

Inhaltsverzeichnis

Andreas Gebhardt

Generative Fertigungsverfahren

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

ISBN (Buch): 978-3-446-43651-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-43652-7

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43651-0>

sowie im Buchhandel.

# 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 <i>Generativen Fertigungsverfahren</i> .....	3
1.2.1 Begriffsbestimmungen.....	3
1.2.2 Eigenschaften der Generativen Fertigungsverfahren.....	4
1.3 Einteilung der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i> .....	6
1.3.1 Rapid Prototyping .....	7
1.3.2 Rapid Manufacturing .....	9
1.3.2.1 Rapid Manufacturing – Direct Manufacturing .....	10
1.3.2.2 Rapid Manufacturing – Direct Tooling (Rapid Tooling – Prototype Tooling).....	10
1.3.3 Nicht-Generative Verfahren – Indirect Prototyping und Indirect Tooling .....	11
1.3.4 Rapid Prototyping oder Rapid Manufacturing?.....	12
1.3.5 Begriffsvielfalt .....	12
1.3.6 Wie schnell ist Rapid?.....	13
1.4 Integration der Generativen Fertigungstechnik in den Produktentstehungsprozess .....	14
1.4.1 Generative Verfahren in der Produktentwicklung.....	14
1.4.2 Generative Verfahren für die stückzahlen-unabhängige Produktion .....	16
1.4.3 Generative Verfahren für die individualisierte Produktion...	16
1.5 Maschinen für die Generative Fertigung .....	17

<b>2</b>	<b>Merkmale der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i></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	26
2.2.1.1	Datenfluss und Schnittstellen	26
2.2.1.2	Modellierung dreidimensionaler Körper mittels 3D CAD	29
2.2.1.2.1	CAD-Modelltypen	29
2.2.1.2.2	Anforderungen an CAD-Systeme	31
2.2.1.3	Modellierung dreidimensionaler Körper aus Messwerten	32
2.2.2	Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten	34
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	44
2.3	Physikalische Prinzipien zur Erzeugung der Schicht	46
2.3.1	Generieren aus der flüssigen Phase	47
2.3.1.1	Photopolymerisation – Stereolithographie (SL)	47
2.3.1.2	Grundlagen der Polymerisation	48
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	58
2.3.2	Generieren aus der festen Phase	59
2.3.2.1	Schmelzen und Verfestigen von Pulvern und Granulaten – Sintern (Lasersintern, LS), Schmelzen	59
2.3.2.1.1	Materialien für das Sintern und Schmelzen	60
2.3.2.1.2	Vor- und Nachteile des Sinterns und Schmelzens	65
2.3.2.1.3	Proprietäre oder handelsübliche Pulver?	66
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)	70
2.3.2.3.1	Extrudierende und ballistische Verfahren	70
2.3.2.3.2	Vor- und Nachteile der FLM-Verfahren	73
2.3.2.4	Verkleben von Granulaten mit Bindern – 3D Printing (3DP) – Pulver-Binder Verfahren	73
2.3.2.4.1	Vor- und Nachteile von Pulver-Binder Verfahren	74
2.3.3	Generieren aus der Gasphase	75
2.3.3.1	Aerosoldruckverfahren	75

2.3.3.1.1	Vor- und Nachteile von Aerosoldruckverfahren .....	76
2.3.3.2	Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) .....	76
2.3.4	Sonstige Verfahren .....	78
2.3.4.1	Sonolimineszenz .....	78
2.3.4.2	Elektroviskosität.....	78
2.4	Elemente zur Erzeugung der physischen Schicht .....	79
2.4.1	Bewegungselemente .....	80
2.4.1.1	Plotter .....	80
2.4.1.2	Scanner.....	80
2.4.1.3	Parallelroboter (Delta Roboter).....	82
2.4.2	Generierende und konturierende Elemente.....	82
2.4.2.1	Laser .....	83
2.4.2.2	Druckköpfe.....	85
2.4.2.3	Extruder .....	88
2.4.2.4	Schneidmesser .....	89
2.4.2.5	Fräser.....	89
2.4.3	Schichterzeugendes Element .....	90
2.5	Klassifizierung der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i> .....	91
2.6	Zusammenfassende Betrachtung der theoretischen Potenziale der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i> .....	93
2.6.1	Werkstoffe .....	94
2.6.2	Bauteileigenschaften.....	96
2.6.3	Details .....	97
2.6.4	Genauigkeiten.....	98
2.6.5	Oberflächengüte.....	98
2.6.6	Entwicklungspotenzial.....	99
2.6.7	Kontinuierliche 3D Modellierung .....	99
<b>3</b>	<b>Generative Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing.....</b>	<b>101</b>
3.1	Polymerisation – Stereolithographie (SL).....	105
3.1.1	Maschinenspezifische Grundlagen.....	105
3.1.1.1	Laser-Stereolithographie .....	105
3.1.1.2	Digital Light Processing (DLP).....	115
3.1.1.3	Polyjet und Multi-Jet Modeling (MJM) und Paste Polymerization .....	116
3.1.2	Übersicht: Polymerisation – Stereolithographie.....	118
3.1.3	Stereo Lithography Apparatus (SLA) – 3D Systems .....	118
3.1.4	STEREOS – EOS .....	129
3.1.5	Stereolithographie – Fockele & Schwarze (F&S).....	130
3.1.6	Mikrostereolithographie – microTEC.....	131

