

Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
der Technischen Universität München

Materialsysteme  
für das pulverbettbasierte 3D-Drucken

Dipl.-Ing. Imke Nora Kellner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt,  
Universität Duisburg-Essen

Die Dissertation wurde am 15.03.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.06.2012 angenommen.



# Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungstechnik an der Universität Duisburg-Essen, möchte ich mich für die hervorragende Zusammenarbeit und die Übernahme des Koreferats sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts. Dabei möchte ich besonders meinen ehemaligen Institutskollegen Herrn Dr.-Ing. Gregor Braner hervorheben, der wertvolle Vorarbeiten auf dem Gebiet der numerischen Simulation geleistet und der mir gemeinsam mit Herrn Dipl.-Ing. Michael Ott bei der kritischen Durchsicht meiner Dissertation geholfen hat. Gemeinsam mit Herrn Dr.-Ing. Florian Hagemann, Herrn Dr.-Ing. Stefan Lutzmann sowie dem gesamten Forschungsfeld „Rapid Manufacturing“ standen sie mir auch stets für tiefgreifende, fachliche Diskussionen zur Verfügung.

Dank auch allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation unterstützt haben und deren Arbeiten im Kapitel 10 aufgelistet sind. Besonders hervorheben möchte ich hier Markus Birk und Andreas Eichhorn, die mich nahezu über meine gesamte Zeit am *iwb* begleitet haben.

Teile dieser Arbeit sind im Rahmen des Projekts „Aktivierte Polymerisation im 3D-Kunststoff-Druckprozess“ entstanden. Für die großzügige Förderung möchte ich mich bei der Bayerischen Forschungstiftung bedanken. Auch gilt mein Dank allen Partnern im Konsortium, insbesondere Dr. Florian Mögele und Dr.-Ing. Daniel Günther stellvertretend für alle Mitarbeiter der Firma Voxeljet Technology GmbH für die hervorragende Zusammenarbeit sowie Dr. Jan Seyfarth und Dr.-Ing. Cord Steinbeck-Behrens für die wertvollen Hinweise zur Durchführung der Simulation.

Danke Gabi, Gerd, Malte, Björn, Charlotte, Nina, Tim, Sebastian, Silvia, Sanne, Sabine und Mü, ohne Euch hätte ich es nicht geschafft!

*Der Ruhezone der Deutschen Bahn.*



# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis  | I  |
| Verzeichnis der Formelzeichen   | V  |
| Verzeichnis der Abkürzungen und Begriffe  | IX |
| 1 Einleitung  | 1  |
| 1.1 Motivation . . . . .  | 1  |
| 1.2 Zielsetzung . . . . .   | 4  |
| 1.3 Vorgehensweise . . . . .  | 7  |
| 2 Grundlagen der Arbeit   | 11 |
| 2.1 Vorgehen im Kapitel . . . . .   | 11 |
| 2.2 Generative Fertigungsverfahren . . . . .                                    | 11 |
| 2.2.1 Prozessgrundlagen des pulverbettbasierten 3D-Druckens . . . . .           | 11 |
| 2.2.2 Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren . . . . .             | 12 |
| 2.2.3 Verfestigungsmechanismen generativer Fertigungsverfahren . . . . .        | 14 |
| 2.2.4 Datenvorbereitung . . . . .   | 18 |
| 2.2.5 Anwendungsgebiete . . . . .   | 19 |
| 2.2.6 Herausforderungen und Grenzen . . . . .                                   | 20 |
| 2.3 Chemische Reaktionen und Materialsysteme . . . . .                          | 22 |
| 2.3.1 Theorie der Kunststoffe . . . . .   | 22 |
| 2.3.2 Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition . . . . .               | 24 |
| 2.3.3 Relevante Kunststoffe . . . . .   | 26 |
| 2.4 Relevante physikalische Eigenschaften der betrachteten Werkstoffe . . . . . | 28 |
| 2.4.1 Mechanische Eigenschaften . . . . .                                       | 28 |
| 2.4.2 Thermische Eigenschaften . . . . .  | 30 |
| 2.4.3 Elektrische Eigenschaften . . . . .                                       | 31 |
| 2.5 Simulation . . . . .  | 32 |
| 2.5.1 Allgemeines . . . . .   | 32 |
| 2.5.2 Finite-Elemente-Methode . . . . .   | 32 |
| 2.5.3 Multiskalensimulation . . . . .   | 34 |
| 2.6 Zusammenfassung . . . . .   | 35 |
| 3 Stand der Wissenschaft und Technik  | 37 |
| 3.1 Vorgehen im Kapitel . . . . .   | 37 |
| 3.2 3D-Druckprozess . . . . .   | 37 |
| 3.2.1 Anlagentechnik für das pulverbettbasierte 3D-Drucken . . . . .            | 37 |
| 3.2.2 Restriktionen für das pulverbettbasierte 3D-Drucken . . . . .             | 38 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.3   | Materialien für generative Fertigungsverfahren . . . . .    | 39  |
| 3.3.1 | Methoden zur Materialqualifizierung . . . . .               | 39  |
| 3.3.2 | Monomaterialverarbeitung . . . . .                          | 41  |
| 3.3.3 | Multimaterialverarbeitung . . . . .                         | 45  |
| 3.4   | Simulation von Schichtbauverfahren . . . . .                | 51  |
| 3.4.1 | Materialsimulation in der generativen Fertigung . . . . .   | 51  |
| 3.4.2 | Prozesssimulation in der generativen Fertigung . . . . .    | 51  |
| 3.5   | Zusammenfassung und Handlungsbedarf . . . . .               | 53  |
| 4     | Methoden- und Prozessentwicklung . . . . .                  | 55  |
| 4.1   | Vorgehen im Kapitel . . . . .                               | 55  |
| 4.2   | Methode zur Materialqualifizierung . . . . .                | 56  |
| 4.2.1 | Allgemeines . . . . .                                       | 56  |
| 4.2.2 | Modul $P$ - Prozess . . . . .                               | 56  |
| 4.2.3 | Modul $S$ - Simulation . . . . .                            | 57  |
| 4.2.4 | Modul $M$ - Material . . . . .                              | 57  |
| 4.2.5 | Interaktionen zwischen den Modulen . . . . .                | 59  |
| 4.3   | Prozessentwicklung pulverbettbasiertes 3D-Drucken . . . . . | 59  |
| 4.3.1 | Anforderungen . . . . .                                     | 59  |
| 4.3.2 | Anlagentechnik . . . . .                                    | 60  |
| 4.3.3 | Prozessparameter . . . . .                                  | 66  |
| 4.3.4 | Experimente, Fehlerbilder und Anlagenoptimierung . . . . .  | 72  |
| 4.3.5 | Industrielle Umsetzung . . . . .                            | 78  |
| 4.4   | Zusammenfassung . . . . .                                   | 78  |
| 5     | Material- und Prozesssimulation . . . . .                   | 79  |
| 5.1   | Vorgehen im Kapitel . . . . .                               | 79  |
| 5.2   | Materialsimulation auf multiplen Skalen . . . . .           | 79  |
| 5.2.1 | Allgemeines . . . . .                                       | 79  |
| 5.2.2 | Homogenisierung . . . . .                                   | 80  |
| 5.2.3 | Materialstrukturaufbau . . . . .                            | 84  |
| 5.2.4 | Mechanische Belastungen . . . . .                           | 88  |
| 5.2.5 | Einteilung in Strukturmodelle . . . . .                     | 94  |
| 5.2.6 | Anforderungen an ein verbessertes Materialsystem . . . . .  | 94  |
| 5.3   | Prozesssimulation des Schwundverhaltens . . . . .           | 96  |
| 5.3.1 | Allgemeines . . . . .                                       | 96  |
| 5.3.2 | Randbedingungen . . . . .                                   | 96  |
| 5.3.3 | Modellaufbau . . . . .                                      | 97  |
| 5.3.4 | Verformungsverhalten . . . . .                              | 100 |
| 5.4   | Zusammenfassung . . . . .                                   | 102 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6     | Materialentwicklung                                      | 103 |
| 6.1   | Vorgehen im Kapitel . . . . .                            | 103 |
| 6.2   | Monomaterialsystem . . . . .                             | 103 |
| 6.2.1 | Allgemeines . . . . .                                    | 103 |
| 6.2.2 | Materialauswahl . . . . .                                | 109 |
| 6.2.3 | Eigenschaften . . . . .                                  | 112 |
| 6.2.4 | Fazit . . . . .  | 117 |
| 6.3   | 2D-Multimaterialsysteme . . . . .                        | 118 |
| 6.4   | 3D-Multimaterialsysteme . . . . .                        | 118 |
| 6.4.1 | Allgemeines . . . . .                                    | 118 |
| 6.4.2 | Materialauswahl . . . . .                                | 121 |
| 6.4.3 | Eigenschaften . . . . .                                  | 124 |
| 6.4.4 | Fazit . . . . .  | 127 |
| 6.5   | Zusammenfassung . . . . .                                | 129 |
| 7     | Nutzwertanalyse  | 131 |
| 7.1   | Vorgehen im Kapitel . . . . .                            | 131 |
| 7.2   | 3D-Druck-gerechte Konstruktion . . . . .                 | 131 |
| 7.3   | Wettbewerbsfaktoren . . . . .                            | 132 |
| 7.4   | Auf die Wettbewerbsfaktoren bezogener Nutzwert . . . . . | 134 |
| 7.5   | Zusammenfassung . . . . .                                | 137 |
| 8     | Schlussbetrachtung                                       | 139 |
| 8.1   | Zusammenfassung der Arbeit . . . . .                     | 139 |
| 8.2   | Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten . . . . .        | 141 |
| 9     | Literaturverzeichnis                                     | 143 |
| 10    | Anhang   | A   |
| 10.1  | Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten . . . . .   | A   |
| 10.2  | Materialdaten zur Simulation . . . . .                   | C   |
| 10.3  | Angewendete Softwaresysteme . . . . .                    | C   |
| 10.4  | Daten zur Nutzwertanalyse . . . . .                      | D   |



# Verzeichnis der Formelzeichen

## Große lateinische Buchstaben

| Symbol          | Einheit          | Bedeutung   |
|-----------------|------------------|---|
| $A_{DikaPor}$   | $mm^2$           | Fläche des polymeren Grundmaterials DikaPor im Spannungsquerschnitt       |
| $A_m$           | –                | Systemmatrix, Einheit je nach Koeffizienten                               |
| $A_{MM}$        | $mm^2$           | Fläche der Leiterbahn im Spannungsquerschnitt eines Multimaterial-Systems |
| $A_W$           | $mm$             | Fläche des elektrischen Widerstands                                       |
| $A_{spg}$       | $mm^2$           | Gesamtfläche im Spannungsquerschnitt                                      |
| $BE$            | %                | prozentualer Bindereintrag, bezogen auf die Gesamtmasse                   |
| $E_t$           | $\frac{N}{mm^2}$ | Elastizitätsmodul aus dem Zugversuch                                      |
| $F_N$           | $N$              | Zugkraft (normiert)   |
| $H$             | $\frac{N}{mm^2}$ | Kugeldruckhärte   |
| $KP$            | %                | Kugelpackung  |
| $m_1, m_2, m_3$ | –                | Mengen mit Variablen $x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n, z_1, \dots, z_n$  |
| $N(s_j)$        | –                | Nutzwert der Alternative $s_j$  |
| $R$             | $\Omega$         | elektrischer Widerstand   |
| $RFG$           | %                | Raumfüllungsgrad  |
| $T_{DK}$        | $C$              | Druckkopftemperatur   |
| $T_g$           | $C$              | Glasübergangstemperatur   |
| $T_s$           | $C$              | Kristallitschmelztemperatur   |
| $U_{DK}$        | $V$              | Düsenspannung   |
| $U_R$           | $V$              | Netzspannung  |
| $V_{RVE}$       | $mm^3$           | Volumen des repräsentativen Volumenelements (RVE)                         |

### Kleine lateinische Buchstaben

| Symbol              | Einheit           | Bedeutung   |
|---------------------|-------------------|---|
| $a_K$               | $mm$              | Ankathete   |
| $a_{ij}$            | –                 | Koeffizienten der Systemmatrix, Einheit je nach Koeffizienten               |
| $a_{PN}$            | $mm$              | Abstand zwischen Pulverschicht und Kanüle                                   |
| $a_T$               | $mm$              | Tropfenabstand zur Erzeugung von Leiterbahnen                               |
| $a_{T_{opt}}$       | $mm$              | optimaler Tropfenabstand zur Erzeugung von Leiterbahnen                     |
| $c$                 | $\frac{mg}{cm^3}$ | Konzentration   |
| $cos$               | –                 | Kosinus   |
| $d_{50}$            | $\mu m$           | mittlere Korngröße  |
| $d_E$               | $mm$              | Eindringtiefe   |
| $d_{max}$           | $\mu m$           | maximale Verschiebung   |
| $d_N$               | $mm$              | Kanüldurchmesser  |
| $d_{Partikel}$      | $mm$              | Partikeldurchmesser allgemein   |
| $d_{PMMA}$          | $mm$              | Partikeldurchmesser des in PolyPor verarbeiteten PMMA                       |
| $d_{Probe}$         | $mm$              | Probenhöhe  |
| $d_{Simulation}$    | $mm$              | Partikeldurchmesser in der Simulation                                       |
| $d_T$               | $mm$              | Tropfendurchmesser  |
| $g_{ij}$            | –                 | Gewichtungsfaktor des Teilnutzens   |
| $g_K$               | $mm$              | Gegenkathete  |
| $g_{K1}$            | $mm$              | vergrößerte Gegenkathete  |
| $h_K$               | $mm$              | Hypotenuse  |
| $h$                 | $\mu m$           | Schichtstärke   |
| $k_{LK}$            | $e$               | Lohnkosten  |
| $k_{MK}$            | $e$               | Materialkosten  |
| $k_{MSK}$           | $e$               | Maschinenkosten   |
| $l_0$               | $mm$              | Ursprungslänge einer Probe  |
| $l_N$               | $cm$              | Kanülenlänge  |
| $l_{Probe}$         | $mm$              | Probengröße   |
| $l_W$               | $mm$              | Länge des Widerstands   |
| $m$                 | $mm$              | Verfahrweg  |
| $m_0$               | $mg$              | Tropfenmasse des Binders bei einem Bindereintrag von 10 % und 10.000 Schuss |
| $m_A$               | $mg$              | mittlerer Bindereintrag in der Prozesssimulation                            |
| $m_{N1B}, m_{N2B},$ | $kg$              | Massen zur Bestimmung der Grünteilfestigkeit                                |
| $m_{N3B}$           |                   | Belastungswerte   |
| $m_{N2E}$           | $kg$              | Masse zur Bestimmung der Grünteilfestigkeit                                 |
|                     |                   | Entlastungswert   |

|                   |                  |  |
|-------------------|------------------|--|
| $m_{max}$         | $mg$             | maximaler Bindereintrag in der Prozesssimulation |
| $m_{min}$         | $mg$             | minimaler Bindereintrag in der Prozesssimulation |
| $m_{t1}$          | $mg$             | Masse eines Tropfens des Tintenstrahldruckkopfs  |
| $m_{t2}$          | $g$              | Masse eines Tropfens des Multimaterialmoduls     |
| $n$               | –                | Stückzahl  |
| $n_n$             | $\frac{1}{min}$  | Drehzahl   |
| $n_I$             | –                | Anzahl an Iterationen                            |
| $n_{ij}$          | –                | Teilnutzwert                                     |
| $n_R$             | $\frac{1}{min}$  | Rührer-Drehzahl                                  |
| $n_T$             | –                | Tropfenanzahl                                    |
| $P$               | $\mu s$          | Pulsdauer  |
| $p_{DD}$          | $\frac{N}{mm^2}$ | Dampfdruck                                       |
| $p_S$             | $bar$            | Druckstoßstärke                                  |
| $s_j$             | –                | Alternative j für den Nutzwert                   |
| $s_k$             | –                | Alternative Kosten für den Nutzwert              |
| $s_q$             | –                | Alternative Qualität für den Nutzwert            |
| $s_t$             | –                | Alternative Zeit für den Nutzwert                |
| $t$               | $a$              | Zeit   |
| $t_{Schwund}$     | $h$              | Schwundzeit                                      |
| $t_{aPB}$         | $h$              | Zeit der Lagerung außerhalb des Pulverbetts      |
| $t_I$             | $\mu s$          | Pulsdauer  |
| $t_{iPB}$         | $h$              | Zeit der Lagerung im Pulverbett                  |
| $t_N$             | $s$              | Zeit zur Bestimmung der Grünteilfestigkeit       |
| $t_R$             | $s$              | Dauer des Rührvorgangs                           |
| $t_S$             | $ms$             | Dauer des Druckstoßes                            |
| $t_T$             | $min$            | Dauer der Trocknungsphase                        |
| $t_Z$             | $s$              | Zykluszeit                                       |
| $v_{Druck}$       | $\frac{mm}{s}$   | Druckgeschwindigkeit                             |
| $x_1, \dots, x_n$ | –                | Variable der Menge $m_1$                         |
| $x_A$             | $mm$             | Maßabweichung durch Schwund                      |
| $x_V$             | –                | Vektor mit unbekanntem Größen                    |
| $y_1, \dots, y_n$ | –                | Variable der Menge $m_2$                         |
| $y_V$             | –                | Vektor mit bekannten Größen                      |
| $z_1, \dots, z_n$ | –                | Variable der Menge $m_3$                         |

## Griechische Buchstaben

| Symbol             | Einheit                    | Bedeutung                                   |
|--------------------|----------------------------|---|
| $\alpha_{DK}$      | °                          | Druckkopfwinkel                             |
| $\alpha_{DK0}$     | °                          | Standard-Druckkopfwinkel                    |
| $\alpha_{DK1}$     | °                          | vergrößerter Druckkopfwinkel                |
| $\alpha_W$         | $\frac{1}{K \cdot 10^6}$   | linearer Wärmeausdehnungskoeffizient        |
| $\beta_{DK}$       |                            | Gegenwinkel zum Druckkopf                   |
| $\Delta_\epsilon$  | %                          | Dehnungsänderung                            |
| $\Delta_l$         | mm                         | Längenänderung                              |
| $\Delta_m$         | mm                         | abweichende Maßhaltigkeit                   |
| $\Delta_{Schwund}$ | %                          | Aufbiegung durch Schwund                    |
| $\Delta_\sigma$    | $\frac{N}{mm^2}$           | Spannungsänderung                           |
| $\Delta_T$         | K                          | Änderung der Temperatur                     |
| $\epsilon$         | %                          | Dehnung                                     |
| $\epsilon_B$       | %                          | Bruchdehnung                                |
| $\epsilon_m$       | %                          | Dehnung bei Zugfestigkeit                   |
| $\eta$             | $\frac{kg}{mm \cdot s}$    | Viskosität                                  |
| $\kappa$           | $\frac{1}{\Omega \cdot m}$ | elektrische Leitfähigkeit                   |
| $\nu$              | —                          | Querkontraktionszahl                        |
| $\rho_1$           | $\frac{g}{cm^3}$           | Dichte                                      |
| $\rho_2$           | $\frac{\Omega}{m}$         | spezifischer Widerstand                     |
| $\rho_{dpi}$       | dpi                        | Punktdichte (entspricht der Druckauflösung) |
| $\rho(i)$          | %                          | Sättigungsgrenze des Stoffes i bei 20 °C    |
| $\rho_S$           | $\frac{g}{cm^3}$           | Schüttdichte                                |
| $\sigma$           | $\frac{N}{mm^2}$           | Spannung                                    |
| $\sigma_B$         | $\frac{N}{mm^2}$           | Bruchspannung                               |
| $\sigma_m$         | $\frac{N}{mm^2}$           | Zugfestigkeit                               |

# Verzeichnis der Abkürzungen und Begriffe

|            |  |
|------------|--|
| 1D/2D/3D   | ein-/zwei-/drei-dimensional  |
| 1.2709     | Werkstoffbezeichnung für einen Werkzeugstahl (X3NiCoMoTi-18-9-5)   |
| 1.4404     | Werkstoffbezeichnung für einen Edelstahl (X2CrNiMo17-12-2)   |
| 3DP        | engl.: 3D-Printing für 3D-Drucken  |
| Abm.       | Abmessung  |
| Abk.       | Abkürzung  |
| ABS        | Acrylnitril-Butadien-Styrol  |
| ANSYS      | ANalysis SYStem (kommerzielle Software auf Basis der FEM)  |
| bspw.      | beispielsweise   |
| bzgl.      | bezüglich  |
| bzw.       | beziehungsweise  |
| C          | Kohlenstoff(atom)  |
| CAD        | engl.: Computer Aided Design für Computer-unterstütztes Design   |
| CLI        | engl.: Common Layer Interface für ein<br>CAD-Dateiformat für Schichtkonturen (Dateiformat)                                     |
| CNC        | engl.: Computerized Numerical Control für computergestützte<br>numerische Steuerung  |
| const.     | konstant   |
| CSV        | engl.: Character Separated Values für den<br>strukturierten Aufbau einer Textdatei (Dateiformat)                               |
| Digimat FE | Modul zur Homogenisierung der Materialeigenschaften des<br>Programms Digimat (kommerzielle Software zur Multiskalensimulation) |
| Digimat MF | Modul zur Generierung von Mikrostrukturen des<br>Programms Digimat (kommerzielle Software zur Multiskalensimulation)           |
| DikaPor    | im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes poröses Material  |
| DikaDens   | im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes dichtes Material  |
| DMLS       | Direktes-Metall-Laser-Sintern®   |
| DSC        | engl.: Differential Scanning Calorimetry für dynamische<br>Differenzkalorimetrie   |
| dpi        | engl.: dots per inch für Punkte pro Zoll   |
| EBM        | engl.: Electron Beam Melting für Elektronenstrahlschmelzen   |
| E-Modul    | Elastizitätsmodul  |
| engl.      | englisch   |
| FEM        | Finite-Elemente-Methode  |
| FDM        | engl.: Fused Deposition Modeling für Schmelzschiichtung  |
| FLM        | engl.: Fused Layer Modeling für Schmelzschiichtung   |
| gen.       | generativ  |
| H          | Wasserstoff(atom)  |

## Verzeichnis der Abkürzungen und Begriffe

---

|         |  |
|---------|--|
| HA      | Hydroxylapatit   |
| Ka.     | Kapitel  |
| lat.:   | lateinisch   |
| LCVD    | engl.: Laser Chemical Vapor Deposition für lasergestützte chemische Gasphasenabscheidung |
| LLM     | engl.: Layer Laminated Manufacturing für schichtweise Fertigung auf Folienbasis          |
| LOM     | engl.: Laminated Object Manufacturing für schichtweise Fertigung auf Folienbasis         |
| m       | Matrix in einem Material   |
| Mat.    | Material   |
| MIT     | Massachusetts Institute of Technology  |
| MJM     | engl.: Multi Jet Modeling für schichtweisen Aufbau nur über Druckköpfe                   |
| MMA     | Methacrylsäuremethylester  |
| N       | Stickstoff(atom)   |
| NWA     | Nutzwertanalyse  |
| O       | Sauerstoff(atom)   |
| OF      | Oberfläche   |
| P       | Poren in einem Material  |
| PA      | Polyamid   |
| PBT     | Polybutylenterephthalat  |
| PEEK    | Polyetheretherketon  |
| PE-HD   | engl.: Polyethylen „high density“ für Polyethylen mit hoher Dichte                       |
| PE-LD   | engl.: Polyethylen „low density“ für Polyethylen mit niedriger Dichte                    |
| PEP     | Produktentstehungsprozess  |
| PBM     | engl.: Portable Bitmap für ein Format zur Speicherung von Bilddaten (Dateiformat)        |
| PMMA    | Polymethylmethacrylat  |
| PolyPor | kommerzieller 3D-Druck-Werkstoff auf PMMA-Basis der Firma Voxeljet Technology GmbH       |
| POM     | Polyoxymethylen  |
| PP      | Polypropylen   |
| PU      | Polyurethan  |
| R       | organischer Rest in chemischer Strukturformel  |
| RAPIX3D | kommerzielle Software zur Baujobvorbereitung   |
| REM     | Rasterelektronenmikroskop  |
| RVE     | repräsentatives Volumenelement   |
| RM      | engl.: Rapid Manufacturing für schnelle Fertigung  |
| RP      | engl.: Rapid Prototyping für schneller Modellbau   |
| RT      | Raumtemperatur   |
| S       | Struktur in einem Material   |
| SLM     | Selective Laser Melting® für Laserstrahlschmelzen  |

|       |   |
|-------|---|
| SLS   | Selektives Laser-Sintern  |
| sog.  | sogenannt(es)   |
| STL   | engl.: Standard Triangulation Language Format<br>zur Beschreibung der Oberfläche eines Körpers durch Dreiecke (Dateiformat) |
| u. a. | unter anderem   |
| UV    | ultraviolett  |
| vgl.  | vergleiche  |
| Xn    | EU-Gefahrstoffkennzeichnung für gesundheitsschädlich  |
| z. B. | zum Beispiel  |



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Für die Wirtschaftsleistung Deutschlands spielt die Produktion trotz des proklamierten Wandels vom Industrie- zum Dienstleistungsstandort noch immer eine entscheidende Rolle (ABELE & REINHART 2011). Nach ABELE & REINHART (2011) bestehen in Deutschland etwa sieben Millionen Arbeitsplätze in der Produktion. Zudem ist die gleiche Anzahl zusätzlich in Bereichen, die der Produktion nahe stehen, wie beispielsweise der Logistik, eingeordnet. Industrie und Gesellschaft müssen sich daher den sich ändernden Bedingungen durch sogenannte *Megatrends* stellen. Megatrends sind längerfristige Entwicklungen, die durch globale, nachhaltige Auswirkungen mit hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten gekennzeichnet sind.

