielen bei der Visualisierung und auch beim Bearbeiten mit Fräser-Durchmessern im Millimeter-Bereich kaum eine Rolle. Beim Einsatz von Lasern mit Strahldurchmesser von einigen 1/10 mm wirken sie sich negativ aus. Beschreibungsfehler führen dazu, dass eine Fertigung nur mit Einschränkungen oder überhaupt nicht möglich ist.

Bei der *falschen Orientierung* von Flächen zeigt der Normalenvektor in das Innere des Bauteils. Während das menschliche Auge einzelne falsch orientierte Flächen richtig zuordnet, führt dies bei der Erzeugung der Maschinendatensätze in aller Regel zu Problemen. Innen- und Außenseite können nicht mehr unterschieden werden (Bild 2.13).

Alle Lücken im Datensatz müssen spätestens beim Erstellen der maschinenspezifischen Schichtinformationen geschlossen werden. Man spricht vom „Reparieren“ des Datensatzes. Dies geschieht routinemäßig automatisch mithilfe spezieller Module in der Frontend Software. Im Zuge einer semi-automatischen Reparaturstrategie kann ein Eingreifen per Hand schneller zu besseren Ergebnissen führen.

Reparaturmöglichkeiten haben aber Grenzen. Bei dem in Bild 2.14 (a) gezeigten Beispiel ist das Reparieren noch leicht möglich, wogegen die Schichtdaten für den in Bild 2.14 (b) gezeigten Fall mit Sicherheit nicht zu rekonstruieren sind und folglich mit Fehlern behaftete Bauteile entstehen werden. Am besten ist es natürlich, die Fehler durch eine entsprechend große Sorgfalt bei der Erstellung des CAD-Modells gar nicht erst entstehen zu lassen.

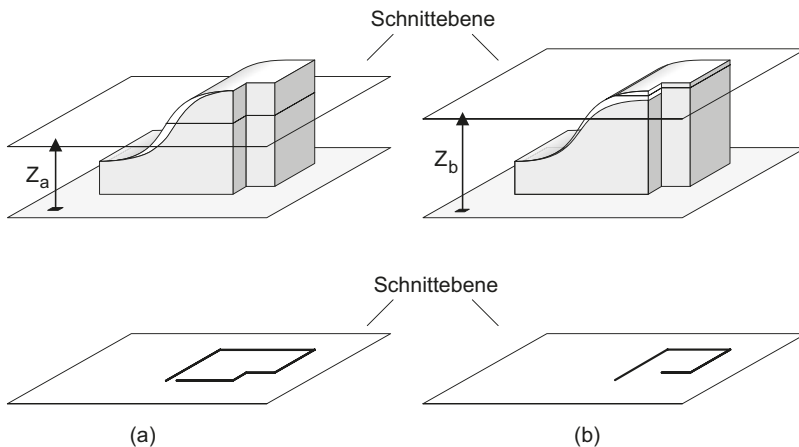


Bild 2.14 Einfluss nicht exakt berandeter Flächenmodelle auf die Erzeugung von Schichtmodellen

2.2.2.2 CLI-/SLC-Format

Die CLI-(SLI-, SLC-)Schnittstelle, auch konturorientierte Schnittstelle genannt, dient der Übernahme der Geometriedaten für die einzelne jeweils zu fertigende Schicht des

Bauteils. Dabei stellt die CLI-Schnittstelle eine systemübergreifende, anlagenneutrale Form der Datenübergabe dar. Im Gegensatz dazu enthält ein Slice-(SLI-, SLC-)File anlagenspezifische Zusatzinformationen zu den geometrischen Grunddaten und ist nicht zwischen den verschiedenen additiven Fertigungssystemen austauschbar.

Alle konturorientierten Formulierungen legen die Konturschnitte direkt in die entsprechende Höhenkoordinate des 3D-CAD-Modells und schneiden am mathematisch exakten Objekt [Fockele94]. Es handelt sich somit um 2D-Informationen. In Anlehnung an die etablierte Plottersoftware werden auch Formate auf der Basis von HPGL-Files (Hewlett Packard Graphic Language) oder ähnlichen Standardformulierungen verwendet.

