

HANSER

Andreas Gebhardt

Generative Fertigungsverfahren

Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing

ISBN-10: 3-446-22666-4

ISBN-13: 978-3-446-22666-1

Inhaltsverzeichnis

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-22666-1>

sowie im Buchhandel

Inhalt

Vorwort	VII
1 Einordnung und Begriffsbestimmung	1
1.1 Systematik der Fertigungsverfahren	1
1.2 Systematik der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i>	2
1.2.1 Rapid Prototyping	5
1.2.2 Rapid Manufacturing	6
1.2.2.1 Rapid Tooling – Direct Tooling – (Prototype Tooling)	6
1.2.2.2 Rapid Manufacturing – Direct Manufacturing	7
1.2.3 Abgrenzungen	7
1.3 Wie schnell ist Rapid?	8
1.4 Zuordnung der generativen Fertigungstechnik zu den Phasen der Produktentstehung	9
2 Merkmale der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i>	11
2.1 Verfahrensgrundlagen	11
2.2 Erzeugung der mathematischen Schichtinformation	16
2.2.1 Beschreibung der Geometrie durch einen 3D-Datensatz	16
2.2.1.1 Datenfluss und Schnittstellen	16
2.2.1.2 Modellierung dreidimensionaler Körper mittels 3D-CAD	18
2.2.1.3 Modellierung dreidimensionaler Körper aus Messwerten	21
2.2.2 Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten	23
2.2.2.1 STL-Format	23
2.2.2.2 CLI-/SLC-Format	28
2.2.2.3 PLY- und VRML-Format	31
2.3 Physikalische Prinzipien zur Erzeugung der Schicht	32
2.3.1 Generieren aus der flüssigen Phase	33
2.3.1.1 Photopolymerisation – Stereolithographie (SL)	33
2.3.2 Generieren aus der festen Phase	44
2.3.2.1 Schmelzen und Verfestigen von Pulvern und Granulaten – Sintern (Lasersintern, LS), Schmelzen	44
2.3.2.2 Ausschneiden aus Folien und Fügen – Layer Laminate Manufacturing (LLM)	50
2.3.2.3 Schmelzen und Verfestigen aus der festen Phase – Fused Layer Modeling (FLM)	52
2.3.2.4 Verkleben von Granulaten mit Bindern – 3D Printing (3DP)	54
2.3.3 Generieren aus der Gasphase	56
2.3.3.1 Aerosoldruckverfahren	56
2.3.3.2 Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD)	57
2.3.4 Sonstige Verfahren	58

