

CARL HANSER VERLAG

Andreas Gebhardt

**Rapid Prototyping**  
Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung

3-446-21242-6

[www.hanser.de](http://www.hanser.de)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Produktentwicklung – Produktentstehung</b>	
	– <b>Rapid Product Development</b> .....	<b>1</b>
1.1	Neue Anforderungen – neue Verfahren .....	1
1.1.1	Veränderte Randbedingungen für die Produktentwicklung .....	1
1.1.2	Konsequenzen für die Produktentwicklung .....	4
1.1.3	Kritische Erfolgsfaktoren und Wettbewerbsstrategien .....	5
1.1.4	Schlüsselfaktor Zeit .....	7
1.2	Simultaneous Engineering – Concurrent Engineering .....	11
1.2.1	Klassische Produktentwicklungsstufen .....	11
1.2.2	Anforderungen an neue Methoden der Produktentwicklung .....	12
1.2.3	Prinzip des Simultaneous Engineering .....	14
1.3	Modelle .....	16
1.3.1	Modellklassen .....	16
1.3.2	Einfluß von Modellen auf die Beschleunigung der Produktentwicklung .....	19
1.3.3	Motivation durch Modelle .....	22
1.4	Modellbau mittels Rapid Prototyping als Element des Simultaneous Engineering .....	24
1.4.1	Rapid Prototyping Modelle als Garant für eine verbindliche Datenbasis .....	25
1.4.2	Definition: Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing .....	26
1.4.3	Zuordnung von Rapid Prototyping Modellen zu Produktentwicklungsphasen .....	30
<b>2</b>	<b>Merkmale generativer Fertigungsverfahren</b> .....	<b>31</b>
2.1	Verfahrensgrundlagen .....	31
2.2	Generierung der Schichtinformation .....	33
2.2.1	Beschreibung der Geometrie durch einen 3D-Datensatz .....	33
2.2.1.1	Datenfluß .....	33
2.2.1.2	Modellierung dreidimensionaler Körper im Computer mittels 3D-CAD .....	36
2.2.2	Generierung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten .....	46

2.2.3	Abbildung der geometrischen Schichtinformation auf der Schicht.....	51
2.3	Generierung des physikalischen Schichtenmodells .....	53
2.3.1	Verfestigen flüssiger Materialien	
	Photopolymerisation – Stereolithographie (SL) .....	53
2.3.2	Generieren aus der festen Phase .....	64
2.3.2.1	Schmelzen und Verfestigen von Pulvern und Granulaten – LASER-Sintern (LS) .....	64
2.3.2.2	Ausschneiden aus Folien – Layer Laminate Manufacturing (LLM) .....	69
2.3.2.3	Schmelzen und Verfestigen aus der festen Phase – Fused Layer Modeling (FLM) .....	71
2.3.2.4	Verkleben von Granulaten mit Bindern – 3D-Printing (3DP) .....	73
2.3.3	Abscheiden aus der Gasphase – LASER Chemical Vapor Deposition (LCVD) .....	73
2.3.4	Sonstige Verfahren .....	75
2.4	Klassifizierung generativer Fertigungsverfahren .....	76
2.5	Zusammenfassende Betrachtung der theoretischen Potentiale der Rapid Prototyping Verfahren .....	77
<b>3</b>	<b>Industrielle Rapid Prototyping Systeme .....</b>	<b>81</b>
3.1	Rapid Prototyping Prozeßkette .....	82
3.2	Datentechnik .....	83
3.3	Prototypen .....	89
3.3.1	Stereolithographie (SL) .....	90
3.3.1.1	Maschinenspezifische Grundlagen .....	90
3.3.1.2	StereoLithography Apparatus (SLA) – 3D Systems .....	97
3.3.1.3	STEREOS – EOS .....	107
3.3.1.4	Stereolithographie – Fockele & Schwarze (F&S) .....	112
3.3.1.5	Solid Ground Curing – Cubital .....	115
3.3.1.6	Mikrostereolithographie – MicroTEC .....	120
3.3.2	LASER-Sintern (LS) .....	122
3.3.2.1	Maschinenspezifische Grundlagen .....	122
3.3.2.2	Selektives LASER-Sintern – DTM .....	127
3.3.2.3	LASER-Sintern – EOS .....	136
3.3.3	Layer Laminate Manufacturing (LLM) .....	143
3.3.3.1	Maschinenspezifische Grundlagen .....	143
3.3.3.2	Laminated Object Manufacturing (LOM) – Helisys .....	149

