

Andreas Gebhardt

Additive Fertigungsverfahren

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

5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

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 Lamine 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) – OPTOMECH	233
3.3.3	Laser Metal Deposition (LMD), TRUMPF	237
3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Layer Laminat 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 Mesoscale Material Deposition (M3D) – OPTOMECC	302
3.7	Hybridverfahren	306
3.7.1	Laserauftragungsschweißen 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 Kipphelbel 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 Siegwart 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