3.1.7	Solid Ground Curing – Cubital .....	134
3.1.8	Digital Light Processing – Envisiontec .....	135
3.1.9	Polymerdrucken – Stratasys/Objet .....	141
3.1.10	Multi-Jet-Modeling (MJM) – ProJet – 3D Systems .....	146
3.1.11	Digital Wax .....	150
3.1.12	Film Transfer Imaging – 3D Systems .....	153
3.1.13	Sonstige Polymerisationsverfahren .....	156
3.1.13.1	Paste Polymerization – OptoForm .....	156
3.2	Sintern/Selektives Sintern – Schmelzen im Pulverbett .....	156
3.2.1	Maschinenspezifische Grundlagen .....	157
3.2.2	Übersicht: Sintern – Schmelzen .....	162
3.2.3	Selektives Lasersintern – 3D Systems .....	164
3.2.4	Lasersintern – EOS .....	176
3.2.5	Laserschmelzen – Realizer GmbH .....	189
3.2.6	Laserschmelzen – SLM-Solutions .....	193
3.2.7	Laserschmelzen – Renishaw LTD .....	195
3.2.8	Laser Cusing – Concept Laser .....	197
3.2.9	Direktes Laserformen – TRUMPF .....	204
3.2.10	Elektronenstrahlsintern – ARCAM .....	205
3.2.11	Selective Mask Sintering (SMS) – Sintermask .....	210
3.2.12	Lasersintern – Phenix .....	213
3.3	Beschichten – Schmelzen mit der Pulverdüse .....	216
3.3.1	Verfahrensprinzip .....	217
3.3.1.1	Pulverdüsenkonzepte .....	218
3.3.1.2	Prozessüberwachung und -regelung .....	219
3.3.2	Laser Engineered Net Shaping (LENS) – Optomec .....	220
3.3.3	Direct Metal Deposition (DMD) – DM3D Technology, LLC (TRUMPF) .....	223
3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Layer Laminat Manufacturing (LLM) ..	227
3.4.1	Übersicht: Schicht-Laminat-Verfahren .....	227
3.4.2	Maschinenspezifische Grundlagen .....	228
3.4.3	Laminated Object Manufacturing (LOM) – Cubic Technologies .....	233
3.4.4	Rapid Prototyping System (RPS) – Kinergy .....	239
3.4.5	Selective Adhesive and Hot Press Process (SAHP) – Kira ..	240
3.4.6	Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann .....	240
3.4.7	Stratoconception – rp2i .....	241
3.4.8	Paper 3D Printing – MCor .....	241
3.4.9	Plastic Sheet Lamination – Solido .....	244
3.4.10	Sonstige Schicht-Laminat-Verfahren .....	247
3.4.10.1	Bauteile aus Metalllamellen – Laminated Metal Prototyping	247