---

3.3.3.3	Rapid Prototyping System – Kineryg .....	156
3.3.3.4	Selective Adhesive and Hot Press Process (SAHP) - Kira .....	158
3.3.3.5	JP Systems 5 – Schroff Development Corp. ....	160
3.3.3.6	Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann .....	163
3.3.3.7	Stratoconception – Charlyrobot .....	166
3.3.3.8	Stratified Object Manufacturing (SOM) – ERATZ .....	168
3.3.4	Fused Layer Modeling (FLM) .....	170
3.3.4.1	Fused Deposition Modeling (FDM) – Stratasys .....	170
3.3.4.2	Multiphase Jet Solidification (MJS) – ITP .....	180
3.3.4.3	3D-Plotter – Stratasys .....	183
3.3.4.4	ModelMaker – Sanders Prototype Inc. ....	184
3.3.4.5	Multi-Jet Modeling (MJM) – 3D Systems .....	187
3.3.5	Three Dimensional Printing (3DP) .....	189
3.3.5.1	Rapid Prototyping System – Z-Corporation .....	189
3.3.5.2	Rapid Tooling System – ExtrudeHone .....	192
3.3.5.3	Direct Shell Production Casting (DSPC) – Soligen .....	194
3.3.6	LASER-Generieren .....	197
3.3.6.1	LASER Engineered Net Shaping (LENS) – Optomec .....	198
3.3.7	Konventionelle Prototypverfahren und Hybridverfahren.....	201
3.3.7.1	Konventionelle Verfahren:	
	Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC) .....	202
3.3.7.2	Hybridverfahren: Controlled Metal Build Up (CMB) .....	204
3.3.7.3	Vergleich Rapid Prototyping Verfahren – konventionelle Verfahren .....	206
3.3.8	Zusammenfassende Betrachtung der Rapid Prototyping Verfahren ...	208
3.3.8.1	Modellgenauigkeit .....	209
3.3.8.2	Oberflächen .....	212
3.3.8.3	Benchmark-Tests und User-Parts .....	215
3.3.8.4	Vergleichende Betrachtung von Prototypen für Funktionsprototypen anhand Bauraum, Genauigkeit und Bauzeit .....	217
3.3.8.5	Zuordnung der Prototyper zu den Modellklassen .....	219
3.3.8.6	NCG-RPD-Selektor .....	221
3.3.8.7	Entwicklungsziele .....	222
3.4	Folgeprozesse .....	223
3.4.1	Zielwerkstoff Kunststoff .....	224
3.4.2	Zielwerkstoff Metall .....	227