2.4 Elemente zur Erzeugung der physischen Schicht 59

2.4.1 Bewegungselemente 59

2.4.2 Generierende und konturierende Elemente 61

2.4.3 Schichterzeugendes Element 67

2.5 Klassifizierung der *Generativen Fertigungsverfahren* 68

2.6 Zusammenfassende Betrachtung der theoretischen Potenziale der *Generativen Fertigungsverfahren* 70

3 Generative Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und

Direct Manufacturing 77

3.1 Polymerisation – Stereolithographie (SL) 80

3.1.1 Maschinenspezifische Grundlagen 80

3.1.2 Übersicht: Polymerisation – Stereolithographie 89

3.1.3 Stereo Lithography Apparatus (SLA-) – 3D Systems 90

3.1.4 STEREOS – EOS 99

3.1.5 Stereolithographie – Fockele & Schwarze (F&S) 100

3.1.6 Mikrostereolithographie – microTEC 103

3.1.7 Solid Ground Curing – Cubital 105

3.1.8 Digital Light Processing – Envisiontec 105

3.1.9 Polymerdrucken – Objet 110

3.1.10 Multi-Jet-Modeling (MJM) – InVision – 3D Systems 113

3.1.11 Digital Wax – Next Factory 115

3.1.12 Film Transfer Imaging – 3D Systems 117

3.1.13 Sonstige Polymerisationsverfahren 119

3.1.13.1 Paste Polymerization – OptoForm 119

3.2 Sintern/Selektives Sintern – Schmelzen im Pulverbett 121

3.2.1 Maschinenspezifische Grundlagen 121

3.2.2 Übersicht: Sintern – Schmelzen 125

3.2.3 Selektives Lasersintern – 3D Systems 126

3.2.4 Lasersintern – EOS 136

3.2.5 Laser Schmelzen – MCP-HEK/Fockele & Schwarze 146

3.2.6 Laser Cusing – Concept Laser 149

3.2.7 Direktes Laserformen – TRUMPF 153

3.2.8 Elektronenstrahlsintern – ARCAM 156

3.2.9 Selective Mask Sintering (SMS) – Speed Part 159

3.2.10 Lasersintern – Phenix 161

3.3 Beschichten – Schmelzen mit der Pulverdüse 162

3.3.1 Verfahrensprinzip 163

3.3.2 Laser Engineered Net Shaping (LENS) – Optomec 165

3.3.3 Direct Metal Deposition (DMD) – TRUMPF/POM 168

3.4 Schicht-Laminat-Verfahren – Layer Lamine Manufacturing (LLM) 171

3.4.1 Übersicht: Schicht-Laminat-Verfahren 171

3.4.2 Maschinenspezifische Grundlagen 172

3.4.3 Laminated Object Manufacturing (LOM) – Cubic Technologies 176

3.4.4 Rapid Prototyping System (RPS) – Kinergy 180

3.4.5 Selective Adhesive and Hot Press Process (SAHP) – Kira 182

3.4.6	RapidPro – Boxford	185
3.4.7	Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann	187
3.4.8	Stratoconception – rp2i	189
3.4.9	Stratified Object Manufacturing (SOM) – ERATZ	191
3.4.10	Plastic Sheet Lamination – 3D Systems	193
3.4.11	Sonstige Schicht-Laminat Verfahren	195
3.4.11.1	Bauteile aus Metalllamellen – Laminated Metal Prototyping ...	195
3.5	Extrusionsverfahren – Fused Layer Modeling (FLM)	196
3.5.1	Übersicht: Extrusionsverfahren	196
3.5.2	Fused Deposition Modeling (FDM) – Stratasys	196
3.5.3	Multiphase Jet Solidification (MJS) – ITP	205
3.5.4	3D-Printer Dimension – Stratasys	205
3.5.5	Wachsprinter – Solidscape	207
3.5.6	Multi-Jet-Modeling (MJM) – ThermoJet – 3D Systems	210
3.6	Three Dimensional Printing (3DP)	210
3.6.1	Übersicht: 3D Printing	210
3.6.2	3D-Printer – Z-Corporation	210
3.6.3	Rapid Production Machine Tools – Prometal	215
3.6.3.1	Metall-Linie: Direct Metal Printer	216
3.6.3.2	Formsand-Linie: Direct Core and Mold Making Machine	219
3.6.4	Direct Shell Production Casting (DSPC) – Soligen	220
3.6.5	3D-Druck-System – Voxeljet	223
3.6.6	Maskless Masoscale Material Deposition (M ³ D) – Optomec	225
3.7	Hybridverfahren	227
3.7.1	Laserauftragsschweißen und Fräsen – Controlled Metal Build Up (CMB) – Röders	227
3.7.2	Laminieren und Ultraschallschweißen – Ultrasonic Consolidation – Solidica	229
3.8	Zusammenfassende Betrachtung der Rapid Prototyping Verfahren	231
3.8.1	Charakteristische Eigenschaften der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i> im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren	232
3.8.2	Genauigkeit	234
3.8.3	Oberflächen	237
3.8.4	Benchmark-Tests und User-Parts	240
3.9	Entwicklungsziele	243
3.10	Folgeprozesse	244
3.10.1	Zielwerkstoff Kunststoff	244
3.10.2	Zielwerkstoff Metall	244
4	Rapid Prototyping	245
4.1	Einordnung und Begriffsbestimmung	245
4.1.1	Eigenschaften von Prototypen	245
4.1.2	Charakteristika des Rapid Prototyping	246
4.2	Strategische Aspekte beim Einsatz von Prototypen	247
4.3	Operative Aspekte beim Einsatz von Prototypen	253
4.3.1	Rapid Prototyping als Werkzeug zur schnellen Produktentwicklung	253