Eine Rolle spielen dabei insbesondere die folgenden vier Megatrends. Die **Durchdringung mit neuen Technologien** fordert auch im Bereich neuer Fertigungsverfahren interdisziplinäre Zusammenarbeit. Im Bereich der Material- und Prozessentwicklung müssen beispielsweise Chemie, Physik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Informatik eng kooperieren. Nur durch Zusammenspiel dieser Fachbereiche können optimale Ergebnisse erzielt werden. Durch die **Dynamisierung der Produktlebenszyklen** nimmt die Zeit bis zur Markteinführung (*Time-to-market*) und jene zwischen Produktgenerationen ab. Damit verliert die Fertigung in Großserien an Bedeutung (WIRTH 2004). Dieser rasche Technologiewandel fordert anpassungsfähige Produktionssysteme. *Generative Fertigungsverfahren*, welche durch den schichtweisen Aufbau von Bauteilen gekennzeichnet sind, bieten eine Chance, diese Aufgaben, wie verkürzte Fertigungszeiten und wirtschaftliche Kleinserienproduktion, zu meistern (ZÄH 2006). Diese Prozesse werden auch *additiv* genannt. Die **Globalisierung**, also die weltweit immer engere Verflechtung aller Lebensbereiche, verschärft den Wettbewerbsdruck in den Unternehmen. Da die Weltbevölkerung und der Anteil der Menschen mit hohem Lebensstandard steigen sowie oft ein sorgloser Umgang mit Ressourcen stattfindet, ist die **Ressourcenverknappung** relevant. Neue und effizientere Fertigungsverfahren sind notwendig, um auch weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben. (ABELE & REINHART 2011)

Diese Einflussfaktoren erfordern eine Anpassung der Produktion am Standort Deutschland an die sich ändernden Rahmenbedingungen. Es müssen neben der Adaption der Organisationsstruktur von Unternehmen viele weitere Maßnahmen im Bereich neuer Produkte, Prozesse und Fertigungstechnologien ergriffen werden. Innovationen in der Produktions- und Fertigungstechnik sind hierfür elementar. Diese können u. a. auf Produkt-, Prozess- und Ressourcenebene realisiert werden. Eine steigende Innovationskraft auf Prozessebene bezieht sowohl die Geschäfts- als auch die Fertigungsprozesse ein. Auch die Automatisierung

von Abläufen und die Reduzierung von Montageschritten können Unternehmen helfen, im globalen Wettbewerb zu bestehen (ABELE & REINHART 2011).

Die Schlüsselrolle Deutschlands bei der Herstellung von Investitionsgütern wie im Bereich der Anlagentechnik ist nur dann gegeben, wenn eben diese ressourceneffizient gestaltet werden. Zukünftig wird die Energie- und Ressourceneffizienz, auch im Sinne von Materialkreisläufen, stark an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus nimmt der Wunsch nach *mass customization*, also kundenindividuellen Produkten für jeden Käufer, zu (GEBHARDT 2007). Dafür müssen alle Elemente des Produktentstehungsprozesses, ausgehend von der Entwicklung über die Produktion bis hin zum Vertrieb, flexibler gestaltet werden. Hier können speziell generative Fertigungsverfahren einen unterstützenden Beitrag leisten (WITT & DÜRR 2006). Dabei wird ein Werkstoff in Schichten selektiv verfestigt. Selbst komplexe Geometrien können mit Hilfe dieser Technologien in hoher Varianz und geringer Stückzahl wirtschaftlich produziert werden. Aufgrund der rasanten Entwicklung in den vergangenen Jahren stellen die neuartigen generativen Verfahren inzwischen eine Alternative zur klassischen Fertigung mittels Spritzgießen oder Zerspanung dar (ZÄH 2006). Somit finden sie auch nicht mehr allein in der Entwicklungsphase als Prototyp (engl.: „Rapid Prototyping“), sondern zunehmend auch in der Herstellung individueller oder äußerst komplexer Produkte (engl.: „Rapid Manufacturing“) Anwendung (MEYER 2007). Hier liegen die generativen Kunststofffertigungsverfahren jedoch noch hinter den metallischen zurück, was insbesondere auf die gegenüber Serienfertigungsverfahren wie dem Spritzgießen schlechteren mechanischen Eigenschaften zurückzuführen ist (KELLNER 2009). Während beispielsweise das gussgerechte Konstruieren an Universitäten gelehrt wird, findet dies für die generativen Verfahren kaum statt. Dieses ist aber dringend notwendig, um der Technologie zum Durchbruch zu verhelfen (WEGNER & WITT 2010).

Der *3D-Druckprozess* (engl.: 3D-Printing, 3DP) ist eines der generativen Verfahren und basiert somit ebenfalls auf der schichtweisen Fertigung. Dabei werden dünne Schichten eines Pulvers (Sand oder Kunststoff, in seltenen Fällen Keramik oder Metall) auf eine Bauplattform aufgebracht und selektiv mit einem Fluid, dem sogenannten Binder, verfestigt (ZÄH ET AL. 2011). Durch die schichtweise Fertigung können dabei nahezu beliebige Geometrien produziert werden und das Potential zur Herstellung auch komplexer kundenindividueller Produkte ist hoch (EDERER 2007). Auch die Umsetzung von *Funktionsintegration* ist möglich. Darunter wird die Integration von Funktionen durch geometrische Formen wie beispielsweise Gelenke, Federn oder Verschlüsse verstanden. So können Material, Verbindungselemente und damit auch Montageschritte gespart werden. Haupteinsatzgebiete des 3D-Kunststoffdrucks sind Modelle für den Feinguss, da hier die hohe Porosität der gedruckten Teile nicht hinderlich ist (EDERER 2007). Im Fall von Kunstobjekten und Anschauungsprototypen ist sie ebenfalls nicht hinderlich, weshalb auch diese Bereiche bedient werden. Die *Porosität* stellt das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen eines Stoffes dar. Diese ergibt sich bei 3D-gedruckten Teilen analog zur *Schüttdichte*, das auf der Dichte des Polymerpulvers und dem eines kontinuierlichen Fluids basiert, welches die Hohlräume füllt und in vorliegendem Fall Luft ist. Durch die Fertigung im kalten *Pul-*

*verbett* ohne Einbringung von Wärme ist es nicht notwendig, die Bauteile durch *Supports* zu stützen. Diese sind feine Strukturen an Überhängen, welche dem Bauteil bei anderen generativen Verfahren Halt geben oder für eine geregelte Wärmeabfuhr in die *Bauplatzform* sorgen. Das Pulverbett ist dabei die im Bauraum der Anlage befindliche Pulvermenge. Der Bauraum wird unten durch die bewegliche Bauplatzform begrenzt. Als *Bau* wird der Prozess der schichtweisen Fertigung bezeichnet. Da im 3D-Drucken bei ausreichender Düsenanzahl die gesamte Schicht auf einmal benetzt werden kann, ist dieses Verfahren wesentlich schneller als solche, die den Laserstrahl zur Verfestigung nutzen. Auch der Bau ohne *Supports* verkürzt den Bauprozess und die Nacharbeit.

Wegen der geringen Kosten und kurzen Bauzeiten rückte das 3D-Drucken in den letzten Jahren insbesondere in den USA gegenüber anderen Fertigungsverfahren in den Vordergrund und die jährlichen Verkaufszahlen von 3D-Druckern stiegen rasant (WOHLERS 2010). Abbildung 1.1 stellt die Steigerung der Verkaufszahlen zwischen 1996 und 2009 von ca. 100 Stück auf knapp über 5000 pro Jahr dar. Nach WOHLERS (2010) sind hier jedoch nicht nur pulverbettbasierte Verfahren gezählt, sondern auch Fused Deposition und Multi Jet Modeling, welche 2004 50 % der insgesamt verkauften Systeme ausmachten.

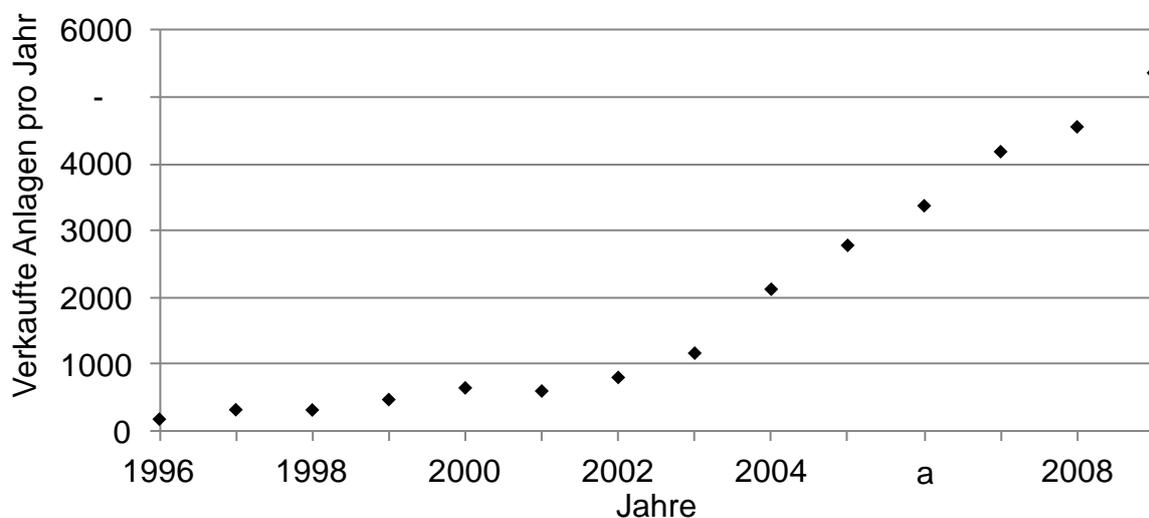


Abbildung 1.1: Weltweit verkaufte 3D-Drucksysteme (inklusive Fused Deposition und Multi Jet Modeling) zwischen 1996 und 2009 nach WOHLERS (2010)

Durch die hohe Porosität ergeben sich allerdings auch Defizite. Wegen der daraus resultierenden unzulänglichen mechanischen Eigenschaften (unter anderem bzgl. Elastizitätsmodul und Bruchdehnung) ist eine Fertigung von Bauteilen gemäß dem Rapid Manufacturing in der Regel nicht möglich. Auch weitere wünschenswerte Voraussetzungen, wie Oberflächen-güte oder eine Vielzahl zu verarbeitender Materialien, sind zur Fertigung von Bauteilen mit generativen Verfahren nicht erfüllt. Kommerziell findet im Kunststoffbereich aktuell

nur Polymethylmethacrylat (PMMA) als PolyPor der Firma Voxeljet Technology GmbH Anwendung. Der hohen Porosität des Materials und den schlechteren mechanischen Eigenschaften der resultierenden Bauteile versucht man durch dem generativen Prozess nachgelagerte Wärmebehandlung und Infiltration, beispielsweise mit Epoxidharzen, zu begegnen. Letztere wird oft in langwieriger Handarbeit durchgeführt. Auch die Verarbeitung mehrerer Materialien in einem Prozess ist aktuell nicht möglich. Man spricht daher von *Monomaterial*.

Eine große Herausforderung ist das unvollständige Verbinden beziehungsweise auch die reine Adhäsion der Pulverpartikel untereinander und die daraus resultierende geringe Festigkeit und Steifigkeit. Durch vollständige Polymerisation können Raumfüllungsgrad (RFG) und mechanische Eigenschaften gesteigert werden und es kann der Technologie 3D-Drucken damit zum Durchbruch verholfen werden. Damit kann auch der Prozessschritt der Infiltration entfallen und Bauteile in Sinne des Rapid Manufacturing erstellt werden. Aktuell beeinträchtigt zudem der durch die chemische Reaktion eintretende Polymerisationschwund die Maßhaltigkeit. Bei stärkerer Polymerisation ist ein höherer Einfluss des Schwunds zu erwarten. Daher ist es bei der Entwicklung neuer Materialien notwendig, den Schwund besser abschätzen und ihn so nach Möglichkeit durch geeignete Prozessführungsstrategien minimieren zu können. Die Einbringung weiterer Materialien kann den Zweck der Funktionsintegration erfüllen, wenn dadurch zusätzliche Funktionen des Bauteils geschaffen werden. Dies wäre zum Beispiel möglich, wenn Leiterbahnen und Kunststoffgrundkörper in einem Prozessschritt gefertigt werden würden. Dann könnte von *Multimaterialverarbeitung* gesprochen werden.

### 1.2 Zielsetzung

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Arbeiten sollen die Anwendungsbereiche des 3D-Druckens erheblich erweitern, die Akzeptanz des 3D-Kunststoffdrucks seitens des Kunden verbessern und die Erschließung neuer Märkte vorantreiben. Dies ist nur durch eine Erweiterung des Materialspektrums bei gleichzeitiger Verbesserung der Eigenschaften möglich. So können Anlagenhersteller neue Materialien vermarkten und Dienstleister den Endkunden ein neues, erweitertes Werkstoffspektrum bieten. Die Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen generativen und den konventionellen Verfahren wie dem Spritzgießen wird gesteigert. Um innovative Werkstoffsysteme aus Binder und Pulver zu erforschen, muss eine Qualifizierungsmethode für neue Materialien im 3D-Druck entwickelt werden. Herzstücke einer solchen Methode sind neben klassischen Werkstoffprüfungen wie dem Zugversuch Simulationsmodelle. Die Herausforderung liegt aktuell in der geringen Festigkeit und hohen Porosität der Bauteile durch geringe Verbindung der Pulverpartikel sowie der Tatsache, dass lediglich ein Material pro Prozess zu verarbeiten ist.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, neue Materialien mit Hilfe der entwickelten Methode für den 3D-Druckprozess zu qualifizieren (vgl. Abbildung 1.2) und die Verarbeitung mehrerer Werkstoffe in einem Prozessschritt zu ermöglichen. Durch die

methodische Vorgehensweise können die Ergebnisse auf weitere Werkstoffe übertragen werden. Die Methode besteht aus den drei Modulen **Prozess**, **Material** und **Simulation**, wobei sich zu allen Dreien Submodule ergeben. Der Prozess beinhaltet die Submodule *Anlagentechnik* und *Parameter*. Die Entwicklung des Materials spaltet sich in *Mono-* und *Multimaterialien*. Die Simulation teilt sich in eine Modellierung des *Werkstoffs* und des *Prozesses*.

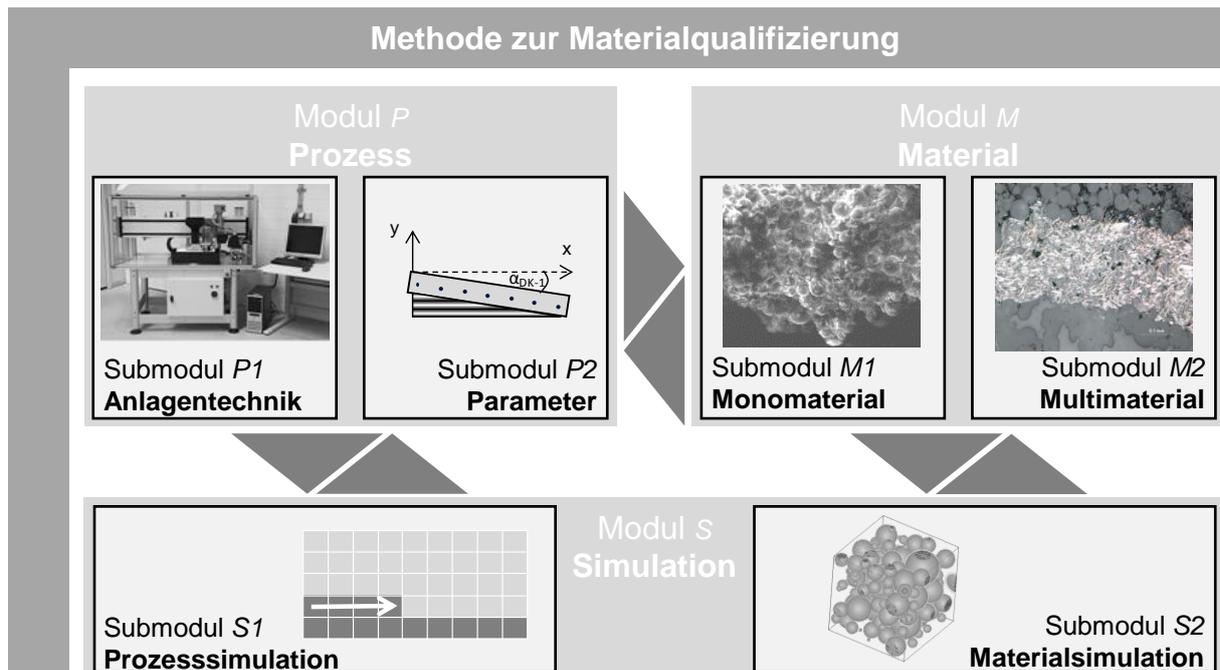


Abbildung 1.2: Module der Methode zur Materialqualifizierung

Die Modulbegriffe finden sich auch in den Überschriften der Hauptkapitel 4 *Methoden- und Prozessentwicklung*, 5 *Material- und Prozesssimulation* sowie 6 *Materialentwicklung* wieder und gliedern diese Arbeit in drei Teilbereiche.

Für das Modul **P Prozess** gilt es, einen 3D-Druck-Demonstrator sowie ein Multimaterialmodul zu entwickeln und diese für eine Serienanlage zu qualifizieren. Mit dem Teststand können die untersuchten Werkstoffe (Modul **M**) und die Simulation (Modul **S**) validiert werden. Im Vordergrund stehen neben der allgemeinen Anlagentechnik Multimaterialverarbeitende Systeme. So können zukünftig funktionsintegrierte Bauteile hergestellt werden. Der Terminus *Bauteile* bezieht sich hier auf industriell anwendbare Teile im Sinne des „Rapid Manufacturing“, also mit Eigenschaften, die über den Prototypstatus („Rapid Prototyping“) hinaus gehen. Das Ziel ist ein flexibler Druck-Demonstrator, der exemplarisch an Kunststoffen mit Leiterbahnen die Möglichkeiten einer Multimaterialverarbeitung aufzeigt. Das Modul soll offen gestaltet werden, so dass die Anwendung auch auf andere Multimaterialien, beispielsweise unterschiedlicher Elastizität, erweitert werden kann.

Im Bereich der **Simulation** soll ein umfassendes Modell aufgebaut werden, welches sowohl den Prozess im Modul *S1* als auch das Materialverhalten im Modul *S2* beschreibt und für beide Bereiche Möglichkeiten der Weiterentwicklung im Sinne eines „Rapid Manufacturing“ bietet. Das Modul *S1* dient dem Prozessverständnis und einer verbesserten Prozessführung. Der Fokus liegt auf der Minimierung des Schwunds und des Verzugs. Erkenntnisse für verbesserte Werkstoffe können durch Modellierung von Materialstruktur sowie -verhalten gewonnen werden. Hier werden Materialstrukturen aufgebaut und der Einfluss von Korngrößen, Bindereintrag, Raumfüllungsgrad und Schüttungen der Partikel untersucht. Auf dieser Basis kann im Modul *M* ein verbessertes Material entwickelt werden.

Die Zielsetzung für das Modul *M* **Material** ist die Entwicklung eines pulverunabhängigen Werkstoffsystems sowie einer Kombination solcher zur Fertigung funktionsintegrierter Produkte aus Multimaterialien am Beispiel von Leiterbahnen. Ein System besteht in diesem Zusammenhang aus einem Pulver und einem Binder, welche miteinander reagieren können und zu verfestigtem Material führen. Um ein pulverunabhängiges Werkstoffsystem zu konzipieren, welches am Markt bestehen kann, müssen die mechanischen Eigenschaften der erzeugten Teile verbessert werden. Um eine solche Entwicklung theoretisch auf jeden Werkstoff zu übertragen, wird sie exemplarisch an zwei, in ihren Eigenschaften und Anforderungen stark unterschiedlichen, polymeren Grundmaterialien umgesetzt werden. Dieser Gegensatz ist beispielsweise bei Polyamid und Polymethylmethacrylat der Fall, weshalb diese beiden Kunststoffe im Fokus der Arbeit stehen.

Darüber hinaus sollen mehrere Werkstoffe parallel verarbeitet werden und so ein Teil aus mindestens zwei Materialien gebaut werden. Dabei besteht der Grundkörper aus dem entwickelten Werkstoffsystem, welches zusätzlich mit einem zweiten Material zu Erzeugung von Leiterbahnen gebaut wird. Das Ziel ist die Herstellung funktionsintegrierter Strukturen, wie zum Beispiel von Bauteilen mit Leiterbahnen.

Die Interaktionen zwischen den Modulen sind vielfältig und die Betrachtung nur eines Moduls ist nicht ausreichend. So kann beispielsweise ohne Anlagentechnik kein Prozess und damit auch kein Material entwickelt werden. Gleichzeitig geben Prozess und Anlagentechnik den Rahmen für das zu erforschende Material vor. Die Simulation ist ebenfalls nur im Zusammenspiel mit Prozess- und Materialentwicklung zielführend. Aus den Erkenntnissen der Simulation können Maßnahmen zur Entwicklung eines verbesserten Materials und zur Steuerung eines verzugsminimalen Prozesses abgeleitet werden.

Um der Technologie 3D-Drucken zum Durchbruch zu verhelfen, ist die Herstellung hochwertiger funktionsintegrierter Produkte auf Basis flexibler Materialsysteme elementar. Die Entwicklung von Werkstoffen zur Herstellung von Multimaterialbauteilen ist das übergeordnete Ziel dieser Arbeit.

## 1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise dieser Arbeit orientiert sich dem vorhergehenden Abschnitt nach an der Methode zur Materialqualifizierung mit den Modulen  $P$  (Prozess),  $S$  (Simulation) und  $M$  (Material). Gegliedert ist die Arbeit in acht Kapitel, wobei Kapitel 1 mit der Einleitung und Kapitel 8 mit der Schlussbetrachtung den Rahmen vorgeben. Basierend auf den Grundlagen (Kapitel 2) wird der Stand der Wissenschaft und Technik (Kapitel 3) erläutert. Darauf aufbauend werden die Prozesstechnik zum 3D-Drucken (Modul  $P$ , Kapitel 4), die entwickelten Materialsysteme (Modul  $M$ , Kapitel 6) und die Simulationstechnik (Modul  $S$ , Kapitel 5) dargelegt. Auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird mit Hilfe der Nutzwertanalyse in Kapitel 7 erörtert. Abbildung 1.3 gibt einen Überblick über die Kapitel der Arbeit sowie die Inhalte und Ziele der einzelnen Kapitel.

Nach der Einleitung dient das zweite Kapitel der Darstellung der Grundlagen generativer Fertigungsverfahren. Hier werden die für das Verständnis dieser Arbeit relevanten Verfahren auch über das 3D-Drucken hinaus erklärt. Zusätzlich werden mit der Polymerisation die chemischen Voraussetzungen erläutert und die im Rahmen dieser Arbeit bedeutenden Kunststoffe Polyamid und Polymethylmethacrylat vorgestellt. Darüber hinaus wird ein erster Überblick zu den Funktionsprinzipien von FEM-Modellierungen und insbesondere der Multiskalensimulation gegeben.

Kapitel 3 dient dazu, den Stand der Wissenschaft und Technik der bis dato am Markt verfügbaren generativen Fertigungstechniken darzulegen. Dabei werden die Anwendungsgebiete, Herausforderungen und Potentiale der in Kapitel 2 dargestellten relevanten additiven Verfahren aufgezeigt. Der Fokus liegt auf dem 3D-Drucken, dessen Restriktionen sowie aktuellen Prozessweiterentwicklungen, die detailliert ausgeführt werden. Des Weiteren werden erste Ansätze zur Multimaterialverarbeitung durch Schichtbauverfahren erörtert und es wird dargelegt, welche Materialien derzeit durch Lasersintern, Strahlschmelzen und 3D-Drucken verarbeitet werden können. Der Terminus *Lasersintern* bezeichnet dabei den schichtweisen Aufbau von Kunststoffteilen, bei denen die Bauteilkonturen mit einem Laser aufgeschmolzen und verfestigt werden. *Strahlschmelzen* dagegen ist ein Prozess, bei dem Metalle in gleicher Form mit einem Laser- oder Elektronenstrahl selektiv konsolidiert werden. Für die beiden letztgenannten werden Methoden der Materialentwicklung erläutert, während beim 3D-Drucken insbesondere die in diesem Verfahren zu verarbeitenden Werkstoffe dargelegt werden. Anschließend wird aufgezeigt, welche Möglichkeiten es bisher zur Simulation des Materials und des Prozesses gibt und auf welcher Basis die Modellierungen im Kapitel 5 aufgebaut sind. Das Ergebnis dieses Kapitels ist der Handlungsbedarf, der im Rahmen dieser Arbeit zu decken ist.

In Kapitel 4 wird im Rahmen der Methode zur Materialqualifizierung auch eine Systematik zur Einteilung von Materialsystemen nach Dimension gegeben. Der Terminus *Dimension* stellt die Ausdehnung des Materials nach Anzahl der Freiheitsgrade dar. Die entwickelte Prozesstechnik (Modul  $P$ ) wird vorgestellt. Dabei wird sowohl der 3D-Druck-Demonstrator



Abbildung 1.3: Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit anhand der Inhalte und Ergebnisse einzelner Kapitel

als auch die Erweiterung um das Multimaterialmodul zur Einbringung mindestens eines weiteren Materials erläutert. Nach Konstruktion, Fertigung und Inbetriebnahme der Anlage und der Zusatzkomponenten können neue Materialien entwickelt und mehrkomponentige Werkstoffsysteme verarbeitet werden. Es werden sowohl für den 3D-Druck-Demonstrator als auch für den Auftragsmechanismus die technischen Aufbauten, die zugehörige Steuerungstechnik sowie Prozessparameter und mögliche Fehlerbilder diskutiert. Für Defizite, welche durch Änderungen im Anlagenaufbau oder durch die Steuerungstechnik behoben werden können, werden Lösungen für einen Anlagenprototyp dargestellt.