Die Schnitterzeugung erfolgt direkt im CAD, respektive in der Schicht. Die Informationen aus dem 3D-CAD reichen aus, um neben der Kontur auch direkt Schraffierungen angeben zu können und damit die Kontur vollständig zu beschreiben. Dabei werden äußere und innere Berandungen und Schraffierungen der Querschnittsflächen unterschieden (Bild 2.15).

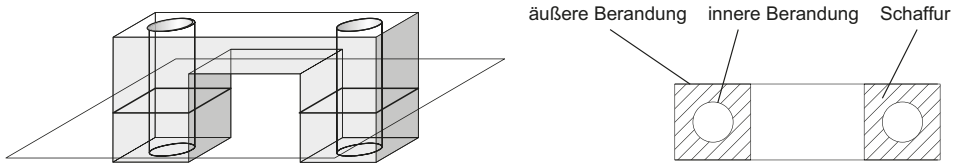


Bild 2.15 Direkte Konturgenerierung aus dem 3D-CAD-System

Dem Vorteil der direkten Generierung der Schichtinformationen stehen auch Nachteile gegenüber.

Ein in der Praxis wesentlicher Nachteil der SLC-Formulierung besteht darin, dass konturorientierte Datensätze im Gegensatz zu STL-Dateien nachträglich ohne erneute Bearbeitung im (Original-)CAD nicht mehr skaliert werden können, weil sie isolierte Schichtinformationen ohne Bezug zum Verlauf der Höhenkoordinate darstellen.

Auf die Schichtdaten kann ohne CAD nicht mehr im Sinne einer Optimierung des Bauteils eingewirkt werden.

Die alternative Übergabe der vollständigen CAD-Daten setzt voraus, dass im Bereich der additiven Fertigung das jeweilige CAD-System betrieben und beherrscht wird, was für mehr als zwei Systeme in der Regel schon aus Kostengründen als ausgeschlossen angesehen werden muss. Es bleibt dann nur der ebenfalls mit Fehlerrisiken behaftete Weg des Datentransfers auf andere CAD-Systeme.

Gegen die Übernahme des gesamten CAD-Datensatzes sprechen bei Auftragsfertigungen vor allem in der frühen Entwicklungsphase häufig auch Geheimhaltungsgründe, da auf diese Weise deutlich mehr Informationen weitergegeben werden, als für die additive Fertigung notwendig (und in der STL-Formulierung enthalten) sind.

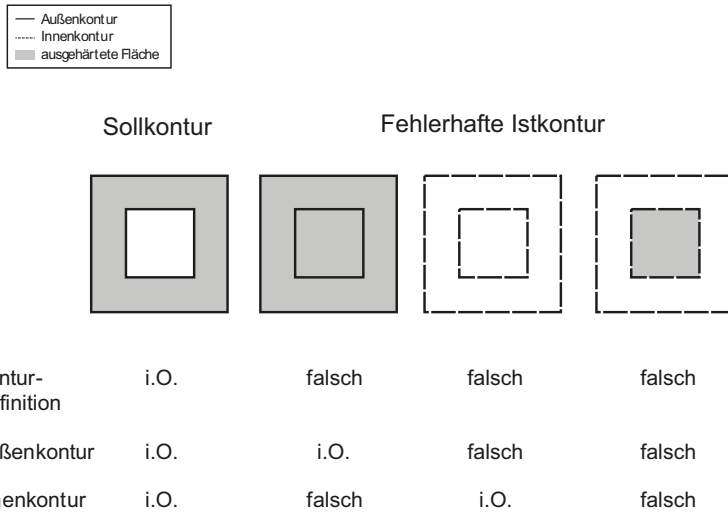


Bild 2.17 Fehler im CLI-File und ihre Auswirkungen auf das Bauteil [Hoffmann95]

Bei fehlerhafter Definition der Konturen wird auch ein fehlerhaftes Bauteil gefertigt. So führt eine fehlerhafte Außenkontur bei fehlerfreier Innenkontur dazu, dass das gesamte Volumen nicht gebaut wird. Eine fehlerhafte Innenkontur führt dazu, dass das innere Volumen gebaut wird, obwohl das Bauteil eigentlich hohl sein sollte (Bild 2.17).

