

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Einleitung</b> .....   | <b>1</b>  |
| Rene Bastian Lippert und Roland Lachmayer   |           |
| 1 Additive Manufacturing Quantifiziert .....  | 2         |
| Literaturverzeichnis .....  | 6         |
| <b>Entwicklungstrends zum Einsatz des selektiven Laserstrahlschmelzens<br/>in Industrie und Biomedizintechnik</b> ..... | <b>7</b>  |
| Yvonne Wessargès, Matthias Gieseke, Ronny Hagemann, Stefan Kaierle<br>und Ludger Overmeyer                              |           |
| 1 Einleitung .....  | 8         |
| 2 Selektives Laserstrahlschmelzen von Metallbauteilen .....   | 9         |
| 2.1 Funktionsweise und Charakteristika .....  | 9         |
| 2.2 Industriell etablierte Werkstoffe und Anwendungsbeispiele .....   | 10        |
| 3 Selektives Laserstrahlschmelzen von Nickel-Titan-Legierungen .....  | 13        |
| 3.1 Eigene Forschungsarbeiten zum Einsatz des SLM®-Verfahrens zur<br>Verarbeitung von Nickel-Titan-Legierungen .....    | 13        |
| 3.2 Forschungsergebnisse .....  | 14        |
| 4 Selektives Laserstrahlschmelzen von Magnesium und<br>Magnesiumlegierungen .....                                       | 15        |
| 4.1 Eigene Forschungsarbeiten zur Verarbeitung von Magnesium<br>und Magnesiumlegierungen im SLM®-Verfahren .....        | 15        |
| 4.2 Forschungsergebnisse .....  | 17        |
| 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....  | 18        |
| Literaturverzeichnis .....  | 19        |
| <b>Restriktionsgerechte Gestaltung innerer Strukturen für das Selektive<br/>Laserstrahlschmelzen</b> .....              | <b>23</b> |
| Rene Bastian Lippert  |           |
| 1 Einleitung .....  | 24        |
| 2 Gestaltungsprozess .....  | 26        |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Gestaltungsziele von inneren Strukturen . . . . .                    | 27 |
| 2.2 | Vorgehensmodell zur restriktionsgerechten Gestaltung . . . . .       | 27 |
| 2.3 | Relevante Gestaltungsrichtlinien für innere Strukturen . . . . .     | 29 |
| 3   | Anwendungsbereiche innerer Strukturen . . . . .                      | 31 |
| 4   | Restriktionsgerechte Gestaltung eines Demonstratorbauteils . . . . . | 34 |
| 4.1 | Untersuchung des Ausgangsmodells . . . . .                           | 34 |
| 4.2 | Festlegung eines physikalischen Gestaltungsraums . . . . .           | 37 |
| 4.3 | Potentialanalyse und Applikation . . . . .                           | 38 |
| 4.4 | Spannungsgerechte Detaillierung . . . . .                            | 40 |
| 4.5 | Fertigungsgerechte Detaillierung . . . . .                           | 41 |
| 5   | Zusammenfassung und Ausblick . . . . .                               | 45 |
|     | Literaturverzeichnis . . . . .                                       | 46 |

