

# 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<br>(Rapid Tooling – Prototype Tooling)..... | 9        |
| 1.3.3 Nicht-additive Verfahren –<br>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<br>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<br>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<br>Messwerten .....   | 33        |
| 2.2.2     | Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen<br>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 –<br>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 –<br>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 –<br>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 –<br>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<br>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<br/>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<br>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 Laminat 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 –<br>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) – OPTOMECC   | 302 |
| 3.7      | Hybridverfahren   | 306 |
| 3.7.1    | Laserauftragsschweißen und Fräsen –<br>Controlled Metal Build Up (CMB) – Röders                                       | 307 |
| 3.7.2    | Laminieren und Ultraschallschweißen –<br>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 –<br>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<br>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<br>zu den Familien der <i>Additiven Fertigungsverfahren</i> | 364        |
| 4.3.2     | Anwendung des Rapid Prototyping in der industriellen<br>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<br>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<br>Expo '92 . . . . .                                 | 399        |
| 4.3.5.8   | Beispiel Architektur: Ground Zero . . . . .  | 400        |
| 4.3.5.9   | Beispiel Architekturdenkmäler:<br>Dokumentation von baugeschichtlich relevanten<br>Gebäuden . . . . .  | 401        |
| 4.3.6     | Rapid Prototyping zur Überprüfung von Rechenverfahren . . . . .  | 402        |
| 4.3.6.1   | Spannungsoptische und thermoelastische<br>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<br>an einem Kipphebel eines Lkw-Verbrennungsmotors . . .  | 404        |
| 4.3.6.3   | Beispiel: Thermoelastische Spannungsanalyse<br>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<br>Werkzeugeinsätze .....                        | 418 |
| 5.2.2.2   | Bereitstellung der Daten .....   | 420 |
| 5.3       | Indirekte Rapid Tooling-Verfahren –<br>Abformverfahren und Folgeprozesse .....         | 421 |
| 5.3.1     | Eignung Additiver Verfahren zur Herstellung von Urmodellen<br>für Folgeprozesse .....  | 422 |
| 5.3.2     | Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen<br>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<br>(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<br>Urmodellen .....                     | 437 |
| 5.4       | Direkte Rapid Tooling-Verfahren.....   | 438 |
| 5.4.1     | Prototype Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Kunststoff –<br>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 <i>Injection Molding</i> , 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) – OPTOMECH.....                                | 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<br>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<br>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<br>Generativen Fertigungsanlagen und den Umgang mit den zugehörigen<br>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<br>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<br>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 Siegwart 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> |
|           | <b>Stichwortverzeichnis.....</b>   | <b>689</b> |