4.3.1.1	Modelle.....	254
4.3.1.2	Modellklassen	254
4.3.1.3	Modellklassen und generische Verfahren	258
4.3.1.4	Zuordnung von Modellklassen und Modelleigenschaften zu den Familien der <i>Generativen Fertigungsverfahren</i>	261
4.3.2	Anwendung des Rapid Prototyping in der industriellen Produkt- entwicklung.....	264
4.3.2.1	Beispiel: Pumpengehäuse	265
4.3.2.2	Beispiel: Büroleuchte	266
4.3.2.3	Beispiel: Einbauleuchtenfassung	270
4.3.2.4	Beispiel: Modellbaggerarm.....	271
4.3.2.5	Beispiel: LCD-Projektor	274
4.3.2.6	Beispiel: Kapillarboden für Blumentöpfe	276
4.3.2.7	Beispiel: Gehäuse einer Kaffeemaschine	276
4.3.2.8	Beispiel: Ansaugkrümmer eines Vierzylindermotors	277
4.3.2.9	Beispiel: Cocktailbecher	278
4.3.2.10	Beispiel: Spiegeldreieck	279
4.3.2.11	Beispiel: Cabrioverdeck.....	280
4.3.3	Rapid Prototyping Modelle zur Visualisierung von 3-D Daten	283
4.3.4	Rapid Prototyping in der Medizin	284
4.3.4.1	Charakteristika medizinischer Modelle.....	284
4.3.4.2	Anatomische Faksimiles	285
4.3.4.3	Beispiel: Anatomisches Faksimile für eine Umstellungs- osteotomie.....	287
4.3.5	Rapid Prototyping in Design, Kunst und Architektur	288
4.3.5.1	Modellbildung in Design und Kunst	288
4.3.5.2	Beispiel Kunst: Computer-Skulptur	289
4.3.5.3	Beispiel Design: Flaschenöffner.....	289
4.3.5.4	Angewandte Kunst – Bildhauerei und Plastiken	291
4.3.5.5	Beispiel Archäologie: Büste der Königin Teje	292
4.3.5.6	Modellbildung in der Architektur.....	293
4.3.5.7	Beispiel Architektur: Deutscher Pavillon für die Expo '92.....	294
4.3.5.8	Beispiel Architektur: Wohnungsbauprojekt	294
4.3.5.9	Beispiel Architektur: Groud Zero	295
4.3.6	Rapid Prototyping zur Überprüfung von Rechenverfahren	296
4.3.6.1	Spannungsoptische und thermoelastische Spannungsanalyse ..	296
4.3.6.2	Beispiel: Spannungsoptische Spannungsanalyse an einem Kipphebel eines LKW-Verbrennungsmotors	298
4.3.6.3	Beispiel: Thermoelastische Spannungsanalyse zum Festigkeitsnachweis an einer Automobilfelge	300
4.4	Ausblick.....	302
5	Rapid Tooling	303
5.1	Einordnung und Begriffsbestimmung	303
5.2	Eigenschaften generativ gefertigter Werkzeuge.....	305
5.2.1	Strategische Aspekte beim Einsatz Generativer Werkzeuge.....	305