<b>4</b>	<b>Rapid Tooling .....</b>	<b>237</b>
4.1	Prinzipielle Wege zu metallischen Werkzeugen .....	237
4.2	Metallische Werkzeuge auf der Basis von Kunststoff	
	Rapid Prototyping Modellen .....	240
4.2.1	Werkzeuge durch Feinguß von Rapid Prototyping Urmodellen .....	240
4.2.2	Werkzeuge durch Abformung von Stereolithographiemodellen .....	240
	4.2.2.1 Direkte Anwendung der Stereolithographie .....	240
	4.2.2.2 Indirekte Anwendung der Stereolithographie .....	241
4.3	Metallische Werkzeuge auf der Basis von Kunststoff	
	Rapid Prototyping Prozessen .....	247
4.4	Metallische Werkzeuge auf der Basis von Metall	
	Rapid Prototyping Prozessen .....	249
4.4.1	Mehrkomponenten-Metallpulver-LASER-Sintern .....	249
4.4.2	Einkomponenten-Metallpulver-LASER-Sintern .....	250
4.4.3	LASER-Generieren .....	252
4.5	Zusammenfassung, Ausblick .....	253
<b>5</b>	<b>Anwendungen .....</b>	<b>255</b>
5.1	Rapid Prototyping in der industriellen Produktentwicklung .....	255
	5.1.1 Beispiel: Pumpengehäuse .....	255
	5.1.2 Beispiel: Büroleuchte .....	258
	5.1.3 Beispiel: Einbauleuchtenfassung .....	262
	5.1.4 Beispiel: Modellbaggerarm .....	263
	5.1.5 Beispiel: LCD-Projektor .....	267
	5.1.6 Beispiel: Kapillarboden für Blumentöpfe .....	269
	5.1.7 Beispiel: Gehäuse einer Kaffeemaschine .....	271
	5.1.8 Beispiel: Ansaugkrümmer eines Vierzylindermotors .....	272
5.2	Rapid Tooling in der industriellen Produktentwicklung .....	274
	5.2.1 Beispiel: Turboladergehäuse .....	274
	5.2.2 Beispiel: Zweiteiliger Elektrostecker .....	276
	5.2.3 Beispiel: Spritzgußform Scheinwerfer-Verstellhebel .....	279
	5.2.4 Beispiel: Dauerform für Feingußmodelle .....	281
5.3	Rapid Prototyping zur Überprüfung von Rechenverfahren .....	282
	5.3.1 Spannungsoptische und thermoelastische Spannungsanalyse .....	282
	5.3.2 Beispiel: Spannungsoptische Spannungsanalyse	
	an einem Kipphebel eines LKW-Verbrennungsmotors .....	285
	5.3.3 Beispiel: Thermoelastische Spannungsanalyse an	
	einer Automobilfelge zum Festigkeitsnachweis .....	287

5.4	Rapid Prototyping in der Medizin .....	291
5.4.1	Anatomische Faksimiles .....	291
5.4.2	Taylored Implants .....	292
5.4.3	Charakteristika medizinischer Modelle .....	292
5.4.4	Beispiel: Anatomisches Faksimile für eine Umstellungsosteotomie ....	295
5.4.5	Beispiel: Abdeckung eines Schädeldefektes durch ein Titanimplantat (Cranioplastik) .....	296
5.5	Rapid Prototyping in Kunst, Archäologie und Architektur .....	300
5.5.1	Modellbildung in Kunst und Design .....	300
5.5.2	Beispiel Kunst: Computer-Skulptur .....	300
5.5.3	Beispiel Design: Flaschenöffner .....	301
5.5.4	Beispiel Archäologie: Büste der Königin Teje .....	303
5.5.5	Modellbildung in der Architektur .....	305
5.5.6	Beispiel Architektur: Deutscher Pavillon für die Expo '92 .....	305
5.5.7	Beispiel Architektur: Wohnungsbauprojekt .....	306
<b>6</b>	<b>Sicherheitsvorschriften und Umweltschutz .....</b>	<b>309</b>
6.1	Gesetzliche Grundlagen für die Herstellung und das Betreiben von Prototypen und zugehörigen Werkstoffen .....	309
6.2	Anmerkungen für Anlagenbetreiber und Anwender von Rapid Prototyping Modellen .....	312
6.3	Gefahren bei der Benutzung von Rapid Prototyping Modellen .....	314
<b>7</b>	<b>Aspekte zur Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>317</b>
7.1	Strategische Aspekte .....	317
7.2	Operative Aspekte .....	321
7.2.1	Zur Ermittlung des oder der optimalen Rapid Prototyping Verfahren .....	321
7.2.2	Zur Ermittlung der Kosten von Rapid Prototyping Verfahren .....	323
7.3	Service .....	327
7.4	Make or buy? .....	328
<b>8</b>	<b>Zukünftige Rapid Prototyping Verfahren .....</b>	<b>329</b>
8.1	Ausgewählte Tendenzen der Werkstoffentwicklung .....	329
8.1.1	Anwendung: Feinguß .....	330
8.1.2	Anwendung: Entwicklung von Serienwerkstoffen .....	331
8.2	Ausgewählte Tendenzen der Verfahrensentwicklung .....	332