### **Unterstützung des Entscheidungsprozesses in der Produktentwicklung**

#### **additiv herzustellender Produkte mithilfe von Ähnlichkeitskennzahlen . . . . . 49**

Peter Hartogh und Thomas Vietor

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Einleitung . . . . .  | 50 |
| 2   | Stand der Technik . . . . .   | 51 |
| 2.1 | Additive Fertigung . . . . .  | 52 |
| 2.2 | Komplexität . . . . .   | 53 |
| 2.3 | Ähnlichkeit und deren Kennzahlen . . . . .                                    | 54 |
| 2.4 | Fraktale Geometrie . . . . .  | 54 |
| 3   | Definition einer dimensionslosen geometrischen Ähnlichkeitskennzahl . . . . . | 56 |
| 4   | Modell zur Abstraktion geometrischer Volumenkörper . . . . .                  | 60 |
| 4.1 | Referenzmodell Volumenwürfel . . . . .  | 60 |
| 4.2 | Das Menger-Schwamm-Modell . . . . .   | 60 |
| 5   | Anwendung auf ein additives Fertigungsverfahren . . . . .                     | 63 |
| 6   | Validierung am Beispiel des Fused Layer Modeling . . . . .                    | 64 |
| 7   | Zusammenfassung und Ausblick . . . . .  | 65 |
| 7.1 | Zusammenfassung . . . . .   | 66 |
| 7.2 | Ausblick . . . . .  | 66 |
|     | Literaturverzeichnis . . . . .  | 67 |

### **Entwicklung individualisierter Produkte durch den Einsatz Additiver**

#### **Fertigung . . . . . 69**

Johanna Spallek und Dieter Krause

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Einleitung . . . . .  | 70 |
| 2   | Produktvielfalt und individualisierte Produkte . . . . .                    | 71 |
| 3   | Potential der additiven Fertigung zur Produktindividualisierung . . . . .   | 72 |
| 3.1 | Hintergrund des Individualisierungspotentials additiver Fertigung . . . . . | 73 |
| 3.2 | Aktuelle Anwendungen additiver Fertigung zur Individualisierung . . . . .   | 75 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4   | Produktentwicklung zur AM-ermöglichten Individualisierung . . . . .  | 76 |
| 4.1 | Vorbereitungsgrad individualisierbarer Module. . . . .               | 76 |
| 4.2 | Entwicklungsprozessstypen. . . . .                                   | 77 |
| 4.3 | Anwendungsbeispiel: Individualisierte Blutgefäßmodelle . . . . .     | 78 |
| 5   | Komplexitätsaspekte und Kundennutzen der Individualisierung. . . . . | 80 |
| 6   | Zusammenfassung . . . . .  | 82 |
|     | Literaturverzeichnis . . . . .                                       | 82 |

**Die Hybride Mikro-Stereolithographie als Weiterentwicklung in der Polymerbasierten Additiven Fertigung. . . . . 85**

Arndt Hohnholz, Kotaro Obata, Claudia Unger, Jürgen Koch, Oliver Suttman und Ludger Overmeyer

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Einleitung. . . . .   | 86 |
| 2   | Additive Manufacturing mittels Mikro-Stereolithographie . . . . . | 87 |
| 2.1 | Prozesskette . . . . .  | 87 |
| 2.2 | Aufbau einer Mikro-Stereolithographieanlage . . . . .             | 88 |
| 2.3 | Materialien . . . . .   | 91 |
| 2.4 | Charakterisierung der Anlage. . . . .                             | 92 |
| 3   | Die hybride Mikro-Stereolithographie. . . . .                     | 92 |
| 3.1 | Funktionsweise des Aerosol-Jets . . . . .                         | 93 |
| 3.2 | Beschichtungsergebnisse . . . . .                                 | 94 |
| 4   | Anwendungsbeispiele . . . . .                                     | 96 |
| 4.1 | Polymere Lichtwellenleiter . . . . .                              | 96 |
| 4.2 | Multimaterialdruck. . . . .                                       | 96 |
| 5   | Zusammenfassung . . . . .   | 97 |
|     | Literaturverzeichnis . . . . .                                    | 98 |