Kapitel 5 erläutert die durchgeführten Simulationen anhand ihrer Aufbauten und leitet daraus Schlussfolgerungen für ein bezüglich der mechanischen Eigenschaften und des Verzugs optimiertes Material ab. Das Kapitel gliedert sich folglich in die Material- (Modul *S2*) und die Prozesssimulation bezüglich des Verzugs (Modul *S1*). Erstere wird auf Basis einer Multiskalenmodellierung durchgeführt, um alle relevanten Materialeigenschaften zu ermitteln und anschließend das Werkstoffverhalten nachzubilden und zu verbessern. Dafür wird ein Materialmodell erstellt und durch Variation der Parameter wird das Werkstoffverhalten verbessert. Daraufaufgehend wird in einem zweiten Ansatz der Prozess nachgebildet und schichtweise Schwindung und daraus resultierender Verzug modelliert. Die daraus abgeleiteten Maßnahmen ermöglichen eine verbesserte Maßhaltigkeit. Die Ergebnisse dieses Kapitels bilden die Grundlagen für ein optimiertes Material bezüglich der mechanischen Eigenschaften und der Maßhaltigkeit unter Beachtung der Partikelverteilung, des Bindereintrags, der Schichtstärke und des Schwundverhaltens.

Darauf aufbauend werden im Kapitel 6 die chemische Zusammensetzung, die Bindungsreaktion eines neuen Universal-Pulver-Binder-Systems für ein Monomaterial und die durchgeführten Druckversuche zur Qualifizierung des Materials dargelegt. Zusätzlich werden für die Kunststoffe Polyamid und Polymethylmethacrylat die optimalen Prozessparameter ermittelt. Daraus folgt die Einführung der neuen Werkstoffsysteme DikaPor und DikaDens für das 3D-Drucken, welche unter anderem durch Zugversuche umfassend qualifiziert werden. In einem zweiten Schritt folgt die Entwicklung eines Multimaterialsystems auf Basis von Leitsilber und Graphitsuspensionen. Mit diesen kann gezielt und selektiv ein zweites Material dosiert und so können beispielsweise integrierte Leiterbahnen produziert werden. Sowohl das Mono- als auch das Multimaterialsystem werden umfassend beschrieben und deren Eigenschaften aufgezeigt. Abgerundet wird dieses Kapitel durch eine Zusammenfassung der erzielbaren Eigenschaften.

Zur Darstellung der Wirtschaftlichkeit des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten pulverbettbasierten 3D-Druckverfahrens wird eine Vorgehensweise zur 3D-gerechten Konstruktion erläutert, welche es ermöglicht, Bauteile aus den entwickelten Materialien wirtschaftlich zu fertigen. Dabei wird das im Kapitel 4 erläuterte Multimaterialmodul umkonstruiert und 3D-Druck-gerecht gestaltet. So kann gezeigt werden, welches enorme Potential das sogenannte *Rapid-gerechte Konstruieren* für den Nutzwert hat. Die Nutzwertanalyse wird zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Bauteilproduktion anhand der Wettbewerbs-

faktoren Zeit, Qualität und Kosten für die drei Verfahren Spritzgießen, Zerspanung und 3D-Drucken in Abhängigkeit der gefertigten Stückzahl eingesetzt. So kann der Nutzen durch Funktionsintegration und Multimaterialverarbeitung sowie der für das 3D-Drucken relevante Stückzahlbereich aufgezeigt werden.

Das abschließende Kapitel 8 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit systematisch zusammen und identifiziert den Bedarf an zukünftigen Forschungsarbeiten im Bereich der Simulation sowie der Material- und Anlagenentwicklung des 3D-Drucks.

## 2 Grundlagen der Arbeit

### 2.1 Vorgehen im Kapitel

Generative Fertigungsverfahren verfestigen schichtweise ein formloses Ausgangsmaterial und ermöglichen so die gezielte Erstellung von Produkten weitgehend unabhängig von der Komplexität (ZÄH ET AL. 2007). Zum Verständnis dieser Verfahren werden auf den nächsten Seiten die Prozessgrundlagen des pulverbettbasierten 3D-Druckens sowie eine Klassifizierung und Erläuterung weiterer generativer Verfahren vorgestellt. Verfestigungsmechanismen und Datenvorbereitung werden gesondert diskutiert. Darauf aufbauend werden Anwendungsgebiete, Herausforderungen und Grenzen der Prozesse vorgestellt. Anschließend werden die im Fokus dieser Arbeit stehenden Kunststoffe und elektrisch leitfähige Materialien beleuchtet und es wird gezielt auf die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften dieser eingegangen. Darüber hinaus wird das Prinzip der Funktionsintegration grundsätzlich vorgestellt sowie dessen Umsetzbarkeit mit Schichtbauverfahren beschrieben. In einem letzten Abschnitt werden die Grundlagen der Simulation, welche für das Verständnis dieser Arbeit wichtig sind, dargelegt.

### 2.2 Generative Fertigungsverfahren

#### 2.2.1 Prozessgrundlagen des pulverbettbasierten 3D-Druckens

Generative Fertigungsverfahren dienen in erster Linie zur Erstellung komplexer dreidimensionaler Bauteile. Das Verfahrensprinzip beruht auf der schichtweisen Fertigung, bei der die Kontur des zukünftigen Produkts verfestigt oder verbunden wird. Dazu gibt es verschiedene Verfestigungsprinzipien. Beim 3D-Drucken liegt das Ausgangsmaterial pulverförmig vor und wird durch eine Binderflüssigkeit selektiv verklebt. Die drei grundlegenden Prozessschritte sind dabei *Schichtauftrag*, *Verfestigen* und *Absenken* (vgl. Abbildung 2.1). Es wird ein Pulvermaterial mit im Allgemeinen variierender Korngröße in dünnen Schichten von  $80\ \mu\text{m}$  bis  $150\ \mu\text{m}$  aufgetragen. Innerhalb einer Ebene wird dann ein Schichtbild mit Hilfe des Binders verfestigt. Die Flüssigkeit wird üblicherweise über klassische Tintenstrahl-druckköpfe abgegeben. Anschließend wird die Bauplattform abgesenkt und die nächste Schicht vorgelegt. Auf diese Art und Weise kann ein Bauteil Schicht für Schicht aufgebaut werden (GIBSON ET AL. 2010).

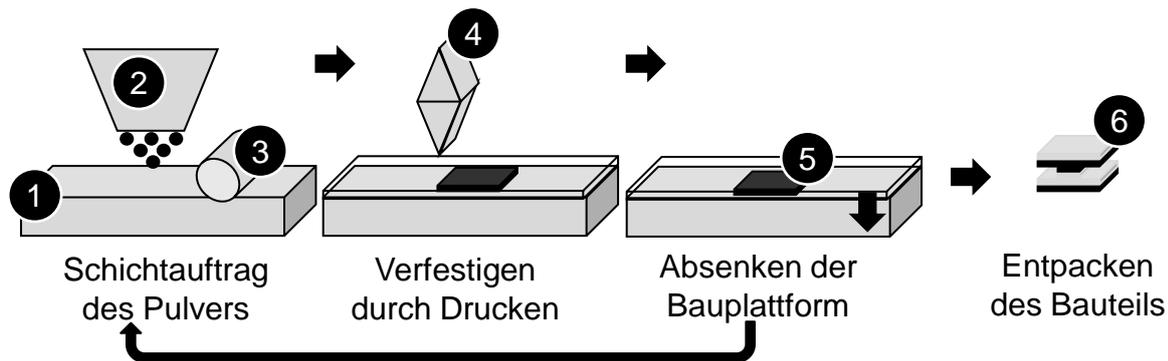


Abbildung 2.1: Prinzipskizze des 3D-Druckprozesses;

1: Bauplattform 2: Pulvervorrat

3: Schichtauftragsmechanismus (Walze) 4: Druckkopf

5: Bauteil im Pulverbett 6: 3D-gedrucktes Bauteil

### 2.2.2 Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren

Mittlerweile ist eine Vielzahl an generativen Fertigungsverfahren am Markt verfügbar. Für den Überblick ist es daher notwendig, diese zu klassifizieren, wobei sie in DIN 8580 (2003) noch keiner Hauptgruppe zugeordnet sind. Grundsätzlich erscheint es sinnvoll, die Prozesse in die Hauptgruppe 1 „Urformen“ einzufügen, wie auch GEBHARDT (2007) erläutert, da durch Verfestigung unterschiedlichster Grundstoffe Zusammenhalt geschaffen wird. DIN 8580 (2003) spricht in diesem Zusammenhang vom „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts, wobei die Stoffeigenschaften des Werkstücks bestimmbar in Erscheinung treten“. Entsprechend der Norm erweist es sich in dieser Gruppe als sinnvoll, die Verfahren nach dem Aggregatzustand vor Prozessbeginn zu unterteilen. In Tabelle 2.1 sind dabei die generativen Verfahren zusammengefasst, deren Ausgangswerkstoff fest ist, in Tabelle 2.2 jene, bei denen ursprünglich eine flüssige oder gasförmige Phase vorliegt.

Die meisten generativen Fertigungsverfahren arbeiten mit festen Ausgangsstoffen, wie Draht, Pulver oder Platten bzw. Folien. Diese werden beispielsweise durch Aufschmelzen und Erstarren oder Aufschneiden und Kleben miteinander verbunden. Die Prozesse Extrusion, Sintern und Schmelzen sowie das Schicht-Laminat-Verfahren gehören zu dieser Gruppe. Eine gewisse Sonderstellung nimmt das 3D-Drucken (3DP) ein, bei dem eine feste Phase mit einer geringen Menge eines flüssigen Binders durch Verkleben oder Polymerisation verfestigt wird.

Im Bereich der generativen Fertigungsverfahren, bei denen das Ausgangsmaterial flüssig oder gasförmig vorliegt, sind die Stereolithographie, das Aerosoldrucken sowie das Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) zu nennen, wobei den beiden Letzteren nur eine geringe Bedeutung zukommt (WOHLERS 2007).

| Aggregatzustand          | fest                       |  |   |                         |
|--------------------------|----------------------------|--|---|-------------------------|
| Ausgangsmaterial         | Draht                      | Pulver                                 |   | Folie/<br>Platte        |
| Verfestigungsmechanismus | Aufschmelzen und Erstarren | Aufschmelzen und Erstarren             | Verkleben durch Binder                                  | Ausschneiden und Kleben |
| Werkstoff                | Kunststoff/<br>Metall      | Kunststoff/<br>Keramik/<br>Metall/Sand | Kunststoff/<br>Keramik/<br>Metall/Sand/<br>Lebensmittel | Kunststoff/<br>Papier   |
| Verfahren                | Extrusionsverfahren        | Sintern/<br>Schmelzen                  | 3D-Drucken  | Schicht-Laminat         |

*Tabelle 2.1: Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren mit festem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials nach GEBHARDT (2007)*

| Aggregatzustand          | flüssig            |                | gasförmig          |
|--------------------------|--------------------|----------------|--------------------|
| Ausgangsmaterial         | Paste/Flüssigkeit  | Aerosol        | Gas                |
| Verfestigungsmechanismus | Polymerisieren     | Abscheiden     | Chemische Reaktion |
| Werkstoff                | Kunststoff/Keramik | Kunststoff     | Kunststoff/Metall  |
| Verfahren                | Stereolithographie | Aerosoldrucken | LCVD               |

*Tabelle 2.2: Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren mit flüssigem oder gasförmigem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials nach GEBHARDT (2007)*

Das Aerosoldrucken kann dabei sowohl der flüssigen als auch der festen Phase zugeordnet werden, da das Aerosol ein Gemisch aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen und einem Gas ist. Verfestigung geschieht dabei durch Abscheiden aus der gasförmigen Phase. Bei der LCVD findet eine chemische Reaktion statt. Die Stereolithographie, bei der eine Flüssigkeit durch Polymerisation vernetzt und verfestigt wird, ist das älteste der Schichtbauverfahren und daher auch das bekannteste.

Die jeweils zu verarbeitenden Materialgruppen (Kunststoff, Metall, Sand, Keramik) können den obigen Tabellen 2.1 und 2.2 entnommen werden. Grundsätzlich ist dazu jedoch zu sagen, dass die Werkstoffauswahl aktuell eingeschränkt ist. Zwar kann theoretisch eine Vielzahl an Materialien verarbeitet werden, doch ist die Materialqualifizierung aufwändig, was eine weitgehende Marktdurchdringung der generativen Fertigungsverfahren bisher verhindert.

### 2.2.3 Verfestigungsmechanismen generativer Fertigungsverfahren

Um aus dem Grundwerkstoff ein Bauteil zu erzeugen, müssen die Schichten zum einen in sich selbst, also in der x-y-Ebene verfestigt werden, zum anderen muss der Verbund zwischen den Schichten, ergo in z-Richtung, hergestellt werden (GEBHARDT 2007). Hierfür sind verschiedene Verfestigungsarten möglich (vgl. Abbildung 2.2). Bei allen generativen Verfahren, bis auf das Laminated Object Manufacturing (LOM), wird für beides das gleiche Prinzip angewandt. Die am weitesten verbreiteten Verfahren Strahlschmelzen, Lasersintern, Extrusion, Stereolithographie, LOM und 3D-Drucken nutzen dabei die unter Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Verfestigungsarten *Aufschmelzen und Erstarren*, *Verkleben durch Binder*, *Ausschneiden und Fügen* und *Polymerisation aus der flüssigen Phase*. Die zuvor ebenfalls genannten Arten *Abscheiden* und *chemische Reaktion* werden wegen ihrer geringen Relevanz nicht weiter betrachtet (WOHLERS 2007).

#### Aufschmelzen und Erstarren

Aufschmelzen und Erstarren als Verfestigungsmechanismus findet bei zwei sehr unterschiedlichen Verfahren Anwendung: beim Strahlschmelzen bzw. Lasersintern und bei den Extrusionsverfahren.

Das *Strahlschmelzen*, auch unter den Bezeichnungen Laser Forming, Selective Laser Melting® (SLM), LaserCUSING®, Electron Beam Melting (EBM) sowie Direktes-Metall-Laser-Sintern® (DMLS) bekannt, und das *Lasersintern*, auch als Selektives Laser-Sintern (SLS) bezeichnet, verfestigen durch „Aufschmelzen und Erstarren“ (GEBHARDT 2007). Dabei wird ein pulverförmiger Werkstoff durch einen Laser- oder Elektronenstrahl selektiv geschmolzen und durch Erstarren der Schmelze verfestigt (VDI 3404: 2009). Die Aktivierungsenergie wird durch den Laser- oder den Elektronenstrahl eingebracht. Beim Strahlschmelzen wird das Material (Metall) vollständig aufgeschmolzen, so dass Bauteile mit einer Porosität von unter 1 % entstehen (YADROITSEV 2009). Beim Lasersintern wird das Pulver dagegen nur angeschmolzen und anschließend bei Abkühlung gesintert. Dieses Verfahren findet für Kunststoffe sowie Metalle und Keramiken zum Teil mit Füllstoff Anwendung. Ist ein solcher Füllstoff vorhanden, wird nur dieser geschmolzen (Matrix) und so das Keramik- oder Metallpulver zu einem sog. Grünling verklebt. Der Terminus *Grünling* bezeichnet einen porösen Formkörper, dessen Partikel minimalen Zusammenhalt haben und der als Rohling, beispielsweise für eine Infiltration, genutzt wird.

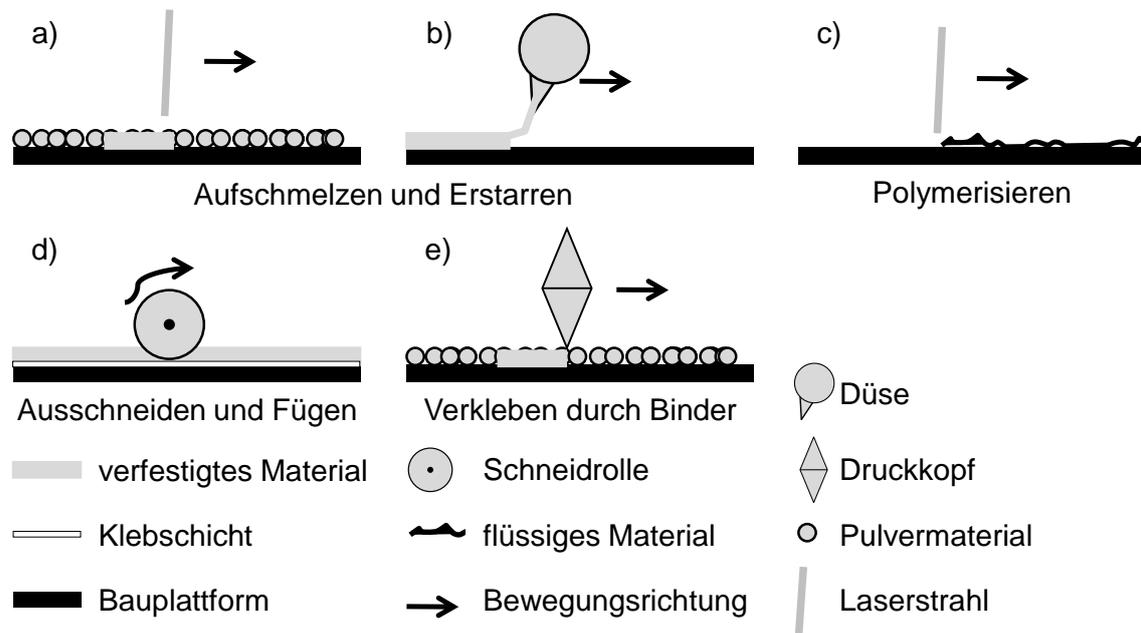


Abbildung 2.2: Verfestigungsarten in der generativen Fertigung;  
 a) Strahlschmelzen (Metall) und Lasersintern (Kunststoff)  
 b) Extrusionsverfahren c) Stereolithographie  
 d) Laminated Object Manufacturing e) 3D-Drucken

Nach MEINERS (1999) wird die Energie des Lasers beim Strahlschmelzen von den Pulverpartikeln absorbiert und in Wärme umgesetzt, was bei ausreichender Laserintensität zum Schmelzen der Partikel führt. Im Gegensatz zum klassischen Sintern, welches bei hohen Temperaturen und Drücken stattfindet und diffusionsgesteuert ist (SCHATT ET AL. 2007), erfolgen das Strahlschmelzen und das Lasersintern bei Atmosphärendruck. Somit muss die Verfestigung einer Schicht nicht durch hohen Druck, sondern allein durch das Benetzungs- und Fließverhalten der Pulverkörner vonstatten gehen (GEBHARDT 2007). Bei der Erstellung metallischer Bauteile sind sogenannte Supportstrukturen notwendig, um beispielsweise die in den Prozess eingebrachte Wärme in die Bodenplatte abzuführen. Näheres kann den Arbeiten von (EMMELMANN ET AL. 2005, GLÄSER 2010, SEHRT 2010, YADROITSEV 2009, ZHANG 2004) entnommen werden.

Beim Lasersintern werden im Allgemeinen teilkristalline Thermoplaste verarbeitet. Der Prozess findet in einem Temperatur-Zeit-Intervall statt, in dem die Schmelze viskos fließt und anschließend in Teilen kristallin erstarrt (ALSCHER 2000). Genaue Untersuchungen dieser Aufschmelz- und Kristallisationsvorgänge, meist durch *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), unterstützen das Prozessverständnis und geben Aufschluss über die ablaufenden Aufschmelz- und Erstarrungsvorgänge (GIBSON ET AL. 2010, KRUTH ET AL. 2008, NÖKEN 1997, RIETZEL ET AL. 2009, SCHMIDT ET AL. 2007). DSC-Messungen stehen für die Dynamische Differenzkalorimetrie (engl.: Differential Scanning Calorimetry, DSC), bei der die abgegebene und aufgenommene Wärmemenge einer Probe während eines

vorgegebenen Temperatur-Zeit-Verlaufs gemessen wird. Die *Extrusionsverfahren* werden in die extrudierenden und die ballistischen Verfahren unterschieden.

Bei ersteren sind das Fused Deposition Modeling (FDM) von Kunststoffen, auch Fused Layer Modeling (FLM) genannt, und das Drahtauftragschweißen von Metallen die bekanntesten Vertreter. Das Material liegt in Draht oder Tablettenform vor, wird aufgeschmolzen und über eine Düse auf die Bauplattform oder eine Bauteilgrundgeometrie (Hybridverfahren) gegeben. Sämtliches Material wird über die Düse aufgetragen, weshalb deren Querschnitt sehr groß sein sollte, um hohe Bauraten zu ermöglichen. Darunter leidet die Genauigkeit. Da direkt auf die Bauplattform gebaut wird, sind für viele geometrische Formen Stützen notwendig. Bei Verarbeitung verschiedenartiger Drähte können mit diesem Verfahren Bauteile mit lokal unterschiedlichen Eigenschaften, z. B. Farben, hergestellt werden. Bei den ballistischen Verfahren wird der Werkstoff dagegen tropfenweise, meist über eine Düse mit Piezo-Elementen, aufgetragen. Bekanntester Vertreter ist hier das Multi-Jet-Modeling (MJM) von Kunststoffen. Dieses ermöglicht es, mehrere Materialien über eine oder mehrere Düsen aufzutragen, was auch der größte Vorteil dieses Verfahrens ist. Bei den Metallen können Pulver-Düse-Prozesse zu diesen Verfahren gerechnet werden (GIBSON ET AL. 2010).

### **Polymerisation aus der flüssigen Phase**

Die Stereolithographie verfestigt ein flüssiges Kunststoff-Grundmaterial selektiv durch ultraviolette (UV) Strahlung. Dabei kommen bei Raumtemperatur zähflüssige und un- oder niedrigvernetzte Monomere zum Einsatz, meist aus den Gruppen der Acrylate, der Epoxid- oder der Vinyletherharze (GEBHARDT 2007). Bei Bestrahlung mit UV-Licht wird durch einen Initiator eine Photopolymerisation in Gang gesetzt, welche das flüssigen Monomere zu festem Polymer vernetzt. Diese Verfahren sind seit der Patentierung durch SWAINSON (1977) bekannt. In anderen Fällen kommen auch Keramiken, meist als Polymerblend, zum Einsatz (MONTGOMERY 2006, TIAN & LI 2010, WU ET AL. 2009, ZHOU ET AL. 2010).

Wegen des flüssigen Grundmaterials müssen für Überhänge Stützkonstruktionen gebaut werden, welche ein Einsinken des verfestigten Materials in das Fluid verhindern (ZÄH 2006). Diese müssen üblicherweise manuell entfernt werden. Nach Ende des Bauprozesses können die Bauteile sich bei Einwirkung von UV-Licht, zum Beispiel durch Sonnenstrahlung, verfärben und durch Bindungsbrüche spröde werden. Die Materialentwicklung ist auf photosensitive Harze beschränkt. Somit müssen die anfallenden Materialentwicklungskosten komplett durch den Absatz an Stereolithographieteilen gedeckt werden. Wegen des flüssigen Grundmaterials sowie aufgrund des vorhandenen Prozessverständnisses durch die Anwendung seit Ende der 70er Jahre können äußerst präzise Teile mit guter Oberfläche gefertigt werden (GIBSON ET AL. 2010).

### Ausschneiden und Fügen

Laminated Object Manufacturing (LOM), auch Layer Laminated Manufacturing (LLM) genannt, sind Fertigungsverfahren, bei denen die aufgetragene Schicht bereits fest ist. Es handelt sich meist um eine dünne Kunststofffolie, welche von einer Rolle gezogen wird. In anderen Fällen kommen auch Metallfolien, die lokal verschweißt werden (GEBHARDT 2007), oder Papier zum Einsatz. Zwischen den Folien wird zum Aufbau dreidimensionaler Strukturen Klebstoff aufgebracht. In den einzelnen Schichten werden die Konturen mit rotierenden Messern oder einem Laser ausgeschnitten. Das überflüssige Material wird zusätzlich in kleine Fragmente zerkleinert, was das Entnehmen aus dem Bauraum nach Prozessende vereinfacht. Die so entstehenden Bauteile weisen eine niedrige Festigkeit und stark anisotrope Eigenschaften auf, allerdings eignet sich das Verfahren wegen der geringen Kosten und der einfachen Bedienbarkeit für den Bürogebrauch (ZÄH 2006). Des Weiteren ist die theoretisch verarbeitbare Materialvielfalt nahezu uneingeschränkt. Da das Material im Gegensatz zu anderen additiven Fertigungsverfahren nicht wiederverwendet werden kann, relativiert sich der absolut gesehen geringe Materialpreis jedoch.

### Verkleben durch Binder

Das selektive Verkleben von Pulvern durch Binder wird 3D-Drucken (3D-Printing, 3DP) genannt. Dabei werden dünne Schichten eines Pulvers vorgelegt und anschließend selektiv entlang der Bauteilkontur mit einem Aktivator benetzt. Pulver und Binder verfestigen bei Zusammentreffen. Dieses Verfahren wurde am Massachusetts Institute of Technology (MIT) patentiert (SACHS 1993) und gehört damit nach der Stereolithographie zu den ältesten Verfahren der generativen Fertigung. Wegen der hohen Porosität der Teile wird es verstärkt in der Modell- und Prototypenherstellung eingesetzt. Es können zahlreiche Werkstoffe verarbeitet werden, wie in der folgenden Auflistung aufgezeigt wird. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem 3D-Drucken liegt, werden Unternehmen und Institutionen angegeben, die diese Materialien verarbeiten.

