

# Inhaltsverzeichnis

Widmung .....	V
Vorwort .....	VII
Über den Autor .....	IX
Danksagung .....	XI
<b>1 Einordnung und Begriffsbestimmung .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Merkmale der Additiven Fertigungsverfahren .....</b>	<b>21</b>
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
<b>3</b>	<b>Additive Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing .....</b>	<b>103</b>
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 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) – OPTOMECH	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
<b>4</b>	<b>Rapid Prototyping . . . . .</b>	<b>345</b>
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
<b>5</b>	<b>Rapid Tooling</b>	<b>411</b>
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) - OPTOMECC.....	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
<b>6</b>	<b>Direct Manufacturing - Rapid Manufacturing.....</b>	<b>457</b>
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
<b>7</b>	<b>Sicherheitsvorschriften und Umweltschutz .....</b>	<b>527</b>
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
<b>8</b>	<b>Aspekte zur Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>543</b>
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
<b>9</b>	<b>Zukünftige Rapid Prototyping-Verfahren .....</b>	<b>561</b>
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
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>581</b>
	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
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>679</b>
	Stichwortverzeichnis .....	689