3.4.10.1.1	Metalllamellenwerkzeug – Weihbrecht .....	247
3.5	Extrusionsverfahren – Fused Layer Modeling (FLM) .....	248
3.5.1	Übersicht: Extrusionsverfahren .....	248
3.5.2	Fused Deposition Modeling (FDM) – Stratasys .....	249
3.5.3	Wachsprinter – Solidscape .....	260
3.5.4	Multi-Jet-Modeling (MJM) – ThermoJet – 3D Systems .....	263
3.6	Three Dimensional Printing (3DP) .....	264
3.6.1	Übersicht: 3D Printing .....	264
3.6.2	3D Printer – 3D Systems/Z-Corporation .....	265
3.6.3	Metall und Formsand Printer – ExOne .....	269
3.6.3.1	Metall-Linie: Direct Metal Printer .....	271
3.6.3.2	Formsand-Linie: Direct Core and Mold Making Machine ..	274
3.6.4	Direct Shell Production Casting (DSPC) – Soligen .....	276
3.6.5	3D Drucksystem – Voxeljet .....	279
3.6.6	Maskless Masoscale Material Deposition (M3D) – Optomec	283
3.7	Hybridverfahren .....	285
3.7.1	Laserauftragsschweißen und Fräsen – Controlled Metal Build Up (CMB) – Röders .....	286
3.7.2	Laminieren und Ultraschallschweißen – Ultrasonic Consolidation – Fabrisonic/Solidica .....	288
3.8	Zusammenfassende Betrachtung der Rapid Prototyping Verfahren ...	292
3.8.1	Charakteristische Eigenschaften der <i>Generativen</i> <i>Fertigungsverfahren</i> im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren .....	293
3.8.2	Genauigkeit .....	295
3.8.3	Oberflächen .....	299
3.8.4	Benchmark-Tests und User-Parts .....	302
3.9	Entwicklungsziele .....	305
3.10	Folgeprozesse .....	306
3.10.1	Zielwerkstoff Kunststoff .....	306
3.10.2	Zielwerkstoff Metall .....	307
<b>4</b>	<b>Rapid Prototyping .....</b>	<b>309</b>
4.1	Einordnung und Begriffsbestimmung .....	309
4.1.1	Eigenschaften von Prototypen .....	309
4.1.2	Charakteristika des Rapid Prototyping .....	311
4.2	Strategische Aspekte beim Einsatz von Prototypen .....	312
4.2.1	Produktentwicklungsschritte .....	312
4.2.2	Time to market .....	312
4.2.3	Frontloading .....	313
4.2.4	Digitales Produktmodell .....	316

4.2.5	Die Grenzen der physischen Modellierung .....	317
4.2.6	Kommunikation und Motivation .....	319
4.3	Operative Aspekte beim Einsatz von Prototypen .....	319
4.3.1	Rapid Prototyping als Werkzeug zur schnellen Produktentwicklung .....	320
4.3.1.1	Modelle .....	320
4.3.1.2	Modellklassen .....	320
4.3.1.3	Modellklassen und Generative Verfahren .....	324
4.3.1.4	Zuordnung von Modellklassen und Modelleigenschaften zu den Familien der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i> .....	328
4.3.2	Anwendung des Rapid Prototyping in der industriellen Produktentwicklung .....	331
4.3.2.1	Beispiel: Pumpengehäuse .....	331
4.3.2.2	Beispiel: Büroleuchte .....	333
4.3.2.3	Beispiel: Einbauleuchtenfassung .....	337
4.3.2.4	Beispiel: Modellbaggerarm .....	337
4.3.2.5	Beispiel: LCD-Projektor .....	341
4.3.2.6	Beispiel: Kapillarboden für Blumentöpfe .....	343
4.3.2.7	Beispiel: Gehäuse einer Kaffeemaschine .....	344
4.3.2.8	Beispiel: Ansaugkrümmer eines Vierzylindermotors .....	344
4.3.2.9	Beispiel: Cocktailbecher .....	346
4.3.2.10	Beispiel: Spiegeldreieck .....	346
4.3.2.11	Beispiel: Cabriovertop .....	347
4.3.3	Rapid Prototyping Modelle zur Visualisierung von 3D Daten .....	351
4.3.4	Rapid Prototyping in der Medizin .....	351
4.3.4.1	Charakteristika medizinischer Modelle .....	351
4.3.4.1.1	Große Datenmengen .....	351
4.3.4.1.2	Nicht exakt definierte Modellabmessungen .....	352
4.3.4.1.3	Mehrere Modelle .....	352
4.3.4.1.4	Transparenz .....	352
4.3.4.1.5	Sterilisierbarkeit .....	352
4.3.4.1.6	Biokompatibilität .....	353
4.3.4.1.7	Stützstrukturen .....	353
4.3.4.1.8	Unverbundene Modellteile .....	353
4.3.4.2	Anatomische Faksimiles .....	353
4.3.4.3	Beispiel: Anatomisches Faksimile für eine Umstellungsosteotomie .....	355
4.3.5	Rapid Prototyping in Design, Kunst und Architektur .....	356
4.3.5.1	Modellbildung in Design und Kunst .....	356
4.3.5.2	Beispiel Kunst: Computer-Skulptur .....	357