- Polymere (Voxeljet Technology GmbH)
- Sand (ProMetal RCT)
- Gips (Z Corporation)
- Stärke (Z Corporation)
- Metalle in indirektem Verfahren (REPORT 1997)
- Biokompatible Werkstoffe (PELZER 2005)
- Lebensmittel (COHEN ET AL. 2009)

Neben der hohen Genauigkeit, insbesondere innerhalb einer Bauebene, können mit diesem Verfahren große Bauraten umgesetzt werden, da nicht ein einzelner Laserstrahl das

Pulver belichtet, sondern ein Druckkopf mit vielen Düsen parallel das Baufeld benetzt. Auch das maximale Volumen der Bauteile ist mit bis zu  $4\text{ m} \cdot 2\text{ m} \cdot 1\text{ m}$  im Sand- oder  $1,5\text{ m} \cdot 0,75\text{ m} \cdot 0,75\text{ m}$  im Kunststoffbereich erheblich größer als bei den meisten anderen generativen Fertigungsverfahren. Es sind keine Stützkonstruktionen notwendig, da direkt ins Pulverbett gebaut wird und keine Wärme abgeführt werden muss. Der durch die exotherme Polymerisationsreaktion verursachte Wärmeeinfluss ist vernachlässigbar gering. Es handelt sich jedoch meist um ein zweistufiges Verfahren, bei dem die Bauteile nach dem eigentlichen Druck infiltriert werden müssen, um ausreichende Endfestigkeit zu erreichen.

### 2.2.4 Datenvorbereitung

Die Datenvorbereitung spielt eine entscheidende Rolle bei der Anwendung der Schichtbauverfahren. Der Prozessablauf ist bis zur Entnahme des Bauteils aus dem Bauraum vollständig automatisiert. Damit ist eine Fertigung des Bauteils direkt und werkzeuglos aus CAD-Daten möglich. Die Notwendigkeit, beispielsweise Formen als Zwischenstufe herzustellen, entfällt (LIOU 2008). Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, wird in einem ersten Schritt ein 3D-CAD-Modell erzeugt. Dieses wird als STL-Datei (Standard Triangulation Language) an eine Baujob-vorbereitende Software wie Materialise, Magics oder RAPIX3D gegeben. Dort wird das Bauteil gemeinsam mit weiteren im Bauraum so platziert, dass möglichst viele qualitativ hochwertige Produkte in einem Bauprozess hergestellt werden können. Die virtuellen Bauteile werden mit Hilfe dieser Software in ein Schichtmodell mit der vom Prozess geforderten Schichtstärke zerlegt (das sog. Slicen) und beispielsweise als CLI- (Common Layer Interface) oder PBM-Datei (Portable Bitmap) abgelegt. Diese Daten können anschließend an die Software der Fertigungsanlage gegeben werden (ZÄH 2006).

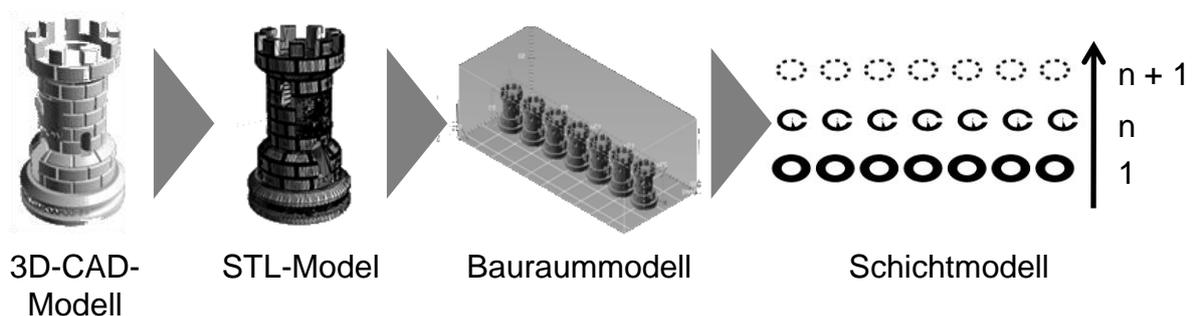


Abbildung 2.3: Datenvorbereitung für das 3D-Drucken (vom CAD zum Schichtmodell)

### 2.2.5 Anwendungsgebiete

Die hohe Flexibilität der Schichtbauverfahren ermöglicht es grundsätzlich, komplexe Bauteile mit großer Funktionalität in kurzer Zeit zu fertigen. Potentiale und Vorteile der generativen Fertigungsverfahren sind:

- Erhebliche Reduzierung der *Time-To-Market* im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren, sowohl durch vereinfachte Erstellung von Prototypen als auch durch die Möglichkeit, direkt Bauteile zu erzeugen (GEBHARDT 2007)
- Keine Notwendigkeit für Werkzeuge und Formen, zum Teil auch Spannmittel (ZÄH ET AL. 2007)
- Große geometrische Gestaltungsfreiheit (ALSCHER 2000) und damit einfache Fertigung kraftflussgerechter Bauteile (KUSHNARENKO 2009)
- Funktionsintegration beispielsweise zur Vermeidung von Montageschritten (CANNY ET AL. 2004, WEGNER & WITT 2010)
- Wirtschaftliche Fertigung von kleinen Stückzahlen und somit kundenindividueller Produkte (WOHLERS 2007)
- Hoher Wiederverwendungsgrad nicht verfestigten Pulvers beim Strahlschmelzen und 3D-Drucken (EMMELMANN ET AL. 2005, MEINERS 1999, SEHRT 2010)

Aktuell finden sich Einsatzgebiete der Verfahren in den folgenden Bereichen:

- Rapid Prototyping
- Rapid Tooling
- Rapid Manufacturing

Die Anwendung lag in den Anfängen hauptsächlich im Bereich des Rapid Prototyping, also der Herstellung von Prototypen und Anschauungsmodellen. Zusätzlich fand die Technik dann auch in das Rapid Tooling Einzug, so dass Werkzeuge und Formen mit Hilfe der generativen Fertigungsverfahren erstellt wurden. Die neuesten Entwicklungen belegen einen zunehmenden Einsatz in der Herstellung von Bauteilen (Rapid Manufacturing). Die Anlagen- und Materialhersteller werden aktuell dazu ermutigt, die Forschung in dieser Richtung voranzutreiben und insbesondere Kosten und *Nacharbeitszeit* zu reduzieren sowie die Bauraumgröße und die Werkstoffauswahl zu erweitern (KLOCKE ET AL. 2005). Die *Nacharbeitszeit* bezeichnet die Zeit, welche nach Abschluss des Bauprozesses notwendig ist, um das Bauteil in den fertigen Zustand zu bringen. Zu den Schritten der Nacharbeit gehören beim 3D-Drucken die Entfernung von Pulver, die Wärmebehandlung und die Infiltration. Bei anderen generativen Verfahren sind zahlreiche weitere Schritte wie Supportentfernung oder Sandstrahlen unumgänglich.

Einsatzfelder für generative Fertigungsverfahren finden sich in den Branchen Anlagenbau, Luft- und Raumfahrt, Werkzeug-, Formen- und Automobilbau, Schmuckindustrie sowie Medizintechnik (ZÄH 2006). Insbesondere der Markt der Medizintechnik, in dem kundenindividuelle Produkte üblich sind, treibt die Forschung und Entwicklung voran. Gerade im Dentalbereich werden vermehrt durch Strahlschmelzen erstellte Produkte eingesetzt (KRUTH ET AL. 2003, METHNER 2007).

Auch für das 3D-Drucken wird die Forderung, Bauteile direkt fertigen zu können, immer stärker. Wegen der großen Restriktionen, welche der Prozess aktuell noch hat, kann diesem Wunsch der Anwender allerdings kaum nachgekommen werden. Anwendungsgebiete für das 3D-Drucken sind aktuell:

- Medizintechnik (DOURANDISH ET AL. 2007, DROSSE 2008, HÄNEL 2009, LANDERS 2004, LOWMUNKONG ET AL. 2009, PELZER 2005, SEITZ 2008, ZEILHOFER 1998)
- Modelle und Design (BEHANECK 2010, EICHMANN 2009, MIDDLETON 2010)
- Gießereitechnik, insbesondere Formenbau (MANAGEMENT 2005, PFEIFER 2006)

Die industrielle Anwendung des 3D-Druckens findet wegen der hohen Porosität gerade im Bereich der Modelle und der Gießereitechnik große Resonanz, da sie hier positiv zu sehen ist. Die aktuell schlechten mechanischen Eigenschaften sind für Anschauungsmodelle irrelevant. Es überwiegt der Zeitvorteil, mit dem wirtschaftlich kundenindividuell gefertigt werden kann. Die Geschwindigkeit des 3D-Druckprozesses ist um den Faktor 5 bis 10 höher als bei anderen generativen Verfahren (EDERER 2007). Im Bereich der Gießereitechnik werden zum einen Sandformen produziert und zum anderen Feingussmodelle aus Kunststoff oder Gips gedruckt.

Aufgrund dieser Aspekte eröffnen sich neue technologische und wirtschaftliche Perspektiven in der Produktionstechnik. Dies gilt auch für die Möglichkeit, Bauteile wirtschaftlich in kleinen Stückzahlen fertigen zu können (WITT & DÜRR 2006). Es lässt überdies die Fertigung on-demand zu, also eine schnelle Reaktion auf die Bestellung eines Bauteils. Damit kann eine Ersatz- oder Verschleißteilversorgung prinzipiell grundsätzlich anders gestaltet werden. Es können ferner Kosten für Betriebsmittel und Lagerhaltung eingespart werden (WOHLERS 2009). Einschränkend wirkt sich jedoch die aktuell geringe Werkstoffvielfalt und die Dimension der Anlagen aus.

### 2.2.6 Herausforderungen und Grenzen

Derzeit verhindern einige Probleme eine Anwendung des 3D-Druckens in allen Bereichen der Produktentstehung. Dazu gehört unter anderem die eingeschränkte Oberflächenqualität aufgrund des Pulvergrundmaterials und des *Treppenstufeneffekts*. Dieser bezeichnet ein wegen der Schichten treppenartiges Erscheinungsbild gekrümmter oder in Baurichtung schräg liegender Oberflächen. Zudem sind die Bauteile porös und haben vergleichsweise geringe

mechanische Steifigkeiten und Festigkeiten. Die geringe und schlecht kalkulierbare Maßhaltigkeit, welche zum Teil durch nicht vorhersehbaren Schwund und den daraus resultierenden Verzug verursacht wird, verhindert eine starke Marktdurchdringung. Die Werkstoffauswahl mit geringer Übertragbarkeit von Material- und Produkteigenschaften aus der Serie ist beschränkt und in jeder Anlage kann nur ein Material gleichzeitig verarbeitet werden, oft ist auch ein Werkstoffwechsel nicht möglich. Zudem wirken sich verschiedene Bediener und Anlagen unterschiedlich auf das spätere Bauteilverhalten aus. Dazu kommt die aufwändige, zum Teil manuelle Nacharbeit, zum Beispiel durch Infiltration oder thermische Behandlung, und die geringe Erfahrung der Mitarbeitenden in der Konstruktion mit 3D-Druck-gerechter Gestaltung, wodurch Chancen nicht genutzt werden. Insbesondere die fehlenden Kenntnisse über werkstoffkundliche Zusammenhänge, sowohl bezüglich des Ausgangsmaterials, des Prozesses als auch der Materialeigenschaften des Produktes, beeinflussen die Anwendungsmöglichkeiten des 3D-Druckens wie aller generativen Fertigungsverfahren jedoch in einem erheblichen Maße negativ.

Die Palette der kommerziell erhältlichen und durch 3D-Drucken zu verarbeitenden Pulverwerkstoffe wie Sand, Kunststoff, Metall, Gips und Stärke ist stark eingeschränkt (DOURANDISH ET AL. 2007, LOWMUNKONG ET AL. 2009, SUWANPRATEEB 2007). Bauteile aus diesen Materialien weisen zudem keineswegs die gleichen Eigenschaften auf die wie durch konventionelle Verfahren, z. B. Spritzgießen oder Zerspanung, erstellten Produkte. Insbesondere Prozesse, welche mit Gips oder Stärke arbeiten, werden lediglich zur Erstellung von Modellen und Prototypen genutzt. Gefertigte Probekörper aus Metall erfüllen die geometrischen Anforderungen im Regelfall nicht, da der Prozess noch wenig erforscht ist. Die Verarbeitung von Sand zur Erstellung von Formen für den Metallguss ist etabliert. Nachteilig sind hier jedoch Treppenstufeneffekte in der Form. Materialien für das 3D-Drucken müssen derzeit mangels ausreichender Vorkenntnisse aufwändig qualifiziert werden. Die Möglichkeit, maßgeschneiderte Materialien mit spezifischen Anforderungsprofilen produktindividuell einzusetzen, fehlt gegenwärtig.

Aufgrund des Mangels an normierten Verfahren und Richtwerten zur Kennwertermittlung generativ erstellter Bauteile sind die Informationen bei der Qualitätskontrolle zudem nur bedingt zu vergleichen. Hier soll die Richtlinie VDI 3405 im Kunststoff- und Metallbereich Abhilfe schaffen (VDI 3405 B: 2011). Anforderungen an die Form- und die Maßhaltigkeit entsprechend den Vorgaben des digitalen CAD-Modells (Computer Aided Design, CAD) können nur eingeschränkt erfüllt werden (DANJOU & KÖHLER 2010, MARTHA & KÖHLER 2011). Auch nach erfolgreicher Fertigung macht unter anderem die noch unzureichende Oberflächenqualität oft eine Nacharbeit erforderlich. So sind Oberflächen generativer Bauteile bislang nur mit einer minimalen Rauheit von  $R_z > 30 \mu\text{m}$  herzustellen (YASA & KRUTH 2009, ZÄH & OTT 2009), beim 3D-Drucken liegt der Wert deutlich höher. Beim 3D-Drucken ist die Verarbeitung mehrerer Materialien in einem Bauprozess einfacher als bei strahlschmelzenden Verfahren, da zum einen über den Druckkopf ein zweites Material eingebracht werden kann und die Anlagen zum anderen weniger kompakt gestaltet sind. Somit lassen sich weitere Auftragsysteme integrieren und anforderungsgerechte Bauteile

erstellen (PFEIFER 2006). Da beim 3D-Drucken keine Wärmeenergie eingebracht wird und die Temperaturerhöhung durch exotherme Reaktionen vernachlässigt werden kann, ist keine Wärmeabfuhr über Supportstrukturen notwendig. Die beträchtliche Baugeschwindigkeit (PFEIFER 2006) und die erhebliche Bauraumgröße (DIMITROV ET AL. 2006) führen zu wirtschaftlicher Fertigung und niedrigeren Kosten (WOHLERS 2007).

Da die Auswahl des Materials hauptsächlich binderabhängig ist, können bereits heute sehr unterschiedliche Materialgruppen (Kunststoff, Metall, Sand, Keramik, Lebensmittel) sowie biokompatible Werkstoffe verarbeitet werden. Innerhalb einer Gruppe findet sich jedoch oft nur ein Werkstoff. So ist PMMA aktuell beispielsweise das einzige im pulverbettbasierten 3D-Druckprozess zu verarbeitende Kunststoffmaterial. Wegen des großen Bauraums, der vom Druckkopf lediglich überfahren wird, gibt es theoretisch vielfältige Möglichkeiten, Auftragsmodule für weitere Materialien zu betreiben (CANNY ET AL. 2004). Durch Montage mehrerer parallel arbeitender Druckköpfe kann das Baufeld mit im Extremfall nur einer Bahn überfahren werden, was zusätzlich zu den relativ großen Schichtstärken von  $150\ \mu\text{m}$  erheblich zur hohen Baugeschwindigkeit beiträgt. Somit ergeben sich in solchen Fällen relativ niedrige Kosten, verglichen mit den Strahlschmelzprozessen.

## 2.3 Chemische Reaktionen und Materialsysteme

### 2.3.1 Theorie der Kunststoffe

Der Begriff *Kunststoffe* geht auf ESCALES (1911) zurück, der unter dem Titel „Kunststoffe“ 1911 das erste Mal eine Zeitschrift veröffentlichte, welche sich mit der „Erzeugung und Verwendung veredelter oder chemisch hergestellter Stoffe aus der organischen Chemie“ befasst und welche in der deutschen Kunststoffindustrie noch heute eine führende Rolle spielt. Kunststoffe werden mit Hilfe chemischer Reaktionen (Synthesen) hergestellt. Im chemischen Aufbau stehen dabei Kohlenstoffatome im Vordergrund (organische Verbindungen) (GRELLMANN & SEIDLER 2005). Die Kohlenstoffatome bilden die Grundstruktur der Monomere, welche durch Polymerisation zu langkettigen Makromolekülen, den Polymeren, verbunden werden (KAISER 2007). Kunststoffe bestehen dabei zwar im Wesentlichen aus Makromolekülen, jedoch sind weitere Komponenten wie Additive oder Füllstoffe relevant. Diese Zusatzstoffe werden gezielt eingebracht, um die Eigenschaften des Werkstoffs während der Herstellung, der Verarbeitung oder der späteren Nutzung gezielt modifizieren zu können.

Kunststoffe können nach BAUR ET AL. (2007) bezüglich ihrer thermisch-mechanischen Eigenschaften unterteilt werden in:

- Thermoplaste
- Elastomere
- Duroplaste

**Thermoplaste** zeichnen sich dadurch aus, dass sie unter Wärmeeinwirkung erweichen und dann nahezu beliebig verformbar sind. Die Schmelze verfestigt sich beim Abkühlen wieder. Theoretisch ist dieser Vorgang beliebig oft wiederholbar, ohne dass bleibende Schäden am Material auftreten. Der Kettenabstand der Molekülreihen wird durch sperrige Seitengruppen oder verzweigte Ketten vergrößert, wodurch bei manchen Thermoplasten wie beispielsweise Polymethylmethacrylat (PMMA) eine Transparenz resultiert. Sind die Thermoplaste sperrig oder ungleichmäßig aufgebaut, folgt daraus eine ungeordnete Erstarrung in einem breiten Temperaturbereich. Dieser Zustand wird *amorph* genannt. Teilkristalline Kunststoffe sind dagegen in einigen Bereichen geordnet, was wegen der bei Thermoplasten gegeneinander verschiebbaren Makromolekülketten möglich ist. Die Strukturen solcher Phasen sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

**Elastomere** bestehen aus nur lose verknüpften Hauptvalenzketten (DOMININGHAUS ET AL. 2005), woraus eine gewisse Elastizität schon bei Raumtemperatur resultiert. Diese Gruppe der Polymere ist amorph, kann nicht geschmolzen werden und ist nur begrenzt löslich. Eine Quellung, also eine Volumenausdehnung durch Wasseraufnahme, ist jedoch möglich.

**Duroplaste** sind bei Raumtemperatur hart und bestehen in großen Teilen aus nur einem Molekül, welches amorph und räumlich eng vernetzt ist. Die Formgebung muss daher vor der Bildung dieses Netzwerkes (Aushärtung) stattfinden. Duroplaste haben oft eine hohe chemische und thermische Widerstandsfähigkeit. Die Epoxidharze, welche bei der Infiltration von 3D-gedruckten Bauteilen eine entscheidende Rolle spielen, gehören zu dieser Gruppe.

Die beschriebenen Eigenschaften sind für die Wahl der Grundwerkstoffe relevant. Beispielsweise ist ein Werkstoff, der quillt, gut geeignet, um ihn im 3D-Druckprozess zu verarbeiten. Die Schmelzbarkeit ist dagegen irrelevant. Im nun folgenden Abschnitt werden die Grundlagen der Reaktionen zur Herstellung von Kunststoffen erläutert.

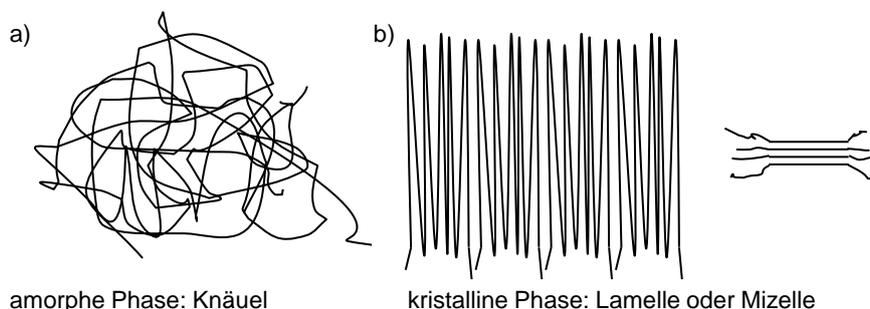


Abbildung 2.4: Amorphe (a) und kristalline (b) Phase von Polymeren und deren Strukturen nach BAUR ET AL. (2007)

### 2.3.2 Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition

*Polymerisation* wird das Verbinden von Monomeren zu Makromolekülen, den Polymeren, genannt. Dieser Vorgang ist durch das Bindungsvermögen des Kohlenstoffs möglich (KAISER 2007). Der Vorgang einer Kettenpolymerisation ist in Abbildung 2.5 für die Reaktion von Ethylen zu Polyethylen dargestellt. Unter der Zugabe von Wärme, energiereicher Strahlung

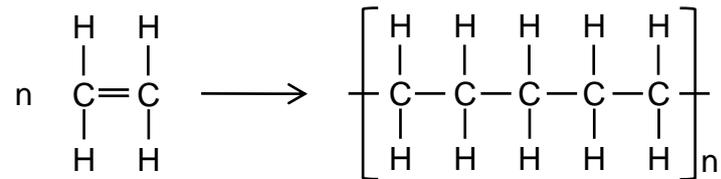


Abbildung 2.5: Polymerisation von Ethylen zu Polyethylen;  
mit Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C) und Polymerisationsgrad (n)

oder Initiatoren beziehungsweise Katalysatoren werden die Doppelbindungen des Ethylens gespalten und es entstehen Bindungen zwischen den Monomeren zu Polyethylen. Die Polymerisation ist eine exotherme Reaktion, bei der oft eine große Volumenminderung (Schwund) durch Dichteänderung des entstehenden Materials auftritt. Der Schwund bei der Herstellung von PMMA beträgt bis zu 25 % (BAUR ET AL. 2007). Die Synthese von Kunststoffen lässt sich in vier Stufen unterteilen, welche nacheinander ablaufen:

- Kettenstart/Primärreaktion
- Kettenwachstum
- Kettenübertragung
- Kettenabbruch/Termination

Die Reaktionen werden durch Initiatoren, welche thermischer oder chemischer Art sein können, aktiviert. Katalysatoren beschleunigen den Reaktionsverlauf.

Es gibt drei Arten der Polymerisation:

- Kettenpolymerisation (gelegentlich auch Polymerisation genannt)
- Polyaddition
- Polykondensation

Bei der **Kettenpolymerisation** handelt es sich um eine Additionsreaktion mit Aneinanderreihung chemisch gleichartiger Monomere mit mindestens zwei Verknüpfungsstellen wie bei der Herstellung von Polyethylen. Der Grundaufbau der Moleküle ändert sich bis auf die Aufhebung der Doppelbindung nicht. Zu den unterschiedlichen Arten der Kettenp-

olymerisation gehört unter anderem die radikalische Kettenpolymerisation zur Herstellung von PMMA (FRANCK 2000).

Die **Polyaddition** ist ebenfalls eine Additionsreaktion, bei der mindestens bifunktionelle Gruppen reagieren. Es entsteht eine neue Elektronenpaarbindung zwischen beiden Molekülen. Anschließend wandert von einer Gruppe ein Wasserstoffatom an eine der Doppelbindungen der anderen. Die Verbindungen werden engmaschiger, je mehr polyfunktionelle Reaktionspartner vorhanden sind. Es handelt sich um eine Stufenreaktion, durch die beispielsweise Epoxidharze hergestellt werden (HEINE 1998). Abbildung 2.6 zeigt die Polyaddition beispielhaft anhand der Reaktion eines Epoxids mit einem Amin.

Im nun folgenden Abschnitt werden einige Charakteristika für im Rahmen dieser Arbeit relevante Materialien angegeben.

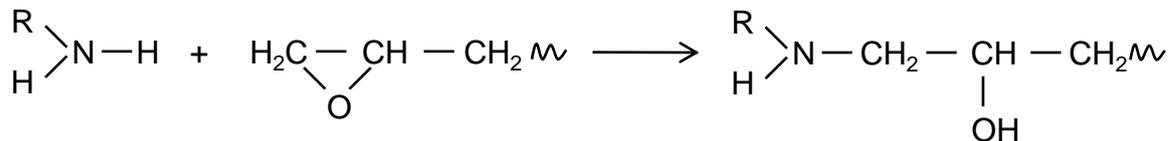


Abbildung 2.6: Polyadditionsreaktion eines Epoxids mit einem monofunktionellen Amin; mit Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und organischem Rest (R)

Die **Polykondensation** ist eine Subtraktionsreaktion, welche in Abbildung 2.7 beispielhaft anhand der Kondensationsreaktion von Essigsäure und Ethylacetat dargestellt ist. Unter Abscheidung von Nebenprodukten wie beispielsweise Wasser, Alkohol oder Ammoniak reagieren Gruppen von Verbindungen miteinander. Auch diese Gleichgewichtsreaktion findet in Stufen, deren Schritte unabhängig voneinander sind, statt. Unter gewissen Bedingungen können auch gestoppte Reaktionen wieder gestartet werden und auf diese Weise verschiedene Vorkondensate gemischt oder Füllstoffe beigemischt werden. Der Thermoplast Polyamid wird beispielsweise in einer Polykondensationsreaktion hergestellt (DOMININGHAUS ET AL. 2005).