2.2.2.3 PLY- und VRML-Format

Additive Fertigungsanlagen, die farbige Bauteile herstellen, unterschiedliche Materialien verarbeiten und solche, die zukünftig die Fertigung von Bauteilen mit kontinuierlich über den Querschnitt veränderlichen Eigenschaften ermöglichen werden (graded materials), können mit traditionellen geometrieorientierten STL-Datensätzen nicht angesteuert werden. Die STL-Datenstruktur bietet zwar durchaus Platz für zusätzliche Informationen, diese würden aber in jedem Fall immer das ganze Dreieck betreffen. In Bit-Maps abgespeicherte Farb- oder Materialinformationen oder kontinuierliche Änderungen der Eigenschaften sind aber auf diese Weise nicht darzustellen. Ansätze zur Erweiterung des STL-Formats [Swaelens99] haben sich daher bisher nicht durchgesetzt.

Insbesondere für die Herstellung farbiger Bauteile werden an Stelle des STL-Formats heute das „Polygon-File“-Format (PLY), und das „Virtual Reality Modeling Language“-Datenformat (VRML) eingesetzt.

Hervorgegangen sind diese Formate aus der Entwicklung für interaktive Internet-Avatare, also weborientierte PC-Spiele mit virtuellen 3D-Welten und den damit verbundenen Charakter-Animationen für die darin beweglichen Figuren.

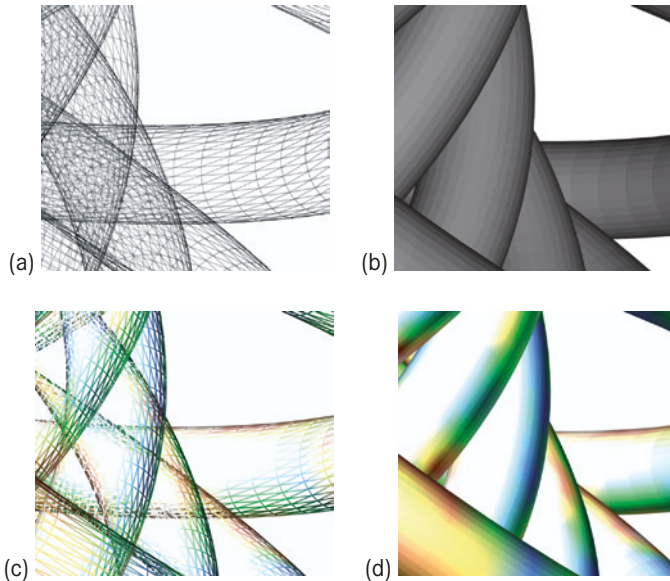


Bild 2.18 (a) Objektgeometrie als monochrome triangulierte Masche, (b) Lichtzuweisung, (c) Verrechnung von Farbtextur und Lichtreflexion auf die Dreiecksmasche, (d) Körper mit Beleuchtung und Texturierung
 Quelle: FH Aachen, GoetheLab/F.-M. Schmidt

Neben den triangulierten Hüllmaschen und den geometrischen Informationen werden zusätzlich Farbzuzuweisungen editiert.

Das VRML-Datenformat wurde 1995 als Version 1.0 und 1997 als Version 2.0 entwickelt. VRML 2.0, gleichbedeutend mit der Bezeichnung VRML 97, bindet im Gegensatz zu seinem Vorgänger VRML 1.0, der quasi einen für das Internet geeigneten STL-Datenkomprimierer darstellte, neben einem weiten Spektrum von multimedialen Informationen auch die o. g. Farbinformationen (Bild 2.18) zur Objektgeometrie mit ein. VRML 97 ist seit Dezember 1997 ISO standardisiert (ISO/IEC DIS 14772-1, 1997) [VRML 97]. Es hat damit das Potenzial, die STL-Formulierung, die nur einen de facto Standard darstellt, auf längere Sicht abzulösen.