8.2.1 LASER Sintern von Einkomponenten-Werkstoffen .....	332
8.2.2 LASER Sintern im Pulverbett – Selective LASER	
Powder Remelting (SLPR) .....	333
8.2.2.1 Verfahrensprinzip .....	333
8.2.2.2 Qualitätsmerkmale .....	334
8.2.2.3 Anwendungsbeispiele .....	337
8.2.3 LASER-Generieren .....	339
8.2.3.1 Verfahrensprinzip .....	339
8.2.3.2 Qualitätsmerkmale .....	342
8.2.3.3 Anwendungsbeispiele .....	345

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>351</b>
-----------------------------------	------------

<b>Anhang .....</b>	<b>357</b>
---------------------	------------

A1 LASER-Prinzip und LASER für Rapid Prototyping .....	357
A2 Wirtschaftlichkeitsmodell nach Siegwart und Singer .....	367
A3 Technische Daten und Informationen .....	372
CAD- und RP-Software .....	374
Tabelle A3-1: 3D-CAD-Systeme .....	374
Tabelle A3-2: Rapid Prototyping Software .....	375
LASER für Prototyper .....	376
Tabelle A3-3: LASER für Rapid Prototyping .....	376
Prototyper .....	377
Tabelle A3-4: Hersteller von Prototypen .....	377
Tabelle A3-5: Stereolithographieanlagen I .....	378
Tabelle A3-6: Stereolithographieanlagen II .....	379
Tabelle A3-7: Stereolithographieanlagen III .....	380
Tabelle A3-8: Sinteranlagen I .....	381
Tabelle A3-9: Sinteranlagen II .....	382
Tabelle A3-10: Extrusionsanlagen I .....	383
Tabelle A3-11: Extrusionsanlagen II .....	384
Tabelle A3-12: Schicht-Laminat-Anlagen I .....	385
Tabelle A3-13: Schicht-Laminat-Anlagen II .....	386
Tabelle A3-14: 3D Drucker .....	387
RP-Werkstoffe und Gießharze .....	388
Tabelle A3-15: Photopolymere – Übersicht .....	388

---

Tabelle A3-16: Physikalische Eigenschaften der Stereolithographie-Monomere .....	389
Tabelle A3-17: Mechanische Eigenschaften der ausgehärteten Stereolithographie-Harze .....	390
Tabelle A3-18: Thermische Eigenschaften der ausgehärteten Stereolithographie-Harze .....	391
Tabelle A3-19: Elektrische Eigenschaften der ausgehärteten Stereolithographie-Harze .....	392
Tabelle A3-20: Physikalisch-technische Eigenschaften der Sinterwerkstoffe I .....	394
Tabelle A3-21: Physikalisch-technische Eigenschaften der Sinterwerkstoffe II .....	395
Tabelle A3-22: Physikalisch-technische Eigenschaften der FDM-Werkstoffe .....	396
Tabelle A3-23: Physikalisch-technische Eigenschaften der ModelMaker-Werkstoffe .....	397
Tabelle A3-24: Physikalisch-technische Eigenschaften der LOM-Werkstoffe .....	398
Tabelle A3-25: Physikalisch-technische Eigenschaften ausgewählter Gießharze .....	399
A4 Abkürzungen .....	400
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>407</b>