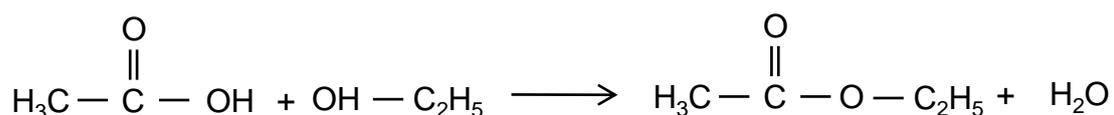


Abbildung 2.7: Kondensationsreaktion von Essigsäure und Ethylalkohol zu Ethylacetat; mit Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O)

### 2.3.3 Relevante Kunststoffe

Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere Materialien auf Basis von Polyamid und Polymethylmethacrylat untersucht, weshalb der Fokus in den folgenden Abschnitten auf diesen liegt. Polymethylmethacrylat wird aktuell im 3D-Drucken verarbeitet, während Polyamid der am weitesten verbreitete Kunststoff für das Lasersintern ist. Wegen der hohen Festigkeit des so verarbeiteten Polyamids ist es wünschenswert, diesen auch für das 3D-Drucken zu qualifizieren.

#### Polyamid

Polyamid (PA) ist ein teilkristalliner Kunststoff. Dieser Thermoplast besteht aus stickstoffhaltigen Amidgruppen, welche durch aliphatische Grundbausteine, also nicht-aromatische Kohlenstoffverbindungen, miteinander kombiniert werden, und hat eine Dichte von 1,101 bis 1,143  $\frac{g}{cm^3}$  (BAUR ET AL. 2007). Die Strukturformel der Amidgruppe ist in Abbildung 2.8 a) dargestellt, die des Polymers in Abbildung 2.8 b). PA wird durch



Abbildung 2.8: Strukturformel der Amidbindung (a) und eines aliphatischen Polyamids (b); mit Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und Polymerisationsgrad (n). Je nach Anzahl x der CH<sub>2</sub>-Gruppen ergeben sich unterschiedliche Polyamide.

Kondensations- oder Kettenpolymerisation synthetisiert. Es können zwei verschiedene Grundaufbauten des PA beobachtet werden:

- Aufbau aus der immer gleichen Grundeinheit ( $\omega$ -Aminocapronsäure) zum PA 6-Typ (PA 6, PA 11 und PA 12)
- Aufbau aus zwei verschiedenen Grundeinheiten (Diamin und Dicarbonsäure) zum PA 66-Typ (PA 66, PA 610, PA 612 und PA 46)

Die Zahlen bezeichnen dabei die Anzahl der C-Atome in den Ausgangsstoffen. Dabei entspricht zum Beispiel beim PA 66-Typ die erste 6 der Anzahl der C-Atome im Ausgangsstoff Diamin und die zweite 6 der Anzahl im Ausgangsstoff Dicarbonsäure. Beide Basissubstanzen haben also je sechs Kohlenstoffatome. PA, auch als Nylon bekannt, ist nicht lichtdurchlässig und kann eingefärbt werden. Es ist gegen die meisten Lösungsmittel, Fette, Öle und Wasser beständig. Das Quellverhalten von PA ist bisher für den 3D-Druck nicht ausreichend.

### Polymethylmethacrylat

Polymethylmethacrylat (PMMA) ist ein amorpher Kunststoff. Dieser Thermoplast wird aus dem Monomer Methacrylsäuremethylester (MMA) gewonnen und hat eine Dichte von 1,17 bis 1,20  $\frac{g}{cm^3}$  (BAUR ET AL. 2007). Die Strukturformel ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Er wird durch Polymerisation gebildet und Peroxid ist dabei ein klassischer Initiator.

PMMA, auch als Plexiglas bekannt, ist glasklar, die Lichtdurchlässigkeit beträgt 92 %, es

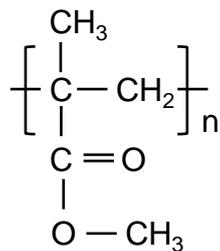


Abbildung 2.9: Strukturformel von Polymethylmethacrylat;  
mit Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Polymerisationsgrad (n)

kann eingefärbt werden. Es ist gegen viele Flüssigkeiten nicht beständig. Unter anderem wegen des Quellverhaltens ist PMMA für den 3D-Druck qualifiziert.

Im nun folgenden Abschnitt werden die relevanten mechanischen, thermischen und physikalischen Eigenschaften von im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Werkstoffen beschrieben. Dabei handelt es sich um Polyamid und Polymethylmethacrylat für den Kunststoffgrundkörper sowie Silber und Graphit als Leiterbahn-Material.

### 2.4 Relevante physikalische Eigenschaften der betrachteten Werkstoffe

#### 2.4.1 Mechanische Eigenschaften

Bauteile, und damit auch das Material, aus dem sie bestehen, werden stets über die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften charakterisiert (DOMININGHAUS ET AL. 2005). Für die Konstruktion sind insbesondere die mechanischen Eigenschaften von Interesse, um Bauteile in geeigneter Weise auslegen zu können. Um die zuvor angesprochene höhere Akzeptanz der generativen Verfahren am Markt zu erreichen, müssen die realisierbaren Bauteileigenschaften reproduzierbar sein und denen von Materialien aus Serienfertigungsverfahren möglichst entsprechen. Im Bereich der generativen Fertigung haben sich Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul (E-Modul) und Bruchdehnung als Parameter etabliert, um Werkstoffe zu vergleichen. Daher soll im Folgenden ein Überblick über Zugversuche sowie die darin zu ermittelnden Größen gegeben werden. In der kunststoffverarbeitenden Industrie liegt den Experimenten meist DIN EN ISO 527 “Bestimmung der Zugeigenschaften - Kunststoffe“ zu Grunde (DIN EN ISO 527 1996). Abbildung 2.10 stellt ein nach dieser Norm gewonnenes Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines spröden 3D-gedruckten Zugstabs aus PolyPor dar, einem kommerziellen 3D-Druck-Werkstoff auf PMMA-Basis der Firma Voxeljet Technology GmbH.

Die relevanten Größen sind die Zugfestigkeit  $\sigma_m$  und die Bruchspannung  $\sigma_B$  sowie die zugehörigen Dehnungen  $\epsilon_B$  und  $\epsilon_m$ . Dehnung wird hierbei definiert als Längenänderung  $\Delta l$  gegenüber der Ausgangslänge  $l_0$ :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.1)$$

Aus den Spannungen und zugehörigen Dehnungen lässt sich des Weiteren der E-Modul aus dem Zugversuch  $E_t$  berechnen. Dieser wird für einen linear-elastischen Werkstoff als Steigung der Hookeschen Gerade angegeben.

$$E_t = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (2.2)$$

Für Materialien mit nichtlinearem Spannungs-Dehnungs-Verlauf kann der Tangentenmodul als Steigungsmaß der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve im Punkt  $\sigma = 0$  angenommen werden. Die Zugfestigkeit entspricht der maximalen Spannung  $\sigma_m$ , mit der eine Probe bis zum Bruch belastet werden kann. Analog dazu gehört die Bruchdehnung zur beim Bruch gemessenen maximalen Dehnung (DOMININGHAUS ET AL. 2005).

PMMA ist ein spröder Werkstoff mit hoher Festigkeit und Oberflächenhärte sowie großem Elastizitätsmodul. PA zeichnet sich durch hohe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit aus. Der folgenden Tabelle 2.3 sind die mechanischen Eigenschaften von spritzgegossenem PA 6, PA 12 und PMMA sowie 3D-gedrucktem PolyPor zu entnehmen.

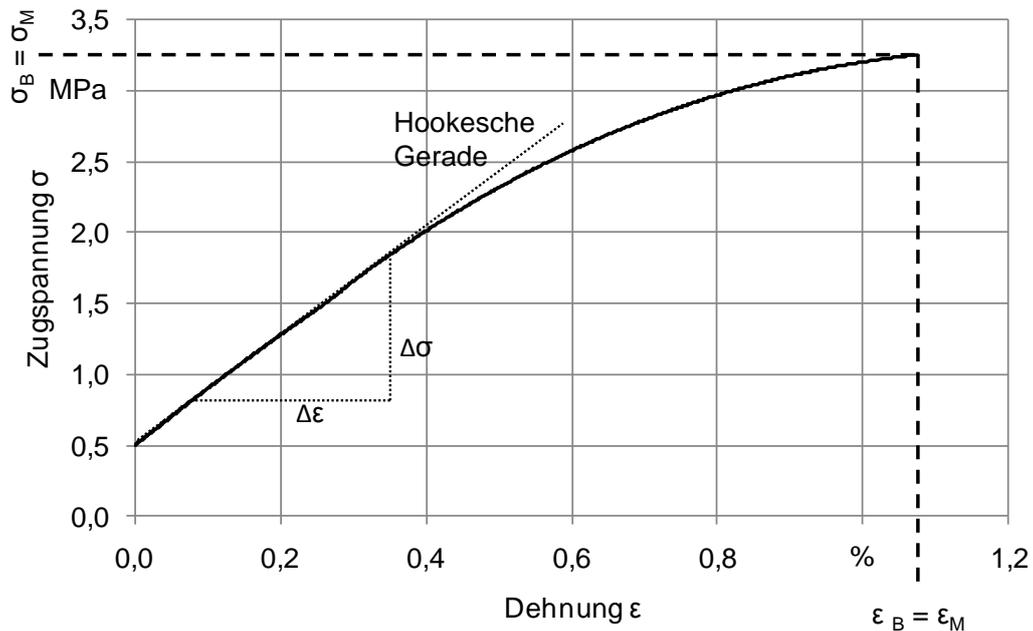


Abbildung 2.10: Beispielhaftes Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines 3D-gedruckten Zugstabs aus PolyPor nach DIN EN ISO 527 (1996); mit Zugfestigkeit  $\sigma_m$ , Bruchspannung  $\sigma_B$  sowie den zugehörigen Dehnungen  $\epsilon_B$  und  $\epsilon_m$

| Parameter                 | Abk.         | Einheit          | PA 6      | PA 12   | PMMA        | PolyPor    |
|---------------------------|--------------|------------------|-----------|---------|-------------|------------|
| Zugfestigkeit             | $\sigma_m$   | MPa              | 70 - 85   | 56 - 65 | 50 - 80     | bis zu 3,2 |
| Dehnung bei Zugfestigkeit | $\epsilon_m$ | %                | 200 - 300 | 300     | 2 - 10      | bis zu 1,1 |
| E-Modul (Zugversuch)      | $E_t$        | MPa              | 1400      | 1600    | 1600 - 3600 | bis zu 500 |
| Dichte                    | $\rho_1$     | $\frac{g}{cm^3}$ | 1,13      | 1,02    | 1,17 - 1,20 | etwa 0,77  |
| Kugeldruckhärte (30 s)    | H            | $\frac{N}{mm^2}$ | 56 - 72   | 80 - 95 | 40 - 125    | -          |

Tabelle 2.3: Mechanische Eigenschaften verschiedener Polymere nach BAUR ET AL. (2007), DOMINGHAUS ET AL. (2005)

Der aktuell kommerziell verfügbare 3D-Druck-Werkstoff auf PMMA-Basis der Firma Voxeljet Technology GmbH wird durch radikalische Polymerisation der Monomere MMA verfestigt. MMA wird dabei als Fluid über den Druckkopf zugeführt, während das Pulver als PMMA-Perlpolymerisat vorliegt. Dabei kann ein Binder (MMA) nur ein Pulver (PMMA) bearbeiten. Die angegebenen Daten beziehen sich auf Material, welches 24 Stunden im Pulverbett gelagert und anschließend 4 Stunden bei 40 °C im Ofen getrocknet wurde. Zur

Steigerung der Festigkeit und Minimierung der Porosität kommen im Allgemeinen Infiltrate wie Epoxidharz, Wachs oder Polyurethane (PU) zum Einsatz. Die Zugfestigkeit kann so auf bis zu 25 MPa gesteigert werden. Wegen des großen Aufwands für die Infiltration ist dies jedoch kein probates Mittel, um den Bereich der Fertigung von einzusetzenden Bauteilen (Rapid Manufacturing) zu bedienen.

### 2.4.2 Thermische Eigenschaften

Thermoplastische Kunststoffe werden bei ausreichender Wärmezufuhr plastisch verformbar oder schmelzflüssig, wobei sich diese Aufheiz- und Abkühlzyklen theoretisch beliebig oft wiederholen lassen. Das Verhalten amorpher und teilkristalliner Thermoplaste unterscheidet sich jedoch. Letztere (beispielsweise Polyamide) besitzen neben der Glasübergangstemperatur  $T_g$  auch einen Kristallitschmelztemperaturbereich  $T_s$ , während amorphe Thermoplaste (beispielsweise PMMA) diesen nicht aufweisen. Die relevanten Temperaturen von PA 6, PA 12 und PMMA können der Tabelle 2.4 entnommen werden.

Die Glasübergangstemperatur  $T_g$  bezeichnet die Temperatur, bei der energieelastisches Verhalten (Glaszustand) in entropieelastisches (quasi-gummi-elastisch) übergeht (DOMININGHAUS ET AL. 2005). Amorphe Thermoplaste werden im Allgemeinen unterhalb der Glasübergangstemperatur angewendet. Der Kristallitschmelztemperaturbereich  $T_s$  ist die Temperatur, bei der der Werkstoff vom festen in den flüssigen Zustand übergeht. Teilkristalline Kunststoffe können auch oberhalb der Glasübergangs- und bis in die Nähe der Schmelztemperatur angewendet werden. Die Wärmeleitfähigkeit ist für den 3D-Druckprozess irrelevant, da keine Wärmeenergie eingebracht wird und die Temperaturerhöhung durch exotherme Reaktionen vernachlässigt werden kann.

| Parameter                            | Abk.     | Einheit  | PA 6   | PA 12   | PMMA |
|--------------------------------------|----------|----------|--------|---------|------|
| Glasübergangstemperatur              | $T_g$    | °C       | 50-60* | 37*     | 110  |
| Kristallitschmelztemperaturbereich   | $T_s$    | °C       | 222    | 178     | -    |
| Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient | $\alpha$ | $K^{-1}$ | 70-100 | 100-120 | 85   |

Tabelle 2.4: Thermische Eigenschaften verschiedener Polymere nach BAUR ET AL. (2007), DOMININGHAUS ET AL. (2005)

*\*Die Glasübergangstemperatur sinkt bei zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt stark ab.*

### 2.4.3 Elektrische Eigenschaften

Die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$ , auch Konduktivität genannt, ist die Fähigkeit eines Stoffes, elektrischen Strom zu leiten. Sie ist als die Proportionalitätskonstante zwischen der Stromdichte  $\vec{j}$  und der elektrischen Feldstärke  $\vec{F}$  (FISCHER & LINSE 2009) definiert:

$$\vec{j} = \kappa \cdot \vec{F} \quad (2.3)$$

Die elektrische Leitfähigkeit entspricht dem spezifischen Leitwert und ist damit der Kehrwert des spezifischen Widerstands  $\rho_2$ :

$$\kappa = \frac{1}{\rho_2} \quad (2.4)$$

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit ist nicht direkt möglich. Stattdessen wird der spezifische Widerstand mit Hilfe der Vierpunktmessung nach DIN IEC 468 und DIN 5567 bestimmt (DIN IEC 468 1981, DIN 5567 2009) und der Kehrwert nach Formel 2.4 berechnet. Elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand von Silber und Graphit sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

Kunststoffe dienen oft als Isolatoren, während Silber ein metallischer Werkstoff ist und nach BERGMANN (2008) die höchste elektrische und thermische Leitfähigkeit dieser Gruppe hat und eine geringe Neigung zu Oxidation aufweist, da es zur Gruppe der Edelmetalle gehört (HORNBÖGEN & WARLIMONT 2006). Dünne Oxidschichten auf der Oberfläche haben allerdings bereits eine isolierende Wirkung (IVERS-TIFFÉE & VON MÜNCH 2007).

| Parameter                 | Abk.     | Einheit    | Silber                | Graphit        |
|---------------------------|----------|------------|-----------------------|----------------|
| Elektrische Leitfähigkeit | $\kappa$ | S/m        | $62 \cdot 10^6$       | $3 \cdot 10^6$ |
| Spezifischer Widerstand   | $\rho_2$ | $\Omega/m$ | $1,587 \cdot 10^{-2}$ | 8              |

Tabelle 2.5: Elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand von Silber und Graphit nach HAYNES & LIDE (2010), HOFMANN ET AL. (2007)

Graphit ist eine der natürlichen Erscheinungsformen des chemischen Elements Kohlenstoff. Im Gebiet der Elektrotechnik wird er zwischen Leitern und Halbleitern eingeordnet. Diese Eigenschaft ist auf seinen atomaren Aufbau und die damit einhergehenden anisotropen Materialeigenschaften zurückzuführen. Der Terminus *Anisotropie* bezeichnet die Abhängigkeit maßgeblicher Eigenschaften von der Raumrichtung. Einkristalliner Graphit hat dabei die beste elektrische Leitfähigkeit, kommt jedoch in der Natur kaum vor. Der variierende elektrische Widerstand in den drei Raumrichtungen kann durch Polykristallinität und Gitterfehler erklärt werden (REYNOLDS 1968).

### 2.5 Simulation

#### 2.5.1 Allgemeines

Durch die Anwendung digitaler Werkzeuge können heute industrielle Güter effizient hergestellt werden. Sie unterstützen in vielen Unternehmen die Konstruktion, die Entwicklung und die Produktion in erheblichem Maße (GAUSEMEIER & BERGER 2004). Die Simulation des Materials, des Bauteils und des Prozesses ist dabei von großem Interesse. Es ist üblich, Bauteile im Produktentwicklungsprozess (PEP) mit Hilfe numerischer Verfahren zu untersuchen und auszulegen (MÖHLER ET AL. 1999). Hierfür wird oft die Finite-Elemente-Methode (FEM) angewendet, da so beispielsweise Verformungen und Spannungen infolge von äußeren oder inneren Lasten simuliert werden können. Durch diese Methode können Zeit und Kosten erheblich reduziert werden, da auf aufwändige Versuche weitgehend verzichtet werden kann (MÜLLER & GROTH 2002). Wurde die Methode ursprünglich zur Lösung von Festkörperproblemen entwickelt, bietet sich heute eine große Fülle von Anwendungsgebieten, wie im Bereich der nichtlinearen Festigkeitsberechnung, der Wärmeübertragung, der Mehrkörpersimulation, der Strömungslehre, der Fertigungsprozesse und vieler weiterer Festkörperprobleme (KLEIN 2010).

#### 2.5.2 Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweisen Lösung von Differentialgleichungen (GROTH & MÜLLER 2001). Dabei wird eine Struktur (ein Kontinuum) in viele endlich kleine Elemente, die finiten Elemente, geteilt (sog. *meshing*) (FRÖHLICH 2005). Dieser Vorgang ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass der Netzabstand der Elemente mit steigender Komplexität sinken muss. Für jedes Element werden Ansatzfunktionen definiert, welche mit gegebenen Rand-, Anfangs- und Übergangsbedingungen in einem Differentialgleichungssystem berechnet werden können (MÜLLER & GROTH 2002).

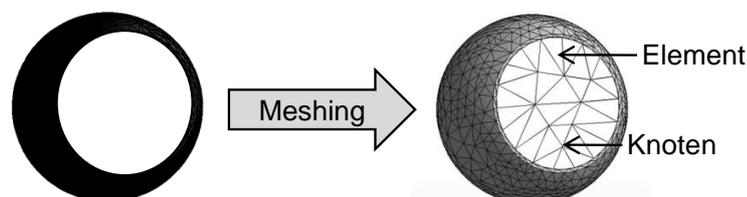


Abbildung 2.11: Umwandlung eines Geometriemodells in ein Finite-Elemente-Modell (sog. meshing)

Nach KLEIN (2010) basieren alle Finite-Elemente-Berechnungen auf einer Grundgleichung des Typs

$$A_m * x_V = y_V, \quad (2.5)$$

wobei  $A_m$  eine Matrix mit  $m$  Zeilen und  $n$  Spalten ist.  $x_V$  ist der Vektor der unbekanntenen Größen,  $y_V$  umfasst in gleicher Form die bekannten Werte. Somit ergibt sich das in Formel 2.6 dargestellte lineare Gleichungssystem mit den Elementen  $a_{ij}$  in der Matrix (im Folgenden Koeffizienten genannt).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Die Lösung der Gleichung ergibt sich somit zu:

$$x_V = A_m^{-1} * y_V \quad (2.7)$$

Unter Beachtung der aus der Mathematik bekannten Regeln zur Matrizenrechnung (transponieren, multiplizieren etc.) können so Rechnungen zu finiten Elementen durchgeführt werden. Systeme mit Freiheitsgraden bis etwa 500.000 lassen sich effizient mit direkten Verfahren wie dem Gaußschen Eliminationsverfahren lösen (GROTH & MÜLLER 2001). Sind es mehr als 500.000 Freiheitsgrade, wird meist auf die iterative Lösung zurückgegriffen (bspw. Jacobi- oder Gauß-Seidel-Verfahren). Bei vorliegenden nichtlinearen Differentialgleichungen und daraus resultierenden Gleichungssystemen müssen zur Lösung numerische Näherungsverfahren wie das Newton-Verfahren angewendet werden (BRAESS 2007). Mittlerweile gibt es eine große Anzahl kommerzieller Computerprogramme, die nach der Finite-Elemente-Methode arbeiten. Hierzu gehört beispielsweise das kommerzielle Simulationssystem ANSYS, welches im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet.

Zur Simulation unterschiedlicher Eigenschaften zu bestimmten Zeiten an einem Bauteil werden oft Temperaturfelder als fiktive Last von außen aufgebracht. Diese sind skalarwertige Funktionen mit einem zugeordneten Wertebereich. So kann jedem Punkt in einem definierten Raum eine spezifische Temperatur zugewiesen werden. Damit einher gehen temperaturabhängige Eigenschaften eines Materials an gleichen Stellen im Raum (beispielsweise Festigkeit). Die geläufigste Darstellung für Temperaturfelder ist ein Falschfarnebild, bei dem jeder Temperatur eine Farbe zugewiesen wird (GROTH & MÜLLER 2001).

### 2.5.3 Multiskalensimulation

Mit Hilfe der FEM können unter anderem Simulationen auf multiplen Skalen, auch Mikro-Makro-Simulation genannt, durchgeführt werden (BRAMBLE ET AL. 2003). Diese Modellierungen werden im Allgemeinen in der Werkstoffkonzeptionierung eingesetzt und bilden die Grundlage einer mathematischen Beschreibung des Materialverhaltens auf Basis von Experimenten zur Analyse der Werkstoffstruktur (EBERHARDSTEINER ET AL. 2009). Der Multiskalenansatz findet Anwendung, wenn ein Material sich in verschiedenen Größenskalen auf gleichartige Elemente in der Nano-, Mikro- oder Makroebene herunterbrechen lässt (hierarchischer Aufbau). Das heißt, theoretische Informationen werden auf benachbarten Größen- und Ortsskalen ausgetauscht oder verknüpft. EBERHARDSTEINER ET AL. (2010) nennen als Anwendungsbeispiel für die Multiskalensimulation die Berechnung von Spanplatten. Jede Lage wird nach ZAOUÏ (2002) modelliert. Danach werden nacheinander Homogenisierungsschritte durchgeführt, um die in diesem Fall drei hierarchischen Ebenen des Modells zu verbinden (vgl. Abbildung 2.12).

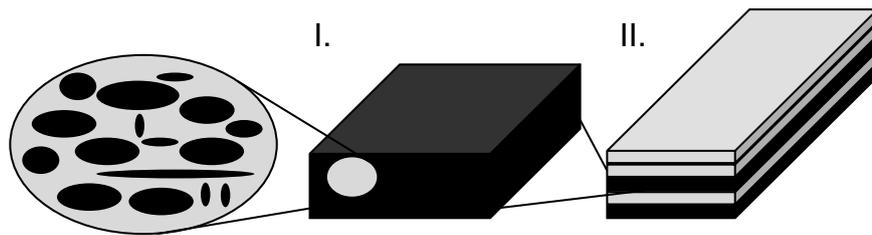


Abbildung 2.12: Homogenisierung mit I. und II. Homogenisierungsschritt im Sinne des Mapping von Eigenschaften über Skalen hinweg nach EBERHARDSTEINER ET AL. (2010)

Homogenisierung ist in diesem Fall die Schaffung einer möglichst gleichmäßigen Struktur des virtuellen Modells (MORI 2001). Die auf den verschiedenen Skalen aufgebauten Modelle dienen unterschiedlichen Zielen. Nach EBERHARDSTEINER ET AL. (2009) lassen sie sich teilen in

- **mikroskopische Modelle**, um ein Verständnis der physikalischen Grundlagen des makroskopischen Materialverhaltens zu bekommen, und
- **makroskopische Modelle**, beispielsweise zur numerischen Strukturanalyse.

Diese Art der Simulation lässt sich somit nutzen, um Materialdesign ohne aufwändige Experimente durchführen zu können und so schneller und günstiger einen optimalen Werkstoff entwerfen zu können (MORI 1986).

## 2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen der generativen Fertigungsverfahren beleuchtet, wobei das pulverbettbasierte 3D-Drucken im Fokus stand. Darüber hinaus wurden chemische Reaktionen und Materialsysteme erläutert und die relevanten physikalischen, chemischen und thermischen Eigenschaften von Polyamid, Polymethylmethacrylat, PolyPor, Silber und Graphit erläutert. Abschließend wurde das Prinzip der Finite-Elemente-Methode und der Multiskalenansatz in der Simulation aufgezeigt. Auf dieser Basis wird im folgenden Kapitel der Stand der Wissenschaft und Technik dargelegt und es werden die in den Kapiteln 4 bis 7 beschriebenen Arbeiten vorbereitet.