4.3.5.3	Beispiel Design: Flaschenöffner. ....	358
4.3.5.4	Angewandte Kunst – Bildhauerei und Plastiken .....	359
4.3.5.5	Beispiel Archäologie: Büste der Königin Teje .....	361
4.3.5.6	Modellbildung in der Architektur .....	362
4.3.5.7	Beispiel Architektur: Deutscher Pavillon für die Expo '92 .	362
4.3.5.8	Beispiel Architektur: Ground Zero .....	363
4.3.5.9	Beispiel Architekturdenkmäler: Dokumentation von baugeschichtlich relevanten Gebäuden	364
4.3.6	Rapid Prototyping zur Überprüfung von Rechenverfahren.	366
4.3.6.1	Spannungsoptische und thermoelastische Spannungsanalyse.....	366
4.3.6.1.1	Spannungsoptische Spannungsanalyse .....	366
4.3.6.1.2	Thermoelastische Spannungsanalyse (THESA).....	367
4.3.6.2	Beispiel: Spannungsoptische Spannungsanalyse an einem Kipphebel eines Lkw-Verbrennungsmotors.....	368
4.3.6.3	Beispiel: Thermoelastische Spannungsanalyse zum Festigkeitsnachweis an einer Automobilfelge .....	370
4.4	Ausblick .....	372
<b>5</b>	<b>Rapid Tooling .....</b>	<b>375</b>
5.1	Einordnung und Begriffsbestimmung .....	375
5.1.1	Direkte und indirekte Verfahren .....	376
5.2	Eigenschaften generativ gefertigter Werkzeuge .....	378
5.2.1	Strategische Aspekte beim Einsatz Generativer Werkzeuge	378
5.2.1.1	Schnelligkeit .....	378
5.2.1.2	Umsetzung neuer technischer Konzepte.....	379
5.2.2	Konstruktive Eigenschaften generativ gefertigter Werkzeuge .....	380
5.2.2.1	Prototypwerkzeuge .....	381
5.2.2.1.1	Weiche gegossene Werkzeuge .....	381
5.2.2.1.2	Harte gegossene Werkzeuge.....	382
5.2.2.1.3	Harte direkt gefertigte Werkzeuge und Werkzeugeinsätze.	382
5.2.2.2	Bereitstellung der Daten .....	384
5.3	Indirekte Rapid Tooling Verfahren – Abformverfahren und Folgeprozesse .....	385
5.3.1	Eignung Generativer Verfahren zur Herstellung von Urmodellen für Folgeprozesse .....	386
5.3.2	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile.....	387
5.3.2.1	Abgießen in weiche Werkzeuge oder Formen .....	388
5.3.2.1.1	Vakuumgießen .....	388



5.3.2.1.2	Nylongießen.....	391
5.3.2.1.3	Silikonabguss .....	392
5.3.2.1.4	Photocasting .....	392
5.3.2.1.5	Spincasting .....	392
5.3.2.2	Abgießen in harte Werkzeuge .....	393
5.3.2.2.1	Metallspritzen.....	393
5.3.2.2.2	Gießharzwerkzeuge.....	394
5.3.2.2.3	Maskenwerkzeuge, Polyurethangießen.....	395
5.3.2.2.4	Niederdruckspritzgießen, Reaction Injection Molding (RIM)	396
5.3.2.2.5	3D Keltool – Course4 Technology .....	396
5.3.2.3	Andere Abformverfahren für harte Werkzeuge .....	397
5.3.2.3.1	Ford Sprayform Verfahren.....	397
5.3.2.3.2	Rapid Solidification Process, RSP .....	397
5.3.3	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen..	398
5.3.3.1	Der Feingussprozess mit generativen Prozessschritten....	398
5.3.3.2	Werkzeuge durch Feinguss von Rapid Prototyping Urmodellen .....	402
5.4	Direkte Rapid Tooling Verfahren.....	402
5.4.1	Prototype Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Kunststoff-Rapid-Prototyping-Modellen und -Verfahren....	402
5.4.1.1	ACES Injection Molding, AIM.....	403
5.4.1.2	Tiefziehen oder Thermoformen .....	404
5.4.1.3	Ausgießen von Rapid Prototyping Modellen .....	405
5.4.1.4	Herstellung von Kernen und Formen für den Metallguss ..	405
5.4.1.4.1	Sandguss .....	405
5.4.1.4.2	Druckguss .....	407
5.4.2	Metallwerkzeuge auf der Basis von mehrstufigen generativen Prozessen .....	407
5.4.2.1	Selektives Lasersintern von Metallen – IMLS – 3D Systems	407
5.4.2.2	Paste Polymerization – OptoForm.....	408
5.4.2.3	3D Printing von Metallen – ExOne.....	408
5.4.3	Direct Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Metall Rapid Prototyping Verfahren .....	409
5.4.3.1	Mehrkomponenten-Metallpulver-Lasersintern .....	409
5.4.3.2	Einkomponenten-Metallpulver-Verfahren – Sintern und Generieren .....	410
5.4.3.2.1	DirectTool – EOS.....	411
5.4.3.2.2	Laserschmelzen – SLM-Solutions .....	412
5.4.3.2.3	Laser Cusing – Concept Laser .....	413
5.4.3.2.4	Direktes Laserformen – TRUMPF .....	413
5.4.3.2.5	Elektronenstrahlsintern – ARCAM.....	414