5.2.1.1	Schnelligkeit	306
5.2.1.2	Umsetzung neuer technischer Konzepte	306
5.2.2	Konstruktive Eigenschaften generativ gefertigter Werkzeuge	308
5.2.2.1	Prototypwerkzeuge	308
5.2.2.2	Bereitstellung der Daten	311
5.3	Indirekte Rapid Tooling Verfahren – Abformverfahren und Folgeprozesse	312
5.3.1	Eignung generativer Verfahren zur Herstellung von Urmodellen für Folgeprozesse	312
5.3.2	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile	313
5.3.2.1	Abgießen in weiche Werkzeuge oder Formen	314
5.3.2.2	Abgießen in harte Werkzeuge	318
5.3.2.3	Andere Abformverfahren für harte Werkzeuge	323
5.3.3	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen	324
5.3.3.1	Der Feingussprozess mit generativen Prozessschritten	324
5.3.3.2	Werkzeuge durch Feinguss von Rapid Prototyping Urmodellen	327
5.4	Direkte Rapid Tooling Verfahren	328
5.4.1	Prototype Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Kunststoff-Rapid-Prototyping-Modellen und -Verfahren	328
5.4.1.1	ACES Injection Molding, AIM	328
5.4.1.2	Tiefziehen oder Thermoformen	329
5.4.1.3	Ausgießen von Rapid Prototyping Modellen	330
5.4.1.4	Herstellung von Kernen und Formen für den Metallguss	330
5.4.2	Metallwerkzeuge auf der Basis von mehrstufigen generativen Prozessen	332
5.4.2.1	Selektives Lasersintern von Metallen – IMLS – 3D Systems	332
5.4.2.2	Paste Polymerization – OptoForm	333
5.4.2.3	3D Printing von Metallen – Prometal	333
5.4.3	Direct Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Metall Rapid Prototyping Verfahren	334
5.4.3.1	Mehrkomponenten-Metallpulver-Lasersintern	335
5.4.3.2	Einkomponenten-Metallpulver-Verfahren – Sintern und Generieren	336
5.4.3.3	Laser-Generieren mit Pulver und Draht	340
5.4.3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Metalllamellenwerkzeuge – Laminated Metal Tooling	342
5.5	Ausblick	343
6	Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing	345
6.1	Einordnung und Begriffsbestimmungen	345
6.1.1	Begriffe	346
6.1.2	Vom Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing	347
6.1.3	Anforderungen an die direkte Fertigung	348
6.2	Potenziale der generativen Fertigung von Endprodukten	348
6.2.1	Erhöhte Konstruktionsfreiheit	349
6.2.1.1	Erweiterte konstruktive und gestalterische Möglichkeiten	349
6.2.1.2	Funktionsintegration	350

6.2.1.3	Neuartige Konstruktionselemente	350
6.2.2	Herstellung traditionell nicht herstellbarer Produkte.....	351
6.2.3	Variation von Massenprodukten.....	352
6.2.4	Personalisierung von Massenprodukten	353
6.2.4.1	Passive Personalisierung – Hersteller Personalisierung	353
6.2.4.2	Aktive Personalisierung – Kunden Personalisierung.....	355
6.2.5	Realisierung neuer Werkstoffe.....	356
6.2.6	Realisierung neuer Fertigungsstrategien	357
6.2.7	Entwurf neuer Arbeits- und Lebensformen	358
6.3	Anforderungen an generative Verfahren für die Fertigung.....	359
6.3.1	Anforderungen an die generative Herstellung eines Bauteils	359
6.3.1.1	Prozess	359
6.3.1.2	Materialien.....	361
6.3.1.3	Organisation	362
6.3.1.4	Konstruktion.....	362
6.3.1.5	Qualitätssicherung.....	363
6.3.1.6	Logistik.....	363
6.3.2	Anforderungen an die generative Serienfertigung mit heutigen Verfahren	363
6.3.2.1	Prozess	364
6.3.2.2	Materialien.....	365
6.3.2.3	Organisation	366
6.3.2.4	Konstruktion.....	366
6.3.2.5	Qualitätssicherung	366
6.3.2.6	Logistik.....	367
6.3.3	Zukünftige Anforderungen an die generative Serienfertigung	367
6.3.3.1	Prozess	368
6.3.3.2	Materialien.....	369
6.3.3.3	Organisation	370
6.3.3.4	Konstruktion.....	370
6.3.3.5	Qualitätssicherung	371
6.3.3.6	Logistik.....	372
6.4	Realisierung des Rapid Manufacturing.....	372
6.4.1	Generative Fertigungsanlagen als Elemente einer Fertigungskette.....	373
6.4.2	Generative Anlagen zur Komplettfertigung von Produkten	374
6.4.2.1	Industrielle Komplettfertigung	374
6.4.2.2	Individuelle Komplettfertigung (Personal Fabrication).....	376
6.5	Anwendungsbereiche	377
6.5.1	Anwendungsfelder nach Werkstoffen.....	377
6.5.1.1	Metallische Werkstoffe und Legierungen	378
6.5.1.2	Hochleistungskeramiken	379
6.5.1.3	Kunststoffe.....	380
6.5.1.4	Neue Werkstoffe.....	381
6.5.2	Anwendungsfelder nach Branchen.....	381
6.5.2.1	Werkzeugbau.....	381
6.5.2.2	Gießereiwesen.....	383