# 3 Stand der Wissenschaft und Technik

## 3.1 Vorgehen im Kapitel

Basierend auf den Grundlagen zu generativen Fertigungsverfahren, insbesondere zum pulverbettbasierten 3D-Drucken, zu Materialsystemen und zur Simulation gemäß dem vorangegangenen Kapitel werden Forschungen im Bereich der Material- und Prozessentwicklung sowie der Simulation generativer Fertigungsverfahren dargestellt. Dafür werden zuerst Anlagentechnik und Prozessparameter erörtert und anschließend Methoden zur Materialqualifizierung sowie aktuell im 3D-Drucken zu verarbeitende Mono- und Multi-materialsysteme diskutiert. Abschließend werden Simulationsansätze zu Simulation von Schichtbauverfahren beleuchtet. Wann immer es Vorarbeiten zu Prozessen des 3D-Druckens gibt, werden diese aufgezeigt.

## 3.2 3D-Druckprozess

### 3.2.1 Anlagentechnik für das pulverbettbasierte 3D-Drucken

Die Anlagentechnik im Bereich des pulverbettbasierten 3D-Druckens wird in zwei Richtungen vorangetrieben:

- Systeme für die heimische Anwendung (sog. *Desktop-Anlagen*)
- Systeme für den industriellen Einsatz

Der Markt für Desktop-Anwendungen wird über kostengünstige kommerzielle Systeme wie Fab@Home oder RepRap bedient, welche entweder als ganzes System (Fab@Home, A1 Technologies) oder als Bausatz (RepRap, RapMan) verkauft werden (LEWIS 2008). Alle diese Systeme wenden ein Verfahren ähnlich dem FDM an und stellen keine industriell einsetzbaren Bauteile her, da hierfür beispielsweise Genauigkeit und Festigkeit nicht ausreichend sind. Gleiches gilt für das Produkt der Firma Desktop Factory, welche einen Drucker für den Home-Markt verkauft (LEWIS 2008). Im Gegensatz dazu stehen die Technologien von Z-Corporation oder Voxeljet Technology GmbH, welche ein klassisches Pulverbettverfahren nutzen, so können Bauteile in der Größenordnung bis zu  $8\text{ m}^3$  hergestellt werden (EDERER 2011). Die Entwicklung im Bereich der Desktop-Anwendungen ist vielfältiger, während die Konzipierung industrieller 3D-Drucker von wenigen Unternehmen vorangetrieben wird.

Bei der industriellen Fertigung von Bauteilen durch den 3D-Druck steht neben der Material- auch die Prozessentwicklung im Mittelpunkt. Hier fokussiert sich PELZER (2005)

auf die Auslegung von besiedelbaren Knochenimplantaten und deren Herstellung mittels 3D-Druckverfahren. Dafür entwarf er einen 3D-Druckprozess, unter anderem indem er die Daten der Baujobvorbereitung zur Erstellung von Knochenstrukturen weiterentwickelte.

KARAPATIS (2002) erläutert einen Ansatz, bei dem er den Lasersinterprozess in einzelne Teilschritte zerlegte und diese einzeln bewertete. Dabei untersuchte er die folgenden Unterprozesse:

- Schichtvorbereitung
- Energieübertragung (Strahl zu Pulver sowie photonischer Energie in Wärme)
- Verfestigung

Durch detaillierte Analyse der einzelnen Schritte gelang ihm eine detaillierte Beschreibung des Prozesses. Kommerzielle Anlagen zur Verarbeitung unterschiedlicher Materialien, um funktionsintegrierte Bauteile in einem Prozess herzustellen, sind aktuell nicht am Markt verfügbar.

#### 3.2.2 Restriktionen für das pulverbettbasierte 3D-Drucken

Trotz des hohen Zukunftspotentials des 3D-Druckens verbleiben nach PELZER (2005) und DIMITROV ET AL. (2006) einige Restriktionen. Eine Herausforderung des 3D-Kunststoffdruckprozesses ist das unvollständige Verbinden beziehungsweise auch die reine Adhäsion der Pulverpartikel untereinander. Daraus resultiert eine hohe Porosität, da die Pulverzwischenräume nicht gefüllt werden. Es ergeben sich also schlechte mechanische Eigenschaften der gedruckten Bauteile. Diesem soll durch dem Prozess nachgelagerte Wärmebehandlung und Infiltration mit Wachs oder Epoxidharz begegnet werden. Für die industrielle Akzeptanz und weitreichende Anwendung des Verfahrens stellt ein mehrstufiger Prozess jedoch oft eine Restriktion dar, da zusätzliche Kosten für weitere Anlagen (z. B. Ofen) und Arbeitszeit anfallen. Die Fertigung im Pulverbett und die vergleichsweise hohen Schichtstärken wirken sich wie bei allen generativen Verfahren negativ auf die Oberflächenqualität aus (Treppenstufeneffekt). EDERER (2008) konstatiert bereits eine Verbesserung der Oberflächenqualität durch höhere Auflösungen in allen drei Raumrichtungen, gleichzeitig erwartete er eine weitere Steigerung der Genauigkeit in den nächsten Jahren durch verbesserte Druckköpfe und geringere oder angepasste Schichtstärken. Die Maßhaltigkeit wird aktuell auch durch den eintretenden Polymerisationsschwund beeinflusst.

Von den praktischen und vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in der Medizintechnik wird aktuell jedoch nur in der Wissenschaft, bspw. für bioresorbierbare Werkstoffe, Gebrauch gemacht. ZEILHOFER (1998) stellt die Anwendung der generativen Techniken in der Operationsplanung bei Gesichtsfehlbildungen und -defekten dar. Dabei kamen die Verfahren Stereolithographie, Lasersintern und Fused Deposition Modeling zum Einsatz. Die Operationsergebnisse der klinischen Studien waren funktionell und ästhetisch besser als

nach konventioneller Planung. Die Berücksichtigung anatomischer Strukturen durch additiv gebaute Modelle im Körper ermöglichte eine minimalinvasive Therapie durch Kenntnis der Zugangswege. Der breite medizinische Einsatz wird jedoch durch Schwierigkeiten bei der 3D-Datenerzeugung sowie mangelnde Qualität und Genauigkeit der erzeugten Bauteile gehemmt. Auch die hohen entstehenden Kosten sind ein Hindernis für die Serienfertigung kundenindividueller medizintechnischer Produkte.

## 3.3 Materialien für generative Fertigungsverfahren

### 3.3.1 Methoden zur Materialqualifizierung

Da die eingeschränkte Materialauswahl aktuell eine der größten Restriktionen für eine breite industrielle Anwendung der generativen Fertigungsverfahren, auch des 3D-Druckens, ist, gibt es in diesem Bereich der Forschung zahlreiche Beiträge. Es werden bereits verschiedene Ansätze zur Materialqualifizierung verfolgt. Die meisten Methoden beschränken sich jedoch auf die klassische Werkstoffprüfung. Exemplarisch werden im Rahmen dieser Arbeit einige Forschungsergebnisse zu methodischen Ansätzen aus dem Strahlschmelzen (Metall) und zum Lasersintern (Kunststoff) aufgezeigt. Der Fokus liegt jedoch auf der Qualifizierung von Werkstoffen für das pulverbettbasierte 3D-Drucken.

ZHANG (2004) untersucht die Qualifizierung von Aluminiumlegierungen (AlSi25, AlSi10Mg, AlMg3, AlMgSi0.5) für das Strahlschmelzen zur Erweiterung des Werkstoffspektrums. Da die Einführung neuer Materialsysteme ohne tiefgreifendes Prozessverständnis kaum möglich ist, widmete sie der Erforschung des Strahlschmelzens große Aufmerksamkeit. Sie analysierte Wärmeleitung und Strahlpropagation im Pulver in Modellen, woraus sie unter anderem ableitete, dass der Verbund zwischen Schichten nicht durch gleichmäßiges Aufschmelzen von Pulver und Substrat geschieht, sondern Letzteres auch indirekt durch die Schmelze erwärmt wird. Die Übertragung des Prozesses auf technische Anlagen fand durch Anpassung von Pulverfraktionierung, Schichtdicke und Auftragsmechanismus sowie geeignete Wahl der Prozessparameter statt. Daneben war die Modellierung des Prozesses wesentlicher Teil der Methode zur Qualifizierung von Aluminiumlegierungen. Auch eine Methode für die Qualifizierung von Werkstoffen für das pulverbettbasierte 3D-Drucken kann die Bausteine *experimentelle Untersuchungen* und *Simulation* enthalten.

Durch den Beitrag von GLÄSER (2010) zum Lasersintern von Wolframkarbid-Kobalt (WC-Co) wurde ein weiterer Werkstoff für die generative Fertigung qualifiziert. Es handelt sich bei dem umgesetzten Prozess um ein Flüssigphasensintern, bei dem lediglich die niedrigschmelzende metallische Komponente Kobalt verflüssigt wird, während der Hartstoff Wolframkarbid in der Schmelze des Kobalts gleichmäßig verteilt vorliegt. GLÄSER (2010) stellte ein Prozessmodell auf, um die maximale Dichte bei ausreichender Härte zu erreichen. Er ging dabei auf die prozess-, laserstrahl-, atmosphärischen und werkstoffspezifischen Einflussgrößen ein und leitete daraus die prozess-, material- und bauteilbezogenen Ergeb-

nisgrößen des WC-Co ab. *Atmosphärenspezifisch* heißt, dass der Einfluss unterschiedlicher Schutzgase auf das Bauteilergebnis beurteilt wird.

WIRTZ (2000) beschäftigt sich mit der Qualifizierung des Lasersinterns zur Herstellung von Formschalen aus Zirkonsilikat (Keramik). Neben der Prozessentwicklung liegt sein Fokus auf der ganzheitlichen Betrachtung der Stell- und Störgrößen des Systems. Er ordnete diese den vier Bereichen „Anlage“, „Material“, „Substrat“ und „Bauteil“ zu, wobei Laser und Bauraumabmaße beispielhaft der Anlage zugeordnet waren. WIRTZ (2000) berichtet von einer Reduktion der Fertigungsdauer gegenüber konventionellen Verfahren zur Herstellung von Keramik-Formschalen von bis zu 90 %, stellte jedoch auch fest, dass eine Weiterentwicklung zur Fertigung qualitativ hochwertigerer Oberflächen, beispielsweise durch Anwendung geringerer Pulverkorngrößen, notwendig sein würde. KADDAR & WITT (2010) analysieren den Einfluss von Scanstrategien und -optionen beim Lasersintern vom Kunststoff auf die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffbauteilen.

GODLINSKI (2002) erforscht die Qualifizierung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik für ein kolloidales Formgebungsverfahren, bei dem also Feststoffe in einem Dispersionsmedium vorliegen. Die erzeugten Grünlinge hatten eine dichteste Kugelpackung  $KP$  von 64 % der theoretischen Dichte, was der von 3D-gedruckten Kunststoffbauteilen entspricht. Die dichteste *Kugelpackung* entspricht der geometrischen Anordnung von Kugeln, bei der der größtmögliche Raumfüllungsgrad besteht. Zur Qualifizierung des Werkstoffes setzte GODLINSKI (2002) klassische Methoden der Werkstoffprüfung ein, unter anderem Biegeversuche, Härteprüfungen und Porositätsmessungen.

In Abbildung 3.1 ist die REM-Aufnahme der Bruchfläche eines lasergesinterten Zugstabes aus PP zu sehen. Das Gefüge ergab sich durch die langen Sinterzeiten und weist einen hohen Kristallinitätsgrad auf.

RIETZEL ET AL. (2009) wendeten eine klassische Methode der Werkstoffqualifizierung an, indem sie Anforderungen an Kunststoffpulver für das Lasersintern aufstellten und anschließend das Material entsprechend aufbereiteten. Thermoanalytische Untersuchungen zum Aufschmelz- und Abkühlverhalten bildeten die Grundlage für die Lasersinterversuche. Abschließend folgte zur Bewertung eine klassische Bauteilprüfung mit Zugversuchen.

PFISTER (2005) beschäftigt sich ebenfalls die Pulverherstellung, um innovative Werkstoffe zu erhalten. Diese wurden im Lasersintern verarbeitet und anschließend mechanisch untersucht. ALSCHER (2000) erstellte ein Finite-Elemente-Modell zum isothermen Lasersintern, also zur Verarbeitung im Prozess bei konstanter Temperatur knapp unter der Schmelztemperatur. Auf diese Weise konnten die optimalen Prozessbedingungen für teilkristalline Thermoplaste ermittelt werden und auf der Grundlage der Verschmelzung von Kunststoffpulver mit dem Laserstrahl anforderungsgerechte Werkstoffe entwickelt werden.

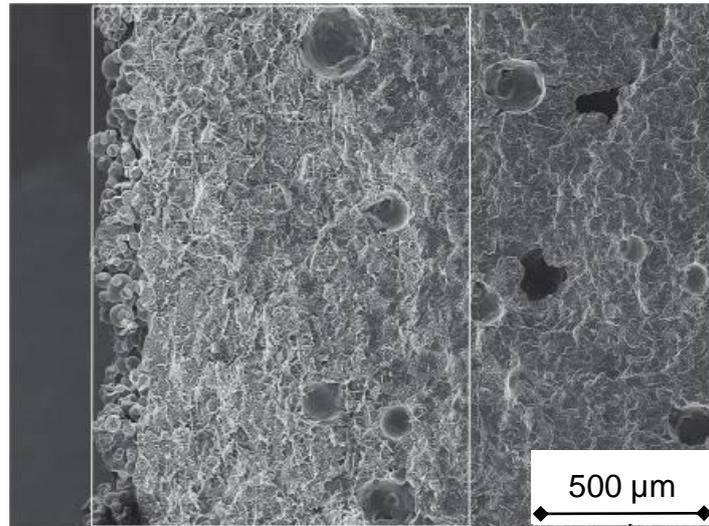


Abbildung 3.1: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines lasergesinterten Zugstabes (PP) nach RIETZEL ET AL. (2009)

Auf Basis der oben genannten Forschungsergebnisse kann die bestehende Modellvorstellung zum Strahlschmelzen und Lasersintern zur Verarbeitung weiterer Materialien ergänzt werden. Die Methoden können für das 3D-Drucken adaptiert werden und um prozessspezifische Anforderungen erweitert werden. Dies wurde beispielsweise von PFEIFER (2006) und PFISTER (2005) umgesetzt, indem neben den Untersuchungen zum Pulver und den klassischen Werkstoffprüfungen Experimente zum Binder und zur Reaktion des Binders mit dem Pulver durchgeführt wurden.

#### 3.3.2 Monomaterialverarbeitung

##### Kunststoffe für das Lasersintern

Es existieren viele wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit der Materialqualifizierung teilkristalliner Thermoplaste für das Lasersintern beschäftigen. Aktuell bestehen werkstoffliche Restriktionen und lediglich Polyetheretherketon (PEEK), Polypropylen (PP) sowie verschiedene Varianten von PA 12 sind kommerziell erhältliche Kunststoffe zur Verarbeitung in diesem Prozess. PP ist zudem erst seit 2011 für das Lasersintern am Markt verfügbar (BACKER ET AL. 2011). Von RIETZEL ET AL. (2009) wurde über die oben genannten Kunststoffe hinaus Polyethylen (PE-HD) verarbeitet und qualifiziert. SCHMIDT ET AL. (2007) konzentrierten sich auf die Verarbeitung von PEEK. Die Arbeit von ALSCHER (2000) behandelt neben verschiedenen PA 12-Werkstoffen mit der Umsetzung von PE-HD, PE-LD, PP, Polybutylenterephthalat (PBT) und PA 6. NÖKEN (1997) beschreibt die Wirkzusammenhänge zwischen der Energieeinbringung und dem Arbeitsergebnis und leitet daraus geeignete Prozessführungsstrategien ab. Ziel war die wiederholgenaue Fertigung hochwertiger Bauteile. Neben einer Systembetrachtung des Lasersinterns wurden die prozessbestimmenden Mechanismen erläutert sowie experimentell untersucht.

Aktuell mit Lasersinterverfahren erreichbare mechanische Eigenschaften verschiedener Kunststoffe sind höchst unterschiedlich. Das meist angewendete Material ist PA2200, ein PA 12 der Firma Evonik. Der E-Modul  $E_t$  liegt im Mittel bei  $1700 \text{ N/mm}^2$  mit einer Bruchspannung  $\sigma_B$  von etwa  $50 \text{ N/mm}^2$  und einer Bruchdehnung  $\epsilon_B$  von 20% (RIETZEL ET AL. 2009). PEEK erreicht eine wesentlich höhere Bruchspannung ( $\sigma_B = 80 \text{ N/mm}^2$ ) bei deutlich reduzierter Bruchdehnung ( $\epsilon_B = 2\%$ ). PP hat einen  $E_t = 1000 \text{ N/mm}^2$  mit  $\epsilon_B = 4\%$ . Die Werte für POM und PE-HD liegen in der gleichen Größenordnung (RIETZEL ET AL. 2009). WITT ET AL. (2010) kamen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Auf Basis der oben genannten Forschungsarbeiten kann belegt werden, dass auch viele teilkristalline Thermoplaste mit Hilfe des Lasersinterns zu verarbeiten sind. Alle Autoren diskutierten den enormen wirtschaftlichen Nutzen durch Erweiterung der Materialpalette in den generativen Verfahren.

#### Werkstoffe für das pulverbettbasierte 3D-Drucken

Ziel der Arbeit von PFISTER (2005) war die Entwicklung neuer Materialsysteme für das 3D-Drucken auf Geräten der Firma Z-Corporation und für das selektive Lasersintern. Untersucht wurden im Bereich des Druckens insbesondere der Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Keramikpulvern und wasserhaltigem Binder sowie der Druckparameter auf die Materialeigenschaften. Das angewendete Pulver basiert auf Polymer-Ionomeren, welche sich mit Hilfe wasserhaltiger Tinte zu 3D-Modellen verbinden. Eine Nachbehandlung durch Infiltration mit Wachs oder Acrylaten war im Gegensatz zu den bisher angewendeten Materialsystemen nicht notwendig. Allerdings konnte eine Infiltration mit Lysinethylesterdiisocyanat bei einem Pulverblend aus Stärke/Cellulose/Dextrose unter Wahrung von Biokompatibilität durchgeführt werden. Als *Blend* werden Mischungen mehrerer Polymere bezeichnet. PFISTER (2005) wendete als Materialsysteme

- Zinkpolycarboxylat-Iomere und
- Glas-Ionomer-Zemente an.

Erstere wurden durch eine chemische Abbindungsreaktion von Zinkoxid/Magnesiumoxid-Keramikpulvern mit Polyacrylsäure gebildet, zweitere wurden aus Calciumaluminiumsilicat-Glas und Polyacrylsäure geformt. Beide wurden unter Variation von Partikelgröße, Abbindezeit, Polyacrylsäuregehalt, Tintenmenge sowie Infiltration untersucht und zeigten bei optimaler Einstellung der Prozessparameter ähnliche mechanische Eigenschaften. Neben diesen waren die Dimensionsstabilität und die Wasserresistenz relevant. Im Bereich des Lasersinterns wurden von PFISTER (2005) Polyamid-12-Nanocomposite eingesetzt.

POHL ET AL. (2001) analysierten den 3D-Druckprozess eines Metalls (Edelstahl 1.4404) und dessen industrielle Anwendungen in der generativen Fertigung, wobei die Materialanforderungen bezogen auf Binder- und Pulvercharakteristik betrachtet wurden. Das erstellte Bauteil war ein Grünling mit hoher Porosität und relativ geringer Festigkeit.

Durch nachgelagertes Sintern und Infiltration konnten diese Eigenschaften jedoch erheblich verbessert werden. Wie beim indirekten Metallasersintern (IMLS) wurde erst der Binder ausgetrieben, bevor die Metallpulver-Partikel gesintert wurden. Gleichzeitig wurde mit Bronze infiltriert und so die Poren verschlossen. Das Verfahren IMLS wurde zu großen Teilen durch das direkte Verfahren Strahlschmelzen ersetzt.

PFEIFER (2006) führte Untersuchungen zur Auswahl und Erprobung geeigneter Binder-materialien für das 3D-Drucken durch, um neue Werkstoffe zur Erstellung verlorener Modelle für den Feinguss zu qualifizieren. Dafür nutzte er beschichtete Pulver, die durch Benetzung mit einer Druckflüssigkeit verfestigt wurden. Damit lag eine reaktive Komponente in der Beschichtung und eine weitere im Binder vor. Von großer Relevanz war hier die Entwicklung einer geeigneten Pulverbeschichtungsanlage unter Berücksichtigung von elektrostatischer Entladung und daraus resultierender Deagglomeration. Als *Deagglomeration* wird das Lösen einer Pulveranhäufung bezeichnet. Neben der Herstellung von Kunststoffbauteilen auf PMMA-Basis wurden auch keramische Proben gedruckt.

Aktuelles Forschungsthema im Bereich des pulverbettbasierten 3D-Druckens ist die Medizintechnik und hier speziell die Qualifizierung biokompatibler Werkstoffe für den Prozess. Die Arbeiten von DROSSE (2008), GÜNTHER (2007), HÄNEL (2009), IBRAHIM (2006), KLARNER (2009), LANDERS (2004), RETSCH (2009), SEITZ (2008) und TAMAS (2008) belegen den Trend des verstärkten Einsatzes additiver Verfahren in der medizintechnischen Forschung.

Die Untersuchungen von SEITZ (2008) konzentrierten sich auf die Rekonstruktion knöcherner Defekte mit synthetischen Knochenersatzmaterialien. Als *Rekonstruktion knöcherner Defekte* wird die Wiederherstellung von defekten, jedoch nicht aufgelösten Strukturen bezeichnet. Neuartige, stabile und resorbierbare Scaffolds, also poröse, temporäre Matrizen als Knochen- oder Gewebestruktur, sollten mit körpereigenen Zellen besiedelt werden und im Körper den defekten Bereich rekonstruieren. Der mineralische Hauptbestandteil Hydroxylapatit (HA) des Knochens wurde in Granulatform mit einer polymerhaltigen Tinte im 3D-Druckprozess zu definiert porösen Strukturen verarbeitet, welche eine ausreichende mechanische Festigkeit für gering belasteten Knochenersatz besaßen. Nach Abschluss weiterer Arbeiten im Labor und in Tierversuchen können solche Implantate voraussichtlich im menschlichen Körper eingesetzt werden.

LANDERS (2004) führt ebenfalls in die Herstellung und Formgebung biokompatibler Materialien für den Einsatz in der regenerativen Medizin ein und konzentrierte sich auf die Dosierung von Pasten für das Tissue Engineering mit Hilfe eines 3D-Druck-ähnlichen Verfahrens. Als *Tissue Engineering* wird die künstliche Herstellung von biologischem Gewebe bezeichnet. Verarbeitet wurden keramische Pasten, Schmelzen thermoplastischer Polymere, Polymerlösungen und Hydrogele (Agar, Gelatine, Collagen, Fibrin). HÄNEL (2009) ermöglichte die Verarbeitung unterschiedlicher Ausprägungen von  $\beta$ -Tricalciumphosphat zur Herstellung von Knochenersatzmaterialien für den 3D-Druck.

Das gleiche Material wendeten auch LOWMUNKONG ET AL. (2009), TAMAS (2008) und KLARNER (2009) zur Erzeugung makroporöser Formkörper an, wobei sich die Arbeiten von KLARNER (2009) auf die Charakterisierung hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, Druckgenauigkeit und Phasenzusammensetzung konzentrierten und einen Sinterprozess an das 3D-Drucken anschlossen. Für die Verfestigung während des Druckvorgangs wurden drei Methoden angewendet:

- Quellung eines polymermodifizierten Tricalciumphosphat-Pulvers mit Wasser als Binder
- Reaktion von Phosphorsäure mit einem Calciumphosphat-Pulver
- Erstellung eines Gemischs aus Tetracalciumphosphat/Calciumhydrogenphosphat/Tri-calciumphosphat und 25%iger Citronensäure als reaktiver Binder

Damit erläuterte er, dass neben der verschiedenen chemischen Zusammensetzung von Pulver und Binder auch unterschiedliche Resultate in Abhängigkeit des Vorlegens im Pulverbett oder im Binder erzielt werden können. Das *Vorlegen* bezeichnet die Einbringung eines Materials in den 3D-Druckprozess, dies kann über den Binder oder das Pulver umgesetzt werden und hat Auswirkungen auf den Prozess. Die Ergebnisse der Reaktion von Phosphorsäure mit einem Calciumphosphat-Pulver zeigten dabei die höchste Druckauflösung und mit einer Druckfestigkeit von  $7,4 \pm 0,7$  MPa auch die besten mechanischen Eigenschaften.

Die Erstellung komplexer Materialien aus gallertartigen, monodispersen Partikeln mit Hilfe kolloidaler Kristallisation beschreibt RETSCH (2009), weshalb seine Arbeit der von LANDERS (2004) ähnelt, welcher ebenfalls Pasten verarbeitete. RETSCH (2009) konzentriert sich auf die Entwicklung des Verfahrens aus der Ebene in den 3D-Raum. Also stand die Fertigung von Objekten im Zentrum. Keramikleitschienen aus Hydroxylapatit als Knochenersatz konnte DROSSE (2008) mit 3D-Druck-Verfahren fertigen. Die produzierten Teile untersuchte er im Tierversuch an Ratten.