Farbinformationen haben dabei als verrechnete Algorithmen unterschiedlichste Ursprünge. Grundlage dafür sind Objektfärbung, Objektmaterialzuweisungen (Lumineszenz, Transparenz, Reflektion, Rauheit etc.), Objektbeleuchtung (Licht- bzw. Schattenarten) sowie die damit verbundenen Interaktionen nach optischen Gesetzen innerhalb einer virtuellen Szenerie (Radiosity-Raytracing). Diese Faktoren werden über die sogenannte Texturierung im Wesentlichen bei der Objektgeometrie über die Materialzuweisung geprägt (Bild 2.19).

Eine detaillierte Diskussion des VRML-Formates und seiner Wechselwirkung mit additiven Fertigungsanlagen findet sich in [Ming02].

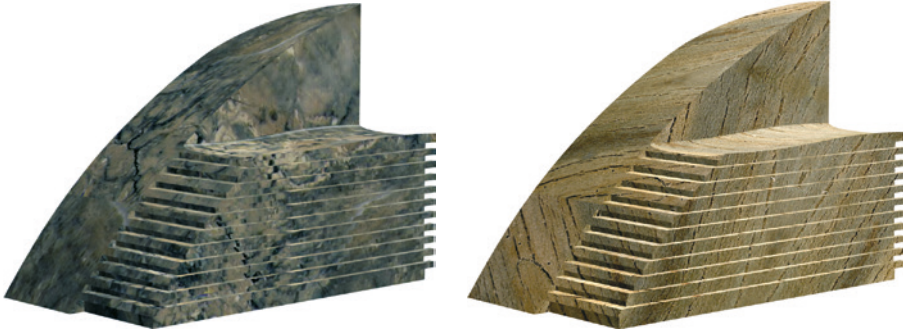


Bild 2.19 Objektgeometrie mit unterschiedlichen Materialzuweisungen bei gleichem Beleuchtungszustand der Szenerie
 Quelle: FH Aachen, GoetheLab/F.-M. Schmidt

2.2.2.4 AMF-Format

Das Additive Manufacturing File Format (AMF) ist ein Standard für Datensätze, die neben der Geometrie auch Informationen zu unterschiedlichen Materialien, Farben, Texturen und weiteren physikalisch-technologische Eigenschaften enthalten. Mit dem AMF können auch Maschinen angesteuert werden, die Materialmix, Textur und Farbe direkt im Prozess erzeugen. Das AMF-Format unterstützt damit die Fertigung mehrfarbiger Bauteile aus Gradientenmaterialien, oder mit Texturen oder Mikrostrukturen. Es wurde von der ASTM (American Society for Testing and Materials) als ISO/ASTM 52915:2016, Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2 veröffentlicht [ASTM 52915:2016].

Das Format ist XML-basiert und damit Plattform-unabhängig. Das AMF-Format ist kompatibel mit klassischen STL-Files, reduziert sich dann allerdings auf die Geometrie. Die einzelnen Funktionen werden durch Header im Datensatz aktiviert. Das AMF Format ist auch vorwärtskompatibel in dem Sinne, dass es zukünftig Erweiterungen zulassen soll.

Es existieren fünf Hauptbefehle, welche die Geometrie, sowie die Eigenschaften des Modells definieren. Es ist möglich, einzelne Befehle sowohl auf das Gesamtbauteil, als auch auf einzelne Strukturelemente anzuwenden.