6.5.2.3	Medizinische Geräte und Hilfsmittel, Medizintechnik.	386
6.5.2.4	Design und Kunst.	390
6.6	Perspektiven.	393
7	Sicherheitsvorschriften und Umweltschutz	395
7.1	Gesetzliche Grundlagen für das Betreiben und das Herstellen von Generativen Fertigungsanlagen und den Umgang mit den zugehörigen Werkstoffen.	396
7.1.1	Baurecht.	396
7.1.2	Wasserrecht.	397
7.1.3	Gewerberecht.	398
7.1.4	Immissionsschutzrecht.	399
7.1.5	Abfallrecht.	400
7.1.6	Chemikalienrecht.	401
7.1.6.1	Sicherheitsdatenblätter.	403
7.1.6.2	REACH.	404
7.2	Anmerkungen zu Materialien für die generative Fertigung.	405
7.3	Anmerkungen zur Benutzung von generativ gefertigten Bauteilen.	406
8	Aspekte zur Wirtschaftlichkeit	409
8.1	Strategische Aspekte.	409
8.1.1	Strategische Aspekte für den Einsatz generativer Verfahren in der Produktentwicklung.	410
8.1.1.1	Qualitative Ansätze.	410
8.1.1.2	Quantitative Ansätze.	411
8.2	Operative Aspekte.	412
8.2.1	Zur Auswahl geeigneter <i>Generativer Fertigungsverfahren</i>	412
8.2.2	Zur Ermittlung der Kosten von Rapid Prototyping Verfahren.	413
8.2.2.1	Variable Kosten.	413
8.2.2.2	Fixkosten.	415
8.2.3	Charakteristika <i>Generativer Fertigungsverfahren</i> und ihre Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit.	417
8.3	Make or buy?	422
9	Zukünftige Rapid Prototyping Verfahren	425
9.1	Mikrobauteile.	425
9.2	Mikrobauteile aus Metall und Keramik.	425
9.2.1	Mikrobauteile aus Metall und Keramik mittels Laserschmelzen.	426
9.2.1.1	Schmelzvorgang beim selektiven Laserschmelzen.	426
9.2.1.2	Mikrostrukturen aus Metallpulver.	427
9.2.1.3	Mikrostrukturen aus Keramikpulver.	430
Anhang	433
	Kritische Erfolgsfaktoren und Wettbewerbsstrategien.	433
	Wirtschaftlichkeitsmodell nach Siegart und Singer.	435
	Technische Daten und Informationen.	440
	Begriffe und Abkürzungen.	470

Literaturverzeichnis	479
Stichwortverzeichnis	487
Über den Autor	505