Es wird deutlich, dass die Materialentwicklung für das 3D-Drucken hauptsächlich im medizinischen Bereich vorangetrieben wird. Trotz des hohen Potentials der Technologie zur Erstellung von seriennahen Kunststoffbauteilen finden in diesem Bereich kaum Untersuchungen statt. Stattdessen verlagert sich die Qualifikation neuer Werkstoffe für den Maschinenbau, wie Kunststoff und Metall, auf die Verfahren Lasersintern und Strahlschmelzen. Des Weiteren konzentrieren sich die oben genannten Arbeiten auf die Biokompatibilität des Materials sowie auf die Möglichkeit der Erzeugung medizinisch oder biologisch relevanter Strukturen. Eine Systematik zur Entwicklung neuer Materialien oder zur Simulation dieser ist nicht vorhanden. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über momentan in Industrie und Forschung angewendete Materialien für generative Fertigungsverfahren. Zwar sind mit Hilfe des 3D-Druckprozesses relativ viele Materialien zu verarbeiten. Die mechanischen Eigenschaften sind jedoch immer gering und die Porosität ist hoch, weshalb der Einsatz außerhalb von Modellen und Prototypen (Porosität irrelevant) sowie Knochenersatz (Poro-

sität gewünscht) kaum eine Rolle spielt.

|                          | 3DP | Lasersintern | Strahlschmelzen | Stereolithographie | FDM | LLM/LOM |
|--------------------------|-----|--------------|-----------------|--------------------|-----|---------|
| Kunststoff               | ■   | ■            |                 | ■                  | ■   | ■       |
| Metall                   | ■   | ■            | ■               |                    |     | ■       |
| Biokompatible Werkstoffe | ■   |              | ■               |                    |     |         |
| Keramik                  | ■   | ■            |                 | ■                  |     | ■       |
| Sand                     | ■   | ■            |                 |                    |     |         |
| Gips                     | ■   |              |                 |                    |     |         |
| Papier                   |     |              |                 |                    |     | ■       |
| Lebensmittel             | ■   |              |                 |                    |     |         |

*Tabelle 3.1: Übersicht in additiven Verfahren zu verarbeitender Materialien nach GEBHARDT (2007)*

### 3.3.3 Multimaterialverarbeitung

Einer der entscheidenden Vorteile der generativen Fertigungsverfahren gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren ist die Möglichkeit, mehrere Materialien in einem Prozess zu verarbeiten und damit Montageschritte einzusparen sowie die Funktionalität der Produkte zu erhöhen (CANNY ET AL. 2004, ELSNER 2009, GODLINSKI & MORVAN 2005, WONG 2009). Bisher wurden verschiedene Ansätze verfolgt, um mehr als ein Material in den Bauprozess einzubringen. Zu unterscheiden sind in jedem Fall die Einbringung verschiedener Werkstoffe an bestimmten Punkten (GODLINSKI & MORVAN 2005) und die Umsetzung gradiertter Eigenschaften (ELSNER 2009) als Sonderform dessen. Bei Letzterem wird durch Einbringung zweier Materialien mit einem Konzentrationsgefälle ein stufenloser Werkstoffübergang erzeugt und auf diese Weise ein Bauteil erstellt, welches nicht nur konstruktiv, sondern auch werkstoffseitig maßgeschneidert ist.

Von UHLMANN & ELSNER (2006) werden solche Werkstoffe, die sich gezielt konfektionieren lassen, als Gradientenwerkstoffe bzw. Werkstoffe mit gradierten Eigenschaften bezeichnet. Im Falle des 3D-Druckens konnte dies beispielsweise durch Variation des Volu-

menstroms bei Eintrag des Fluids realisiert werden. Ein weiterer Ansatz war das von der Firma EOS durch Umsetzung eines speziellen Steuerungsmechanismus erzielte *Skin-and-Core-Verfahren*. Dabei wurden die oberflächennahen Schichtbildbereiche mit einer anderen Laserleistung belichtet als die im Inneren des Bauteils liegenden Volumina. Das Ziel war eine bessere Festigkeit durch unterschiedliche Eigenschaften in den Randbereichen. Das steuerungstechnische Verfahren, bei dem auch ein fließender Übergang möglich ist, besteht aus einer Kombination aus den in MAUCH (2003) beschriebenen Ansätzen. In ähnlicher Art wurde diese Gradierung auch beim 3D-Drucken durchgeführt, indem Randbereiche mit anderem Bindereintrag gedruckt wurden als innen liegende. Auch UHLMANN & ELSNER (2006) erläutern die Herstellung gradiertter Eigenschaften mit Hilfe des 3D-Druckens unter Anwendung verschiedenster Polymere.

Das 3D-Drucken bietet großes Potential hinsichtlich der Verarbeitung zusätzlicher Werkstoffe in einem Prozess, da im Allgemeinen ein relativ großer Bauraum vorliegt, was Möglichkeiten zur Erweiterung der Anlagentechnik bietet. Das Verfahren funktioniert ohne Einbringung von Wärmeenergie und somit spielen temperaturabhängige Materialeigenschaften keine Rolle. Der wichtigste Punkt ist jedoch, dass aufgrund des Verfahrensprinzips bereits zwei Materialien eingebracht werden:

- Pulver im Bauraum über einen Recoater
- Binder über den Druckkopf

Sowohl zum Zeitpunkt des Schichtauftrags als auch vor, während oder nach der Fluideinbringung können gezielt weitere Materialien aufgetragen werden (ELSNER 2009, GODLINSKI & MORVAN 2005). Dies stellt eine Alternative zu den zuvor erwähnten Methoden dar, welche gradierte Eigenschaften durch Variation des selektiven Fluideintrags erreichen. Diese Möglichkeit, mehrere Materialien einzubringen, ist ein erheblicher Unterschied zwischen dem 3D-Drucken und den strahlbasierten generativen Fertigungsverfahren, bei denen durch einen Laser- oder Elektronenstrahl das Pulver selektiv aufgeschmolzen wird. Ein paralleles Einbringen weiterer Werkstoffe durch den Laser- oder Elektronenstrahl ist nicht möglich. Außerdem ist bei diesen Prozessen die Bauraumgröße stark limitiert und dadurch sind die Abmessungen eines weiteren Auftragsmechanismus stark eingeschränkt.

Der von ELSNER (2009) vorgestellte Prozess basiert auf der Piezodrucktechnologie und ermöglicht einen zeitlich und örtlich definierten tropfenförmigen Werkstoffauftrag. Im Rahmen seiner Arbeit wurden gezielt Bauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften hergestellt, wobei der Fokus auf der Erzeugung von Bauteilen mit unterschiedlichen Elastizitäten liegt. Der Elastizitätsmodul kann von spröd-hart ( $> 2500$  MPa) bis gummi-elastisch mit Dehnungen von bis zu 50 % bzw. Kerbschlagzähigkeiten von über  $160 \frac{kJ}{m^2}$  variiert werden. Durch die Möglichkeit, nicht nur innerhalb eines Bauprozesses unterschiedliche Werkstoffe zu verarbeiten, sondern auch einen Eigenschaftsgradienten zu erzeugen, ergeben sich neue Einsatzfelder in der Automobilindustrie, beispielsweise als Dämpfer mit einer lokalen Gummierung.

Auch GODLINSKI & MORVAN (2005) legen die Schwierigkeit, maßgeschneiderte Bauteile herzustellen, dar und fokussieren sich ebenfalls auf gradierte Werkstoffeigenschaften, da aktuell weder die entsprechende Datenvorbereitungssoftware noch die dazugehörigen Prozesse oder Materialien vorhanden sind. Sie beschreiben, wie mit Hilfe des 3D-Druckens und Nano-Partikel-haltiger Tinte solche Bauteile erstellt werden können. Die Tinte war dabei eine Suspension aus Binder und Nano-Partikeln, beispielsweise Carbon, welche mit Hilfe eines Druckkopfs auf Metallpulver gegeben wurde. So konnten schichtweise Grünlinge mit gradierten Eigenschaften erzeugt und anschließend gesintert werden. Dabei konnten die in der Suspension enthaltenen Elemente als Legierungsbestandteile eingesetzt und somit lokal unterschiedliche Härte- und Festigkeitswerte erreicht werden.

Im Gegensatz dazu steht die Arbeit von KESSLING (2010), die sich mit dem Drucken von Lötzinn zur Kontaktierung von Bauteilen auseinandersetzt und der so ein Rapid-Manufacturing-Verfahren zur Flip-Chip-Montage entwickelt hat. Die *Flip-Chip-Montage* ist ein Verfahren in der Elektronikproduktion, bei dem Halbleiter-Chips ohne Gehäuse kontaktiert und anschließend um 180° gedreht werden. KESSLING (2010) erstellte ein Lotdrucksystem als Desktop-Anlage. Der Terminus *Desktop-Anlage* bezeichnet eine Anlage in der Größe eines konventionellen 2D-Druckers, welche im Büro auf dem Schreibtisch untergebracht wird. Im Fokus stand dabei die automatisierte Tropfenplatzierung nach Layoutdaten und deren Überwachung durch ein Kamerasystem.

Mit der Herstellung und Charakterisierung multifunktionaler Metall-Keramik-Komposites beschäftigte sich LEVERKÖHNE (2001) unter Anwendung pulvergefüllter Wachs-Suspensionen (leitend und isolierend) in einem generativen Prozess ähnlich dem FDM. Die maximale Auflösung der erzeugten Strukturen betrug  $220\ \mu\text{m}$ . Es konnte jedoch insbesondere aufgrund von Software-Einschränkungen keine echte 3D-Fähigkeit erreicht werden. Weitere Probleme waren die mangelnde Homogenität der Suspension sowie die Tropfenerzeugung.

VAN DER EIJK ET AL. (2005) erläutern einen Metalldruckprozess, der jedoch nicht auf der Tintenstrahltechnik, sondern auf dem Prinzip der Elektrofotografie basiert. Metalle und Keramiken wurden schichtweise von einem Photorezeptor auf einen Dorn gebracht, der das Material auf die bereits vorhandene Bauteil-Basis aufpresste. Nachteil war das als Stütze notwendige Zusatzpulver, welches sich wegen der Mischung schlecht trennen ließ. Die Herstellung gradiertter Eigenschaften in z-Richtung war jedoch auf einfache Weise möglich.

WONG (2009) gibt einen Überblick darüber, wie elektronische Strukturen möglichst flexibel hergestellt werden können. Der Fokus lag jedoch auf klassischen Fertigungsverfahren, die generativen Prozesse wurden nur am Rande betrachtet. Allerdings bietet die additive Produktion laut WONG (2009) ein wesentlich höheres Potential zur flexiblen Fertigung von Leiterbahnen.

BEHANECK (2010) ermöglichte die Erstellung von Modellen mit einem 24-bit-Farbsystem auf Gips-Basis mit Hilfe eines Tintenstrahl Druckkopfes und der drei Grundfarben. EICH-

MANN (2009) und MIDDLETON (2010) geben dagegen einen Überblick über die Herstellung dreidimensionaler Objekte, welche in verschiedenen Elastizitäten und farblich von weiß über grau bis schwarz variierend hergestellt werden konnten. Das angewendete System ähnelt dem MJM, es musste somit das gesamte Material über die Düse aufgebracht und die Supportstruktur mitgebaut werden. Dies hatte negative Auswirkungen auf die Prozessgeschwindigkeit und die Kosten. KAWAMOTO (2007) untersuchte die Tropfenerzeugung einer Nanosilber-haltigen Tinte, die auf ein Glassubstrat aufgebracht wurde, um elektrische Strukturen zu erzeugen.

GODLINSKI ET AL. (2009) geben Ideen für eine neue Verbindungstechnik für elektronische Mikrosystemtechnik durch 3D-Drucken. Dabei konnten Bauteile in der Größenordnung von Mikrometern mit leitfähiger Tinte gedruckt werden. Die Größe der erzeugten Strukturen kann Tabelle 3.2 entnommen werden.

|   | <b>Tintenstrahldrucken</b> | <b>Aerosoldrucken</b> |
|---|----------------------------|-----------------------|
| Auflösung der Struktur in $\mu\text{m}$ | 20 - 100                   | < 10                  |

*Tabelle 3.2: Vergleich von Tintenstrahl- und Aerosoldrucken nach GODLINSKI ET AL. (2009)*

Um größere Bauteile erzeugen zu können, wurde auch das Aerosoldrucken, ein maskenloses dem 3D-Drucken ohne Pulverbett ähnliches Verfahren, angewandt. Anschließend wurden Leitfähigkeit, Übergangswiderstand, Langzeitstabilität und temperaturabhängiges Verhalten untersucht.

Ähnliche Arbeiten wurden auch von WITS & SRIDHAR (2010) durchgeführt, welche einen Silberkomplex tropfenweise auf ein Glassubstrat gaben, um metallische 3D-Mikrostrukturen zu erzeugen. Dabei fokussierten sie die Tropfenerzeugung, um durchgängige Metallschichten zu drucken. Das Ergebnis der Arbeiten umfasste Druckparameter, insbesondere vor dem Hintergrund des Nass-Nass- und des Nass-Trocken-Drucks. Diese unterschieden sich durch den Aggregatzustand der zuletzt getrockneten Schicht: Nass-Nass-Druck, wenn diese noch feucht war, analog Nass-Trocken-Druck, wenn diese bereits getrocknet war. Insbesondere die Oberflächenqualität war davon abhängig.

CZYZEWSKI ET AL. (2009) beschreiben die Herstellung elektrisch leitfähiger Komponenten unter Anwendung des 3D-Druckens. Dabei wurden komplette Bauteile durch das Verfahren produziert. Diese werden wegen ihrer hohen Porosität im Anschluss infiltriert, wofür neben konventionellen Epoxid- oder PU-Harzen und Wachsen auch mit Carbon-Nanofasern gefüllte Harze zur Anwendung kamen. Auf diese Weise entstanden in Gänze leitfähige Modelle.

Auch in anderen Feldern der generativen Fertigung gibt es erste Ansätze zur Erstellung von Multimaterialbauteilen, beispielsweise durch Strahlschmelzen.

Von ZÄH & OTT (2009) werden Ansätze beschrieben, mittels Strahlschmelzen Bauteile aus Werkzeugstahl (1.2709) und Wolframkarbid-Kobalt (WC-Co) herzustellen. Insbesondere die Entwicklung eines neuartigen Auftragsmechanismus und die Identifizierung geeigneter Prozessparameter wurden untersucht. MEINERS & WISSENBACH (2007) beschreiben ein ähnliches Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus mehreren Materialien durch Strahlschmelzen. Der Auftrag des einen Materials geschah über den herkömmlichen Auftragsmechanismus und der des zweiten über eine Düse.

Bereits von CANNY ET AL. (2004) wird als neuer Ansatz vorgestellt, wie mechatronische Systeme hergestellt können. Diese sogenannten *Flexonics* integrieren mechanische, elektrische und Strukturelemente und könnten durch den 3D-Druck mit Tintenstrahl erzeugt werden. CANNY ET AL. (2004) zeigen jedoch lediglich die theoretische Machbarkeit auf und überlassen die Umsetzung den in Tabelle 3.3 genannten Autoren.

Neben den generativen Verfahren können auch mit weiteren Prozessen Leiterbahnen erstellt werden. Hier sollen exemplarisch der Druck von Leiterplatten mit dem Maskenverfahren und die 3D-MID-Technik (GOTH & FRANKE 2010) genannt werden. Letztere wurde wegen der enorm gestiegenen Anforderungen an elektronische Baugruppen entwickelt und erzeugt räumlich gegossene Schaltungsträger (*Molded Interconnect Devices* (MID)). Neben neuen Fertigungsprozessen mussten hier auch die mechanische Konstruktion und der elektronische Layout-Entwurf zusammengeführt werden. FRANKE ET AL. (2010) implementierten eine CAD-Software für die 3D-MID-Konstruktion und realisierten diese als Plug-in, welches eine dreidimensionale Entwicklungsumgebung für räumliche Baugruppen bietet.

Tabelle 3.3 gibt eine Zusammenfassung der bisher im 3D-Druck (mit und ohne Pulverbett) umgesetzten Multimaterial-Kombinationen und stellt auch dar, bei welchen der Fokus auf der Erstellung gradierter Eigenschaften lag.

In der Wissenschaft konzentrierten sich die bisherigen Arbeiten somit auf gradiente Eigenschaften durch 3D-Drucken. Bisher gibt es kein Verfahren, bei dem elektronische Strukturen innerhalb von realen Kunststoffbauteilen dreidimensional gedruckt werden können. Einzelne Ansätze zum Drucken elektronischer Strukturen sind entweder theoretischer Art oder können aufgrund von Restriktionen nicht in Serie umgesetzt werden. Insbesondere die Entwicklung von Auftragsmechanismen für den 3D-Druck, die den Druck unterschiedlicher Materialien unabhängig von Dampfdruck und Viskosität oder enthaltenen Partikeln ermöglichen, sind aktuell nicht vorhanden.

Ein weiteres Problem für die Anwendung der Multimaterialverarbeitung ist die aktuell nur manuell mögliche Baujobvorbereitung. Über die in Kapitel 2 vorgestellten STL-, CLI- und PBM-Formate zur Baujobvorbereitung können lediglich Informationen für ein Material pro Bauteil und Baujob ausgegeben werden. Auch die Abbildung gradierter Eigenschaften ist nicht möglich. Da der Markt jedoch die Fertigung von Multimaterialbauteilen fordert (WOHLERS 2007), ergibt sich die Notwendigkeit, neue Dateiformate und Software-Lösungen

| <b>Autoren</b>            | <b>Verfahren</b>        | <b>gradierte Eigenschaften</b> | <b>Materialien</b>                   |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| BEHANECK (2010)           | 3DP                     | ja                             | Farbiger Gips                        |
| CANNY ET AL. (2004)       | 3DP                     | nein                           | Kunststoff/<br>Metall                |
| CZYZEWSKI ET AL. (2009)   | 3DP                     | nein                           | Kunststoff/<br>Carbon-<br>Nanofasern |
| ELSNER (2009)             | 3DP                     | ja                             | Kunststoffe                          |
| GODLINSKI & MORVAN (2005) | 3DP                     | ja                             | Metall/<br>Carbon                    |
| GODLINSKI ET AL. (2009)   | 3DP und<br>Aerosoldruck | ja                             | Kunststoff/<br>leitfähige Tinte      |
| KAWAMOTO (2007)           | 3DP ähnlich             | nein                           | Glas/<br>Silber                      |
| KESLING (2010)            | 3DP ähnlich             | nein                           | Lötzinn                              |
| LEVERKÖHNE (2001)         | FDM                     | nein                           | Metall/<br>Keramik                   |
| UHLMANN & ELSNER (2006)   | 3DP                     | ja                             | Kunststoffe                          |
| WITS & SRIDHAR (2010)     | 3DP ähnlich             | nein                           | Glas/<br>Silber                      |

*Tabelle 3.3: Übersicht der multimaterialfähigen 3D-Drucksysteme und der verwendeten Materialien*

bereitzustellen. Eine Initiative in den USA widmete sich dieser Aufgabe mit der Erstellung des STL 2.0, mit dem auch mehrere Materialien pro Bauteil gespeichert werden können (HILLER & LIPSON 2009).

## 3.4 Simulation von Schichtbauverfahren

### 3.4.1 Materialsimulation in der generativen Fertigung

Die Simulation der generativen Fertigungsverfahren ist laut JARDINI ET AL. (2007) von großer Relevanz für die Entwicklung neuer Materialien und damit für eine größere Akzeptanz der Verfahren am Markt. Sie stellten ein Modell auf, mit Hilfe dessen die Aushärtungsmechanismen eines Infrarot-Stereolithographie-Prozesses abgebildet werden konnten, um Werkstoffe mit bestimmten Charakteristika zu entwickeln. Der Prozess wird dabei durch die relevanten Einflüsse *Diffusion*, *Sintern* und *partielle Verfestigung* beschrieben. Zielgrößen waren die Festigkeit und die Steifigkeit. Ein auf Modellierung und Simulation folgender Abgleich mit DSC-Messungen ergab eine ausreichende Übereinstimmung.

ZHANG ET AL. (2010) betrachten die numerische Simulation von mehrkomponentigem Pulver (Silizium/Aluminium) für das Strahlschmelzen. Hierbei wurden insbesondere verschiedene Einflüsse wie Konvektion und Konduktion auf die Temperatur im Bauraum untersucht. Die Ergebnisse zeigten eine starke Korrelation zwischen Schmelzbad und Temperaturverteilung im Prozess. Hervorgerufen wurde dieser Zusammenhang durch die hohe Verfahrensgeschwindigkeit und die ungleichmäßige Verteilung der Energie des Lasers. Mit steigender Scangeschwindigkeit nahm die Temperatur des Pulvers und die Größe der Wärmeeinflusszone zu. Da die Schmelzbadtiefe die Schichtstärke überstieg, war der Schichtverbund gewährleistet, eine Delamination trat nicht ein. Das Modell basiert auf Temperaturfeldern und wurde in ANSYS aufgebaut (KRUTH ET AL. 2007).

EBERHARDSTEINER ET AL. (2009) untersuchten die Multiskalensimulation für Werkstoffe wie Asphalt, Holz oder Beton. Basis waren immer die wiederkehrenden Grundbausteine, aus denen das Material aufgebaut ist. Am Beispiel Asphalt waren dies Bitumen, Füllstoff, Sand, Stein und Luft, welche immer in gleicher prozentualer Verteilung vorlagen. Bei Kenntnis der Eigenschaften aller Grundstoffe lassen sich laut EBERHARDSTEINER ET AL. (2009) die Eigenschaften des Gesamtsystems berechnen. Ähnlich ging auch SEHNERT (2008) vor, welcher ein Mikro-Makro-Modell eines Werkstoffs entwickelte, um Materialeigenschaften zu verbessern. KOTELYANSKII (2004) gibt dagegen einen generellen Überblick über die Simulationsmöglichkeiten von Kunststoffen und aktuelle Algorithmen zur Modellierung von Polymeren.

Eine Simulation auf multiplen Skalen für das 3D-Drucken zur Bestimmung der Materialeigenschaften und zur vereinfachten Qualifizierung neuer Materialien wurde bisher nicht beschrieben.

### 3.4.2 Prozesssimulation in der generativen Fertigung

Zahlreiche Autoren beschreiben ein Vorgehen zur Simulation des Strahlschmelzprozesses (BRANNER 2011, CHILDS ET AL. 2000, COSTA ET AL. 2005, KOLOSISOV ET AL. 2004,

LUTZMANN 2011, MA & HONGZAN 2007, MEINDL 2005, SEEFRIED 2005, WANG ET AL. 2002, YADROITSEV 2009)). Bis auf LUTZMANN (2011), der den Elektronenstrahl als Energiequelle untersuchte, betrachteten alle Autoren das Laserstrahlschmelzen. Beide Verfahren wiesen jedoch in Bezug auf die Modellierung große Ähnlichkeit auf. Alle Autoren erforschten die Intensitätsverteilung des Strahls, die Energieeinkopplung ins Pulverbett, das Aufschmelzen des Pulvers sowie die anschließende Verfestigung und Abkühlung. Insbesondere von MA & HONGZAN (2007), BRANNER (2011) und LUTZMANN (2011) wurden der wärmeisolierende Effekt des das aufgeschmolzene Material umgebenden Pulvers betrachtet. Des Weiteren untersuchten sie dessen Auswirkungen auf den Wärmehaushalt des Bauraums und die Eigenspannungen im entstehenden Bauteil. BRANNER (2011) erstellte ein modulares Simulationssystem, mit dessen Unterstützung je nach Anwendungshintergrund eine sog. globale oder eine lokale Berechnung durchgeführt werden kann. Die lokale Methode berechnet das Bauteilstrukturverhalten detailliert auf Schichtebene, während die globale das gesamte Bauteil simuliert. Durch geschickte Kombination beider Herangehensweisen kann ein optimales Berechnungsergebnis erzielt werden. Modelliert wurde der Laserstrahlschmelzprozess unter Berücksichtigung unterschiedlicher Scanstrategien und Verfestigungsmechanismen für den Werkzeugstahl 1.2709 und die Auswirkungen des Verfahrens auf das Bauteilstrukturverhalten (Eigenspannung und Verformungen).

Dagegen wurden von WANG ET AL. (2002) Experimente zum Strahlschmelzen von Hartmetallen (Wolframcarbid-Cobalt) durchgeführt und die Ergebnisse mit Hilfe einer Simulation validiert. Die Modellierung betrachtete dabei neben der Laserintensitätsverteilung auch die Energieeinkopplung ins Pulverbett und die Absorption.

Von WU & CIMA (1999) wurden Modelle aufgebaut, um die Auswirkungen des Anlösen von Partikeln auf die Mikrostruktur 3D-gedruckter Bauteile unter Betrachtung der Verdunstung der flüchtigen Substanzen des Binders zu ermitteln. Betrachtet wurden Lactose-basierte Polyester, welche in der Medizintechnik Einsatz finden.

POWELL ET AL. (2002) erforschten ein Modell, bei dem das Verhalten eines Newtonschen Fluids in einer trapezoiden Kavität untersucht wird. Dies kann zukünftig in ähnlicher Weise für eine Simulation einer Flüssigkeit im Druckkopf und im Pulverbett angewandt werden.

Im Gegensatz dazu stehen erste Modellierungsansätze im 3D-Drucken, welche sich noch auf die Tropfenerzeuger und die Modellierung von Piezoaktoren beschränkten (EDERER 1999, GÜNTHER 2007, SACHS & VEZZETTI 2005, SEITZ 2002). Diese Autoren erarbeiteten jedoch keine Simulation des 3D-Druckprozesses, welcher bezüglich des Schichtaufbaus ähnlich dem Strahlschmelzen war. Die dabei vorherrschenden physikalischen Phänomene waren jedoch völlig andere. Sie modellierten und berechneten detailliert das Verhalten des Druckkopfs.