Im Folgenden werden die Befehle beschrieben:

1. **<object>** Dieser Befehl definiert ein oder mehrere Materialvolumina. Diese werden über Identifizierungsnummern eindeutig gekennzeichnet. In einer AMF-Datei muss mindestens ein Objekt vorhanden sein, mehrere sind optional für Baugruppen.
2. **<material>** Dies ist ein optionaler Befehl, welcher Materialien definiert, die anschließend bestimmten Volumina zugeordnet werden können. Verschiedene Materialien werden durch eine ID eindeutig definiert.

3. `<texture>` Auch der „texture“ Befehl ist optional und erlaubt die Zuordnung von Farben und Texturen
 - a) Texture maps: Texture maps ordnen bestimmten Oberflächen oder Volumina Farben und Materialien zu. Dies funktioniert ähnlich wie die Texturierung im Grafikbereich.
 - b) Farben: Farben werden über den rot, grün, blau und alpha-Kanal definiert. Jedem Kanal wird dabei ein Wert zwischen null und eins zugewiesen, welcher die Stärke der Farbe angibt. Diese Werte können als Konstanten vorliegen, oder als Formel von der geometrischen Lage abhängig gemacht werden. Der alpha-Kanal steuert die Transparenz und erlaubt das Durchscheinen von untergeordneten Farben. Das `<color>`-Element kann auf Materialien, Objekte, Volumina, Scheitelpunkte oder Dreiecke angewendet werden. Die Rangfolge der Farben ist genau umgekehrt, sodass beispielsweise die Farbe eines Dreiecks die höchste Priorität besitzt.
4. `<constellation>` Falls innerhalb der AMF-Datei mehrere Bauteile vorhanden sind, gibt der „constellation“-Befehl an, in welcher Reihenfolge die Bauteile gedruckt werden sollen.
5. `<metadata>` Innerhalb des „metadata“-Bereichs können zusätzliche Informationen, wie beispielsweise. Autor, Projektname, Copyright, verwendetes CAD-System, etc. angegeben werden.
6. Neben den einfachen geradlinigen Kanten der STL-Dreiecke, besitzt das AMF-Format die Möglichkeit von gebogenen Dreieckskanten, welche eine bessere Approximation der Geometrie ermöglichen. Dadurch wird eine Reduktion der Datenmenge, bei gleichbleibender Geometrieauflösung möglich.

AMF ist frei verfügbar und trägt dazu bei, die Anzahl von proprietären Lösungen nicht weiter ansteigen zu lassen und einen der größten Vorteile der STL-Formatierung zu bewahren: den maschinenunabhängigen Einsatz.

Weitere Vorteile liegen in zusätzlichen Funktionen, wie beispielsweise der Definition von Längeneinheiten, Kompatibilität mit FE-Anwendungen (Finite Elemente), Begrenzung der Anzahl der möglichen Drucke, Informationen über die Bauraumorientierung, Passwortverschlüsselung, etc.

Mit der Entwicklung des AMF-Formates wurden die größten Nachteile des STL-Formates eliminiert. Es basiert aber weiterhin auf Dreiecken. Durch neue Kompressionsalgorithmen wurde die Datenmenge reduziert, die grundlegenden Nachteile der STL-Formulierung bleiben aber.

Das AMF-Format kämpft allerdings immer noch um eine breite Akzeptanz, die ihm vor allem die großen Hersteller bisher noch versagen.

■ 2.3 Physikalische Prinzipien zur Erzeugung der Schicht

Alle *additiven Fertigungsverfahren* arbeiten heute diskret in zwei Teilschritten, die, je nach Verfahren, sequentiell oder simultan ablaufen:

1. Generieren einer Schicht (x - y -Ebene).
2. Verbinden dieser Schicht mit der vorhergehenden (z -Richtung).

Der Aufbau in z -Richtung, also das Fügen der Einzelschichten, erfolgt mit Ausnahme der meisten Schicht-Laminat-Verfahren in der gleichen Weise, wie der Aufbau in x - y -Richtung: Die notwendige Energie, respektive Bindermenge, wird so bemessen, dass nicht nur die Schicht selber, sondern darüber hinaus auch ein Teil der vorhergehenden Schicht beeinflusst und auf diese Weise mit der neuen Schicht verbunden wird. Bei den Schicht-Laminat-Verfahren werden die Schichten aus Folien mit vorgegebener Stärke (z -Inkrement) ausgeschnitten und aufeinander geklebt, miteinander verschweißt oder anderweitig gefügt.