5.4.3.2.6	Lasersintern – Phenix .....	415
5.4.3.3	Laser-Generieren mit Pulver und Draht .....	415
5.4.3.3.1	Laser Engineered Net Shaping (LENS) – Optomec.....	416
5.4.3.3.2	Direct Metal Deposition (DMD) .....	416
5.4.3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Metalllamellenwerkzeuge – Laminated Metal Tooling .....	417
5.4.3.4.1	Ultrasonic Consolidation – Fabrisonic/Solidica .....	417
5.4.3.4.2	Lamellenwerkzeug – Weihbrecht .....	417
5.5	Ausblick .....	418
<b>6</b>	<b>Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing .....</b>	<b>421</b>
6.1	Einordnung und Begriffsbestimmungen.....	421
6.1.1	Begriffe .....	422
6.1.2	Vom Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing .....	423
6.1.3	Workflow für das Rapid Manufacturing .....	424
6.1.4	Anforderungen an die direkte Fertigung .....	425
6.2	Potenziale der Generativen Fertigung von Endprodukten.....	425
6.2.1	Erhöhte Konstruktionsfreiheit .....	425
6.2.1.1	Erweiterte konstruktive und gestalterische Möglichkeiten..	426
6.2.1.2	Funktionsintegration .....	427
6.2.1.3	Neuartige Konstruktionselemente .....	427
6.2.2	Herstellung traditionell nicht herstellbarer Produkte.....	428
6.2.3	Variation von Massenprodukten .....	429
6.2.4	Personalisierung von Massenprodukten.....	430
6.2.4.1	Passive Personalisierung – Hersteller Personalisierung ...	431
6.2.4.2	Aktive Personalisierung – Kunden Personalisierung.....	433
6.2.5	Realisierung neuer Werkstoffe.....	434
6.2.6	Realisierung neuer Fertigungsstrategien .....	435
6.2.7	Entwurf neuer Arbeits- und Lebensformen .....	436
6.3	Anforderungen an Generative Verfahren für die Fertigung .....	436
6.3.1	Anforderungen an die generative Herstellung eines Bauteils .....	437
6.3.1.1	Prozess .....	437
6.3.1.2	Materialien.....	439
6.3.1.3	Organisation .....	440
6.3.1.4	Konstruktion .....	441
6.3.1.5	Qualitätssicherung .....	441
6.3.1.6	Logistik .....	442
6.3.2	Anforderungen an die generative Serienfertigung mit heutigen Verfahren .....	442
6.3.2.1	Prozess .....	442