**3D-gedruckte quasioptische Bauelemente für den Terahertz-Frequenzbereich. . 101**

Marcel Weidenbach, Stefan F. Busch und Jan C. Balzer

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1   | Einleitung. . . . .   | 102 |
| 2   | Das Ultimaker 3D-Druckverfahren . . . . .                           | 103 |
| 3   | Strahlformende Bauelemente. . . . .                                 | 105 |
| 3.1 | Terahertz-Zeitbereichsspektrometer. . . . .                         | 105 |
| 3.2 | Materialcharakterisierung von TOPAS im THz-Frequenzbereich. . . . . | 106 |
| 3.3 | Linsen. . . . .   | 107 |
| 3.4 | Gitter . . . . .  | 109 |
| 4   | Strahlführende Bauelemente . . . . .                                | 110 |
| 4.1 | Design, Herstellung und Messaufbau . . . . .                        | 110 |
| 4.2 | Charakterisierung der Wellenleiter. . . . .                         | 111 |
| 5   | Zusammenfassung . . . . .   | 113 |
|     | Literaturverzeichnis . . . . .                                      | 114 |

### **3D Mikro- und Nano-Strukturierung mittels Zwei-Photonen-Polymerisation. . . . . 117**

Ayman El-Tamer, Ulf Hinze und Boris N. Chichkov

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 1   | Einleitung . . . . .   | 118 |
| 2   | Prinzip der Zwei-Photonen-Polymerisation. . . . .                      | 119 |
| 2.1 | 2PP-Aufbau . . . . .   | 123 |
| 2.2 | Aufbau von Strukturen. . . . .   | 126 |
| 3   | Anwendungen . . . . .  | 127 |
| 3.1 | Mikromechanische, Mikrofluidische und Mikrooptische Bauteile . . . . . | 128 |
| 3.2 | Biomedizinische Strukturen. . . . .                                    | 130 |
| 4   | Zusammenfassung . . . . .  | 131 |
|     | Literaturverzeichnis . . . . .   | 132 |

### **Geschäftsmodellevolution im Technischen Kundendienst des Maschinen- und Anlagenbaus durch additive Fertigung – Ersatzteilbereitstellung als smart Service . . . . . 133**

Andreas Varwig, Friedemann Kammler und Oliver Thomas

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 1 | Einleitung . . . . .   | 134 |
| 2 | Serviceinnovationspotential im Maschinen- und Anlagenbau. . . . .                                    | 135 |
| 3 | Digitale Lagerhaltung und smarte Ersatzteilbereitstellung . . . . .                                  | 137 |
| 4 | Anforderungen durch den Maschinen- und Anlagenbau und Implikationen für den Einsatz von AM . . . . . | 139 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick . . . . .   | 141 |
|   | Literaturverzeichnis . . . . .   | 142 |

### **Simulation von Selective Laser Melting Prozessen . . . . . 145**

Henning Wessels, Matthias Gieseke, Christian Weißenfels, Stefan Kaieler, Peter Wriggers und Ludger Overmeyer

