

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 <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

2	Merkmale der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i>	21
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 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)	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	Sonolimeszenz	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
3	Generative Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing	101
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 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
4	Rapid Prototyping	309
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: Cabrioverdeck	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
5	Rapid Tooling	375
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
6	Direct Manufacturing - Rapid Manufacturing	421
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
7	Sicherheitsvorschriften und Umweltschutz.....	481
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
8	Aspekte zur Wirtschaftlichkeit	497
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
9	Zukünftige Rapid Prototyping Verfahren	515
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

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