6.3.2.2	Materialien.....	444
6.3.2.3	Organisation .....	445
6.3.2.4	Konstruktion .....	445
6.3.2.5	Qualitätssicherung .....	445
6.3.2.6	Logistik .....	446
6.3.3	Zukünftige Anforderungen an die generative Serienfertigung.....	446
6.3.3.1	Prozess .....	447
6.3.3.2	Materialien.....	449
6.3.3.3	Organisation .....	449
6.3.3.4	Konstruktion .....	450
6.3.3.5	Qualitätssicherung .....	451
6.3.3.6	Logistik .....	452
6.4	Realisierung des Rapid Manufacturing.....	453
6.4.1	Generative Fertigungsanlagen als Elemente einer Fertigungskette.....	453
6.4.2	Generative Anlagen zur Komplettfertigung von Produkten	454
6.4.2.1	Industrielle Komplettfertigung .....	454
6.4.2.2	Individuelle Komplettfertigung (Personal Fabrication) ....	456
6.5	Anwendungsbereiche .....	457
6.5.1	Anwendungsfelder nach Werkstoffen .....	458
6.5.1.1	Metallische Werkstoffe und Legierungen .....	458
6.5.1.2	Hochleistungskeramiken.....	459
6.5.1.3	Kunststoffe.....	461
6.5.1.4	Neue Werkstoffe.....	461
6.5.2	Anwendungsfelder nach Branchen.....	462
6.5.2.1	Werkzeugbau.....	462
6.5.2.2	Gießereiwesen.....	464
6.5.2.2.1	Dentaltechnik .....	465
6.5.2.2.2	Schmuckindustrie .....	466
6.5.2.3	Medizinische Geräte und Hilfsmittel, Medizintechnik ....	467
6.5.2.3.1	Zahnspangen: Aligner – Invisalign.....	468
6.5.2.3.2	Hörgeräteschalen, Otoplastiken.....	469
6.5.2.3.3	Technische Medizingeräte.....	471
6.5.2.4	Design und Kunst.....	472
6.6	Perspektiven .....	477
<b>7</b>	<b>Sicherheitsvorschriften und Umweltschutz .....</b>	<b>481</b>
7.1	Gesetzliche Grundlagen für das Betreiben und das Herstellen von Generativen Fertigungsanlagen und den Umgang mit den zugehörigen Werkstoffen.....	482

7.1.1	Baurecht .....	483
7.1.2	Wasserrecht.....	484
7.1.3	Gewerberecht .....	485
7.1.4	Immissionsschutzrecht .....	486
7.1.5	Abfallrecht .....	488
7.1.6	Chemikalienrecht.....	489
7.1.6.1	Sicherheitsdatenblätter .....	491
7.1.6.2	REACH.....	492
7.2	Anmerkungen zu Materialien für die Generative Fertigung.....	493
7.3	Anmerkungen zur Benutzung von generativ gefertigten Bauteilen ...	494
<b>8</b>	<b>Aspekte zur Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>497</b>
8.1	Strategische Aspekte.....	498
8.1.1	Strategische Aspekte für den Einsatz Generativer Verfahren in der Produktentwicklung.....	498
8.1.1.1	Qualitative Ansätze .....	498
8.1.1.2	Quantitative Ansätze.....	499
8.2	Operative Aspekte .....	500
8.2.1	Auswahl geeigneter <i>Generativer Fertigungsverfahren</i> .....	501
8.2.2	Zur Ermittlung der Kosten von Rapid Prototyping Verfahren .....	501
8.2.2.1	Variable Kosten.....	502
8.2.2.2	Fixkosten .....	504
8.2.3	Charakteristika <i>Generativer Fertigungsverfahren</i> und ihre Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit .....	507
8.3	Make or buy?.....	513
<b>9</b>	<b>Zukünftige Rapid Prototyping Verfahren .....</b>	<b>515</b>
9.1	Mikrobauteile .....	515
9.1.1	Mikrobauteile aus Metall und Keramik.....	516
9.1.2	Mikrobauteile aus Metall und Keramik mittels Laserschmelzen .....	516
9.1.2.1	Schmelzvorgang beim selektiven Laserschmelzen .....	517
9.1.2.2	Mikrostrukturen aus Metallpulver.....	518
9.1.2.3	Mikrostrukturen aus Keramikpulver.....	520
9.2	Contour Crafting.....	523
9.3	D-Shape Prozess.....	524
9.4	Selective Inhibition of Sintering (SIS) .....	526
9.4.1	SIS-Polymer-Prozess .....	526
9.4.2	SIS-Metall-Prozess.....	527

<b>10 Anhang</b> .....	529
Kritische Erfolgsfaktoren und Wettbewerbsstrategien.....	529
Wirtschaftlichkeitsmodell nach Siegwart und Singer .....	530
Technische Daten und Informationen .....	535
Begriffe und Abkürzungen.....	602
<b>11 Literaturverzeichnis</b> .....	611
<b>Index</b> .....	619