Heute bekannte oder sichtbare kontinuierlich arbeitende Verfahren (vergleiche Abschnitt 2.1 „Verfahrensgrundlagen“) arbeiten nach den gleichen Prinzipien, die bei der diskreten Schichtherstellung verwendet werden. Dabei laufen der Aufbau in x - y -Richtung und der in z -Richtung simultan ab.

Zur Umsetzung des additiven Prinzips eignen sich mehrere grundsätzlich unterschiedliche physikalische Verfahren. Zur systematischen Betrachtung hat sich die Differenzierung nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials bewährt und zwar so, wie es in die Maschine eingebracht wird:

1. Generieren aus der flüssigen Phase (Abschnitt 2.3.1)
 - Verfestigung, vorzugsweise durch Polymerisation flüssiger oder teigiger Materialien (laser- oder lampengestützte Stereolithographie, Polymerdrucken).
2. Generieren aus der festen Phase (Abschnitt 2.3.2)
 - An- oder Aufschmelzen und Verfestigen von Pulvern, Pulvermischungen oder Granulaten (Sinter- und Schmelzverfahren),
 - Ausschneiden oder Ausfräsen aus Folien, Bändern oder Platten (Schicht-Laminat-Verfahren),
 - An- oder Aufschmelzen und Verfestigen von festen Materialien (Extrusionsverfahren),
 - Verkleben von Granulaten oder Pulvern durch Binder (3D Printing-Verfahren).
3. Generieren aus der Gasphase (Abschnitt 2.3.3)
 - Physikalisches Abscheiden aus Aerosolen,
 - Chemisches Abscheiden aus der Gasphase.

2.3.1 Generieren aus der flüssigen Phase

Als unter Umgebungsbedingungen flüssige Ausgangsmaterialien werden im Bereich der additiven Fertigung zurzeit nur un- oder niedrigvernetzte Monomere vom Typ Acrylat, Epoxidharz oder Vinyletherharz eingesetzt. Sie werden durch ultraviolette Strahlung lokal vernetzt und bilden so feste Schichten und Bauteile. Die Verfahren werden als Photopolymerisation (oft nur: Polymerisation), Stereolithographie oder Stereographie bezeichnet.

2.3.1.1 Photopolymerisation – Stereolithographie (SL)

Alle Verfahren, die auf der Verfestigung von flüssigen Monomeren basieren, arbeiten nach dem Prinzip der (Photo²)-Polymerisation. Verwendet werden zähflüssige, un- oder niedrig vernetzte Monomere, die mit geeigneten Photo-Inhibitoren durchsetzt sind. Bei ultravioletter Bestrahlung setzt spontan eine Polymerisation ein, infolge der das flüssige Monomer zu einem festen Polymer reagiert. Dieser Prozess, der mit allen UV-Lichtquellen, also auch mit Lampen und grundsätzlich auch mit Sonnenlicht abläuft, wird für die besonderen Belange der additiven Fertigung bezüglich der Belichtungsstrategie modifiziert:

Beim *Laser-Scanner-Verfahren*, der ältesten und auch heute noch genauesten Methode, bildet ein feiner Laserstrahl die Kontur des jeweiligen Querschnitts auf der Oberfläche eines Harzbades ab und erzeugt so örtlich die notwendige kritische Energiedichte zur Polymerisation und damit die gewünschte Verfestigung. Bei heutigen industriellen Verfahren liefert ein einziger Laserstrahl im Fokus die benötigte Energie. Insbesondere in der Mikrotechnik wird auch das Zwei-Photonen-Verfahren angewandt, bei dem die kritische Energie im Kreuzungspunkt von zwei einzelnen jeweils unterkritischen Laserstrahlen erzeugt wird.