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1   | Einleitung . . . . .  | 146 |
| 2   | Physikalische Phänomene in SLM Verfahren . . . . .            | 147 |
| 2.1 | Fehlstellenbildung . . . . .                                  | 148 |
| 2.2 | Wärmeentwicklung . . . . .                                    | 149 |
| 2.3 | Phasenübergang . . . . .                                      | 149 |
| 2.4 | Verdampfungs-Rückprall . . . . .                              | 150 |
| 2.5 | Oberflächenspannung. . . . .                                  | 150 |
| 2.6 | Plateau-Rayleigh Instabilität . . . . .                       | 150 |
| 2.7 | Verfestigung . . . . .  | 151 |
| 3   | Thermomechanische Modellierung Von SLM Prozessen . . . . .    | 151 |
| 4   | Simulationstools zur Beschreibung von SLM-Prozessen . . . . . | 152 |
| 4.1 | Wärmequellen . . . . .  | 152 |
| 4.2 | University of California Berkeley . . . . .                   | 154 |
| 4.3 | Lawrence Livermore National Laboratory. . . . .               | 156 |
| 4.4 | BCCMS Universität Bremen . . . . .                            | 158 |
| 4.5 | Northwestern University . . . . .                             | 159 |
| 5   | Zusammenfassung . . . . .                                     | 160 |
|     | Literaturverzeichnis . . . . .                                | 161 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Additive Fertigung transparenter Optiken. ....</b>     | <b>163</b> |
| Gerolf Kloppenburg, Marvin Knöchelmann und Alexander Wolf |            |
| 1 Einleitung. ....  | 164        |
| 2 Fertigungsverfahren für transparente Bauteile. ....     | 165        |
| 2.1 Klassische Fertigung. ....                            | 166        |
| 2.2 Additive Fertigung. ....                              | 166        |
| 3 Musterteile. ....                                       | 168        |
| 4 Messung. ....   | 169        |
| 4.1 Transmission. ....                                    | 169        |
| 4.2 Brechkraft und Dispersion. ....                       | 170        |
| 4.3 Oberflächenbewertung mit Mikroskop. ....              | 170        |
| 4.4 Demo-Setup Laserscheinwerfer. ....                    | 171        |
| 5 Zusammenfassung und Fazit. ....                         | 173        |
| Literaturverzeichnis. ....                                | 174        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Additive Manufacturing als Baustein zur gestaltungsgerechten<br/>Produktentwicklung in der Fahrzeugelektronik am Beispiel automobiler<br/>Zugangssysteme. ....</b> | <b>175</b> |
| Tobias Heine  |            |
| 1 Einleitung. ....  | 176        |
| 2 Prototypische Visualisierung in frühen Entwicklungsphasen. ....   | 178        |
| 2.1 Automobile Innovationsprozesse. ....  | 179        |
| 2.2 Bedarf einer prototypischen Phase im Entwicklungsprozess. ....  | 181        |
| 3 Additive Manufacturing und Design. ....   | 182        |
| 3.1 Prototyping im Entwurfsprozess der Produktgestaltung. ....  | 183        |
| 3.2 Prototyping zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit. ....  | 184        |
| 3.3 Design Thinking. ....   | 185        |
| 3.4 Automobildesignprozess. ....  | 185        |
| 4 Anwendungsbeispiele im Technischen Design. ....   | 186        |
| 4.1 Designorientiertes Additive Manufacturing in der<br>Elektronikentwicklung. ....   | 186        |
| 4.2 Fallstudie: Gestalterischer Entwicklungsprozess. ....   | 187        |
| 4.3 Ergebnisse. ....  | 190        |
| 5 Zusammenfassung. ....   | 192        |
| Literaturverzeichnis. ....  | 193        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Additive Repair von Multimaterialsystemen im Selektiven<br/>Laserstrahlschmelzen. ....</b> | <b>195</b> |
| Yousif Amsad Zghair und Georg Leuteritz   |            |
| 1 Einleitung. ....  | 196        |
| 2 Gestaltungsansatz für Additive Repair. ....   | 197        |
| 3 Mögliche Bauteilorientierungen im SLM-Prozess. ....   | 198        |
| 4 Belastungsfälle und Aufbauwinkel zur Oberfläche. ....                                       | 200        |

|     |   |            |
|-----|---|------------|
| 4.1 | Belastungsarten und resultierende Spannungen..... | 200        |
| 4.2 | Spannungszustände bei Zugbelastung.....           | 200        |
| 5   | Falluntersuchung der statischen Zugspannung.....  | 203        |
| 5.1 | Aufbau der Zugproben.....                         | 203        |
| 5.2 | Materialeigenschaften.....                        | 203        |
| 5.3 | Rechnerunterstützte Auswertung.....               | 204        |
| 5.4 | Anwendung.....                                    | 206        |
| 5.5 | Auswertung der Zugversuche.....                   | 210        |
| 5.6 | Mikroskopische Untersuchungen.....                | 211        |
| 6   | Ergebnisse.....                                   | 212        |
| 7   | Zusammenfassung.....                              | 212        |
|     | Literaturverzeichnis.....                         | 213        |
|     | <b>Sachwortverzeichnis.....</b>                   | <b>217</b> |
|     | <b>Stichwortverzeichnis.....</b>                  | <b>229</b> |