Bei den *Maskenverfahren* gibt es zwei Varianten: Beim Lampe-Maske-Verfahren wird der gesamte Querschnitt auf eine transparente Maske abgebildet und mithilfe starker UV-Lampen durch diese Maske auf die Oberfläche des Harzbades projiziert. Beim Projektionsverfahren erfüllt ein leistungsstarker Projektor (Beamer) beide Funktionen und projiziert die Schichtinformation direkt auf die zu belichtende Fläche.

Beim *Druckkopf-Lampe-Verfahren* (Polymer Printing) wird das Baumaterial mittels Druckkopf der Kontur entsprechend aufgebracht und direkt im Anschluss daran mittels einer UV-Lampe polymerisiert.

² Verfahren, die thermisch polymerisieren sind veröffentlicht (*Thermal Polymerization, TP*), aber nicht industriell umgesetzt.

2.3.1.2 Grundlagen der Polymerisation

Unter Polymerisation versteht man eine Kettenreaktion, bei der ungesättigte Moleküle zu Makromolekülen (Polymeren) reagieren [Michaeli06]. Dadurch entsteht aus einem Gemisch von Einzelmolekülen (Monomeren) ein vernetztes Makromolekül, der ausgehärtete Kunststoff.

Die Monomere bestehen zumeist aus Kohlen-Wasserstoff-Verbindungen und besitzen durch Wärme oder Katalysatoren aufspaltbare Doppelbindungen. Es erfolgt eine Kettenreaktion, in deren Verlauf sich die Monomere zu Polymerketten verbinden. Je nach Art der reaktionsfähigen Teilchen, die die Polymerisation auslösen, unterscheidet man in radikalische, kationische und anionische Polymerisation. Für den Einsatz als Additive Manufacturing-Verfahren relevant sind die radikalische und die kationische Polymerisation. Man unterscheidet dabei drei Phasen der Polymerisation:

- Startreaktion,
- Kettenfortpflanzungsreaktion,
- Abbruchreaktion.

In der Startreaktion zerfallen im Harz enthaltene Initiatoren durch äußere Energiezufuhr in ihre Radikale mit einem einzelnen, ungepaarten Elektron auf der äußeren Schale [Christen94]. Da das Teilchen bemüht ist, einen Partner für sein Elektron zu finden, sind Radikale extrem reaktionsfreudig.

In der Kettenfortpflanzungs- oder auch Wachstumsreaktion reagieren die Radikale mit dem doppelgebundenen Kohlenstoff im Monomer. Durch die Aufspaltung der Doppelbindung erhält das Monomer auf einer Seite ebenfalls ein alleinstehendes Elektron auf der äußeren Schale. Die neue Gruppe reagiert weiter mit anderen Monomeren, wodurch sich lange Polymerketten bilden. Durch die Abbruchreaktion wird die Kettenreaktion gestoppt. Der Abbruch erfolgt durch:

- Zusammenschluss zweier Polymerketten zu einer Kette,
- Reaktion der Polymerkette mit dem Radikal eines Initiators,
- Übertragung eines Wasserstoffatoms zu einem Makroradikal,
- Eliminierung eines bindungsfähigen Wasserstoffatoms.

Der Verfestigung von Acrylaten liegt die *radikalische Polymerisation* zugrunde. Acrylate wurden aufgrund ihrer gegenüber Epoxidharzen höheren Reaktivität in den Anfängen der additiven Fertigung (Stereolithographie) fast ausschließlich verwendet, im Zuge der Weiterentwicklung der Systeme, vor allen Dingen von leistungsstarken Lasern, aber zunehmend von den Epoxidharzen verdrängt, die höhere Genauigkeiten aufgrund eines geringeren Schrumpfes bieten. Mit der Verbreitung von Polymerdrucker-Systemen und Maskenverfahren, die Lampen mit gegenüber Lasern deutlich geringerer Intensitäten verwenden, gewinnen Materialien auf Acrylatbasis wieder an Bedeutung.