Von EDERER (1999) wurde ein Piezo-Biege wandler berechnet und dessen Anwendung zur Flüssigkeitszerstäubung beschrieben, worauf die Arbeiten von GÜNTHER (2007) zu Bimorph-Piezoaktoren aufbauten. SEITZ (2002) modellierte in seiner Arbeit das Übersprecherverhalten

in einem Tropfenerzeuger mit Piezo-Biegewandleraktoren und simulierte dieses numerisch. SACHS & VEZZETTI (2005) bildeten den Abscheidungsprozess in einem neuentwickelten Druckkopf nach.

Grundsätzliche Unterschiede in der Modellierung von Strahlschmelz- und 3D-Druckprozessen basieren auf den abweichenden Verfestigungsmechanismen beim 3D-Drucken:

- Keine Energieeinkopplung, daher keine Wärmeeinbringung
- Keine Verfestigung durch vorgelagertes Schmelzen
- Wärmeabfuhr über Supports nicht notwendig
- Scanmuster irrelevant, da ein quasi-paralleler Auftrag des Binders möglich ist

Ähnlichkeiten in möglichen Simulationsansätzen sind auf den grundsätzlich gleichen Prozessablauf des Schichtaufbaus eines pulverförmigen Grundmaterials zurückzuführen.

Lediglich von JEE & SACHS (2000) und STRASSER & SELBERHERR (1995) sind erste Modelle zur Auswirkung des 3D-Druckprozesses auf die erzeugten Bauteile, insbesondere auf die Oberflächenqualität, bekannt. JEE & SACHS (2000) beschreiben die Oberfläche zuvor virtuell und konnten somit die Anzahl der Design-Iterationen senken. Es handelt sich um ein rein geometrisches Modell. Im Gegensatz dazu verknüpften STRASSER & SELBERHERR (1995) erste physikalische Ansätze mit der topologischen Vorgehensweise, ihre Arbeiten behandelten das Drucken von Leiterbahnen mit Hilfe des Ätzens und bilden somit eine Grundlage für die Simulation der Tropfen und des Flusses auf der Platine, sind jedoch für ein pulverbettbasiertes 3D-Druckverfahren nur am Rande relevant.

### 3.5 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in den Bereichen Simulation sowie Material- und Prozessentwicklung für das 3D-Drucken lediglich erste Ansätze verschiedener Autoren zu erkennen sind. Insbesondere die Simulation des 3D-Druckprozesses und des entstehenden Materials wurde bisher nur rudimentär betrachtet. Ansätze von anderen Verfahren wie dem Lasersintern oder Strahlschmelzen können nur in Grenzen adaptiert werden. Eine verstärkte Entwicklung industriell relevanter neuer Kunststoffe für den 3D-Druckprozess außerhalb der in der Medizintechnik eingesetzten Materialien ist bisher nicht erkennbar. Die Entwicklung von multimaterialfähigen Anlagen beschränkte sich zum großen Teil auf FDM-Systeme oder auf in einer Ebene arbeitende Verfahren.

Auf Basis der betrachteten Arbeiten kann festgehalten werden, dass bereits Methoden zur Materialqualifizierung für generative Verfahren vorhanden sind. Diese beschränkten sich jedoch oft auf klassische Ansätze zur Werkstoffprüfung. In seltenen Fällen fand unterstützend eine Simulation statt und dann wurde immer der Prozess und nicht auch

das Material modelliert. Zudem sind im Bereich des 3D-Druckens nur wenige Arbeiten bekannt, welche sich mit der Materialqualifizierung beschäftigen. 3D-Druck-spezifische Methoden wurden kaum genannt und neue Materialien fast nur für medizintechnische Anwendungen erforscht. Dabei handelte es sich nicht um Kunststoffe. Um einen Überblick über die Kunststoffentwicklung für die generativen Verfahren zu bekommen, war es sinnvoll das im Gegensatz zum 3D-Druck stark erforschte Lasersintern zu betrachten. Auf der Grundlage des Stands der Wissenschaft und Technik kann eine Methode der Materialqualifizierung für das 3D-Drucken aufgebaut werden. Diese basiert auf der Prozessentwicklung für das 3D-Drucken, den Methoden zur Materialqualifizierung für generative Verfahren und der Kunststoffentwicklung für das Lasersintern. Unter Anwendung der zu entwickelnden Methode kann ein Material im Bereich der Kunststoffe für das 3D-Drucken entwickelt und erforscht werden und so auch das Prozessverständnis erhöht werden.

Aus den in diesem und dem vorangegangenen Kapitel beschriebenen Forschungsarbeiten lassen sich für die Weiterentwicklung des 3D-Druckprozesses folgende Handlungsfelder ableiten:

- Verstärkte Entwicklung neuer Materialsysteme für das 3D-Drucken (insbesondere Kunststoffe)
- Vereinfachte Qualifizierung dieser durch unterstützende Simulation im Rahmen einer Methode zur Materialqualifizierung
- Konzipierung von industrietauglichen Anlagen zu Verarbeitung unterschiedlicher Materialien zur Herstellung funktionsintegrierter Bauteile in einem Prozess

Zunächst werden in den nachfolgenden Kapiteln die Methode zur Materialqualifizierung sowie der experimentelle Aufbau eines 3D-Druck-Demonstrators mit Prozessparametern beschrieben. Auf dieser Grundlage wird eine Simulation des 3D-Druckens und der Materialstruktur aufgebaut. Darauf basiert die Untersuchung zur Materialentwicklung. Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens 3D-Drucken beleuchtet.

## 4 Methoden- und Prozessentwicklung

### 4.1 Vorgehen im Kapitel

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei thematische Einheiten: Die Methode zur Materialqualifizierung und die Prozessentwicklung für das 3D-Drucken mit der notwendigen Anlagentechnik.

Im Rahmen der Materialqualifizierung werden die drei Module der Methode **Prozess**, **Simulation** und **Material** und deren Interaktionen beschrieben. Elementarer Bestandteil ist die Systematik zur Einteilung von Materialsystemen nach Dimension der Materialeinbringung im Modul **Material**.

Der 3D-Druck-Demonstrator und der Auftragsmechanismus für das Einbringen mindestens eines zusätzlichen Materials werden beschrieben. Dafür werden in einem ersten Schritt Anforderungen aufgenommen und das 3D-Drucksystem entwickelt. Nach Konstruktion, Fertigung und Inbetriebnahme der Anlage und der Zusatzkomponenten konnten neue Materialien entwickelt und mehrkomponentige Werkstoffsysteme verarbeitet werden, wie im folgenden Kapitel 6 beschrieben. Es werden sowohl für den 3D-Druck-Demonstrator als auch für den Auftragsmechanismus die technischen Aufbauten, die zugehörige Steuerungstechnik sowie Prozessparameter aufgezeigt. Anhand von Experimenten werden anschließend Fehlerbilder dargelegt. Für Defizite, welche durch Änderungen im Anlagenaufbau oder durch die Steuerungstechnik behoben werden können, werden abschließend Lösungen für einen Anlagenprototyp aufgezeigt.

## 4.2 Methode zur Materialqualifizierung

### 4.2.1 Allgemeines

Die Methode zur Materialqualifizierung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Sie besteht aus den drei Modulen **Prozess**, **Material** und **Simulation**, wobei sich zu allen Dreien Submodule ergeben. Das Modul **Prozess** betrachtet die Submodule *Anlagentechnik* und *Parameter*. Die Materialentwicklung spaltet sich in *Mono-* und *Multimaterialien*. Die Simulation unterteilt sich in eine Modellierung des Materials und des Prozesses.

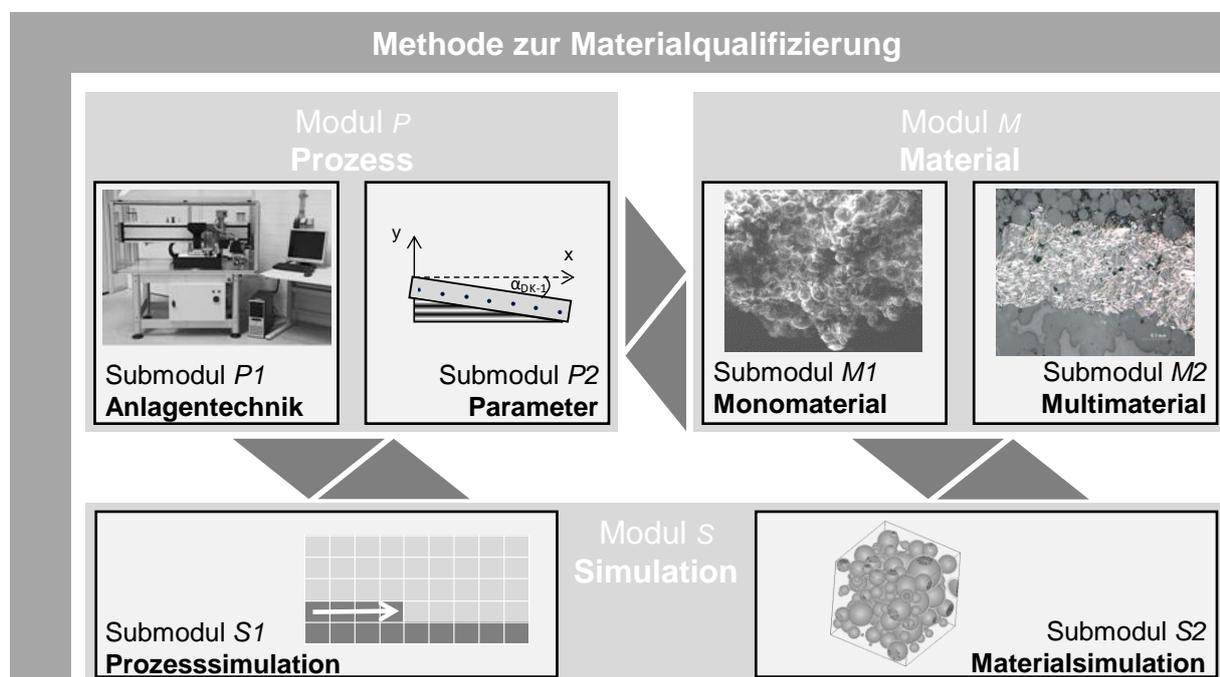


Abbildung 4.1: Module und Submodule der Methode zur Materialqualifizierung

### 4.2.2 Modul P - Prozess

Für das Modul **P Prozess** gilt es, einen 3D-Druck-Demonstrator sowie ein Multimaterialmodul zu entwickeln und diese für eine Serienanlage zu qualifizieren. Dafür werden in einem ersten Schritt die Anforderungen zur Umsetzung des 3D-Druckprozesses analysiert und darauf aufbauend eine *Anlagentechnik* (Modul P1) entwickelt, welche es ermöglicht, das kommerzielle Material PolPor der Firma Voxeljet Technology GmbH sowie mindestens einen weiteren Werkstoff zu verarbeiten. Der Demonstrator dient darüber hinaus zur Qualifizierung der neuen **Werkstoffe** (Modul M) und zur Validierung der **Simulation** (Modul S). Im Vordergrund stehen neben der allgemeinen Anlagentechnik Multimaterial-verarbeitende Systeme. So können zukünftig funktionsintegrierte Bauteile hergestellt werden. Der Terminus *Bauteile* bezieht sich hier auf industriell anwendbare Teile im Sinne des „Rapid

Manufacturing“, also auf Eigenschaften, die über den Prototypstatus („Rapid Prototyping“) hinaus gehen. Das Ziel ist ein flexibler Druck-Demonstrator, welcher ein Multimaterialmodul zur Erzeugung von Multimaterialbauteilen integriert. Das Modul soll werkstoffunabhängig gestaltet werden, so dass es bei geeigneter Materialauswahl beispielsweise neben Leiterbahnen auch andere Eigenschaften, wie unterschiedliche Elastizität, herzustellen erlaubt.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Moduls *P1 Anlagentechnik* wird der Prozess und dessen Parameter im Modul *P2 Prozessparameter* erforscht. Mit PolyPor wurden zur Untersuchung der Prozessbefähigung des Teststands Experimente durchgeführt, aus denen sich Fehlerbilder ableiten lassen. Diese wiederum wurden genutzt, um den 3D-Druck-Demonstrator zu verbessern und Maßnahmen für eine kommerzielle Multimaterialanlage abzuleiten.

Die Forschungsergebnisse zum Prozess und zur Anlagentechnik wurden anschließend genutzt, um eine Simulation aufzubauen, welche das Prozessverständnis erweitert und Vorschläge zur Prozessführung gibt. Mögliche Stellschrauben zur Verbesserung des Prozesses sind beispielsweise die Bindereintragsmenge und die Reaktionsgeschwindigkeit. Auch für die Entwicklung eines neuen Materials ist die Anlagentechnik für die Versuche unabdingbar. Für die kommerziellen Materialien sind die Prozessparameter bekannt; auf deren Basis kann die Erforschung eines Prozessfensters für neue Werkstoffe abgeleitet werden.

### 4.2.3 Modul *S* - Simulation

Im Bereich der **Simulation** soll ein umfassendes Modell aufgebaut werden, welches sowohl den *Prozess* (Modul *S1*) als auch das *Materialverhalten* (Modul *S2*) beschreibt und für beide Bereiche Möglichkeiten der Weiterentwicklung im Sinne eines „Rapid Manufacturing“ gibt. Das Modul *S1* dient dem Prozessverständnis und einer verbesserten Prozessführung. Der Fokus liegt auf der Minimierung des Schwunds und des Verzugs. Erkenntnisse für verbesserte Werkstoffe werden dagegen im Modul *S2* Materialsimulation gewonnen. Durch Modellierung unterschiedlicher Werkstoffstrukturen sowie des resultierenden -verhaltens eines Monomaterials werden Vorschläge erarbeitet, wie ein neuer Werkstoff auszulegen ist. Es werden Materialstrukturen aufgebaut und der Einfluss von Korngrößen, Bindereintrag, Raumfüllungsgrad und Schüttungen der Partikel untersucht. Auf dieser Basis wird im Modul *M* ein verbessertes Material entwickelt.

### 4.2.4 Modul *M* - Material

In der generativen Fertigung kann derzeit meist nur ein Werkstoff in einem Prozessschritt verarbeitet werden, wie in Kapitel 3 dargelegt wurde. Zum Verständnis der weiteren Forschungsarbeiten sowie als elementarer Bestandteil der Methode zur Materialqualifizierung muss die Dimension von Materialien in Bauteilen erläutert werden. Die Erstellung von Bauteilen aus Monomaterial (1-dimensional, 1D) ist in Abbildung 4.2 a) gezeigt. Es wird deutlich, dass das gesamte Bauteil aus nur einem Material (lat.: mono) be-

steht und ein Wechsel zu einem anderen Werkstoff innerhalb eines Baujobs nicht möglich ist.

Theoretisch ist eine Herstellung von 2D-, 2,5D- oder 3D-Multimaterialbauteilen jedoch denkbar. Bei Ersterem wird in jedem Beschichtungsschritt ein anderer Werkstoff aufgetragen und selektiv verfestigt. So kann schichtweise ein zweites Material eingebracht werden und ein 2D-Multimaterialbauteil entstehen (Abbildung 4.2 b)).

2,5D-Multimaterialbauteile (vgl. Abbildung 4.2 c)) sind eine Zwischenform von 2D- und 3D-Komponenten. Wird ein 2D-Bauteil um 90° gedreht, ergibt sich ein 2,5D-Objekt. Bei geeigneter Prozessführung kann ein solches auch durch streifenweisen Materialwechsel im Bauraum umgesetzt werden. Dies ist anlagentechnisch jedoch wie bei den 3D-Multimaterialbauteilen umzusetzen.

Bei der Herstellung sogenannter 3D-Multimaterialbauteile kann jedem Voxel, was dem diskreten Wert einer XYZ-Koordinate (analog zum Pixel) entspricht, ein eigenes Material zugewiesen werden (Abbildung 4.2 d)).

Das Modul *M* der Methode zur Materialqualifizierung beschränkt sich dabei auf die Mono- und die 3D-Multimaterialien, da mit einem 3D-Prozess auch 2D- und 2,5D-Objekte hergestellt werden können.

Die Zielsetzung für das Modul **Material** ist die Entwicklung eines pulverunabhängigen Werkstoffsystems sowie einer Kombination solcher zur Fertigung funktionsintegrierter Produkte aus Multimaterialien am Beispiel von Leiterbahnen. Ein System bezeichnet beim 3D-Drucken das Zusammenwirken von Pulver und Binder, welche gemeinsam einen verfestigten 3D-Druckwerkstoff ergeben. Um ein pulverunabhängiges Werkstoffsystem zu konzipieren, welches am Markt bestehen kann, müssen die mechanischen Eigenschaften der erzeugten Teile gegenüber den aktuellen Materialien verbessert werden. Um eine solche Entwicklung theoretisch auf jeden Werkstoff zu übertragen, wird sie exemplarisch an zwei, in ihren Eigenschaften und Anforderungen stark unterschiedlichen, polymeren Grundmaterialien umgesetzt werden. Dieser Gegensatz ist beispielsweise bei Polyamid und Polymethylmethacrylat der Fall, weshalb diese beiden Kunststoffe im Fokus der Arbeit stehen.

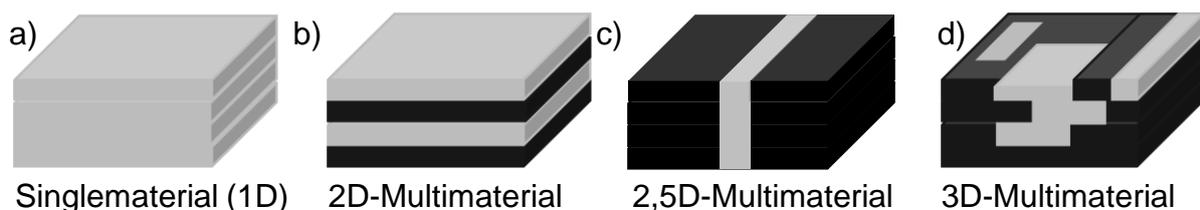


Abbildung 4.2: Darstellung der Dimension der Materialverarbeitung in generativen Verfahren nach (ZÄH ET AL. 2010)

Darüber hinaus sollen mehrere Werkstoffe parallel verarbeitet werden und so ein Teil aus mindestens zwei Materialien gebaut werden. Dabei besteht der Grundkörper aus dem entwickelten Werkstoffsystem, welches mit einem zweiten Material zur Erzeugung von Leiterbahnen gebaut wird. Das Ziel ist die Herstellung funktionsintegrierter Strukturen, wie bei Bauteilen mit Leiterbahnen.

### 4.2.5 Interaktionen zwischen den Modulen

Die Interaktionen zwischen den Modulen der Methode zur Materialqualifizierung sind vielfältig und die Betrachtung nur eines Moduls ist nicht ausreichend. So kann beispielsweise ohne Anlagentechnik kein Prozess und damit auch kein Material entwickelt werden. Gleichzeitig geben Prozess und Anlagentechnik den Rahmen für das zu erforschende Material vor. Die Simulation ist ebenfalls nur im Zusammenspiel mit Prozess- und Materialentwicklung zielführend. Aus den Erkenntnissen der Simulation können Maßnahmen zur Entwicklung eines verbesserten Materials und zur Steuerung eines verzugsminimalen Prozesses abgeleitet werden.

Um der Technologie 3D-Drucken zum Durchbruch zu verhelfen, ist die Herstellung hochwertiger funktionsintegrierter Produkte auf Basis flexibler Materialsysteme elementar. Dies zu ermöglichen, ist das Ziel der Methode zur Materialqualifizierung.

## 4.3 Prozessentwicklung pulverbettbasiertes 3D-Drucken

### 4.3.1 Anforderungen

Ziel der Arbeit ist die Qualifizierung der Verarbeitung von Mono- und Multimaterial in einer 3D-Druck-fähigen Anlage. Dabei sollen die mechanischen Eigenschaften der produzierten Teile gegenüber dem aktuell angewendeten kommerziellen Material PolyPor verbessert und ein Prozessschritt, die bisher dem 3D-Drucken nachgelagerte Infiltration, eliminiert werden. Gleichzeitig soll mindestens ein zweites Material in den Prozess und damit in das produzierte Bauteil eingebracht werden. Dafür sind ein Demonstrator (Submodul *P1: Anlagentechnik*) zu konzipieren und die Prozessparameter (Submodul *P2*) zu ermitteln. Auf der prototypischen Anlage konnte der unter Abschnitt 2.2.1 beschriebene 3D-Druck-Prozess umgesetzt werden, womit die Erstellung 3-dimensionaler Strukturen im Schichtbauverfahren ermöglicht wird. Der 3D-Druck-Demonstrator bedient folgende Anforderungen:

- Sensorik zur Messung der Prozessparameter Düsenspannung  $U_{DK}$ , Druckkopfwinkel  $\alpha_{DK}$ , Pulsdauer  $t_I$  und Verfahrensweg  $m$
- Umsetzung des 3D-Druckprozesses

- Auflegen der Schicht unter Anwendung eines Walzenrecoaters
- Benetzen der Schicht mit Binder aus dem Druckkopf

Um auch Multimaterialbauteile aus mindestens einem weiteren Werkstoff herstellen zu können, ist die Konzipierung eines neuartigen Auftragmoduls notwendig. Die Anforderungen an diesen Mechanismus sind folgende:

- Verarbeitung verschiedenster Medien, unabhängig von Viskosität, Dampfdruck und Durchmesser der enthaltenen Partikel
- Modulares System zur Bevorratung der Materialien
- Ausstoß einzelner Tropfen mit veränderbarem Volumen
- Positionierung und Verfahren über der Bauebene im 3D-Druck-Demonstrator
- Mischen einer Suspension

### 4.3.2 Anlagentechnik

In Abbildung 4.3 ist der im Rahmen dieser Arbeit nach oben stehenden Anforderungen entwickelte 3D-Druck-Demonstrator zu sehen (*P1*: Anlagentechnik). Schichten variierender

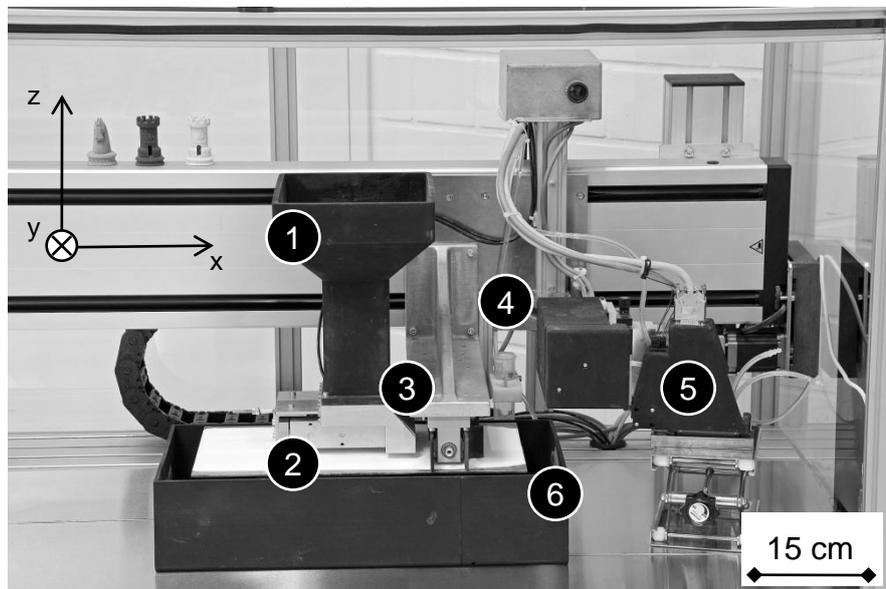


Abbildung 4.3: Entwickelter 3D-Druck-Demonstrator;  
1: Pulvervorrat 2: Bauplattform  
3: Pulverausgabe 4: Dosiersystem  
5: Druckkopf 6: Überlaufrinnen

Stärke werden auf die Bauplattform aufgebracht, wobei die minimale Schichtdicke, bedingt durch die Auflösung der  $z$ -Achse, mindestens  $100\ \mu\text{m}$  betragen muss. Anlagentechnisch ist die Schichtstärke lediglich durch die Bauraumhöhe von  $95\ \text{mm}$ , also de facto gar nicht, beschränkt, prozesstechnisch sind Höhen von  $100$  bis  $200\ \mu\text{m}$  sinnvoll. Durch Wahl eines anderen  $z$ -Achsensystems wäre auch eine höhere oder geringere Auflösung möglich. In positiver  $z$ -Richtung ist sie theoretisch nicht begrenzt, jedoch sind Schichtstärken von mehr als  $200\ \mu\text{m}$  wegen der geringen Durchdringung mit Binder nicht sinnvoll. Die Maße der Bauplattform (2) betragen  $250\ \text{mm}$  in  $x$ -Richtung und  $110\ \text{mm}$  in  $y$ -Richtung bei einer Auflösung von  $5\ \mu\text{m}$ , bedingt durch die Konstruktion der Achse. In die Abbildung ist ein Koordinatensystem zur Orientierung eingezeichnet, wobei mit  $z$  die Baurichtung bezeichnet wird.

Die Möglichkeit, unterschiedlichste Materialsysteme, die aus einem Pulver und einem Binder bestehen, zu verarbeiten, ist gegeben. Das Pulver wird über einen Walzenrecoater (3) aufgebracht, die Dosiermenge über einen Schubladenbehälter mit veränderlichem Hub eingestellt. Das Fluid wird anschließend über den Tintenstrahldruckkopf (5) zugegeben. Dabei besteht die Möglichkeit, bis zu drei Druckköpfe parallel anzuwenden. Das Fluid wird in Spritzen zu je  $50\ \text{ml}$  bevorratet. Es können bis zu  $2\ \text{Liter}$  Pulver in (1) gelagert werden. Die Spezifikationen des Druckkopfes geben  $1$  bis  $30\ \text{mPas}$  als optimalen Bereich vor. Durch die Möglichkeit, den Druckkopf auf bis zu  $70\ ^\circ\text{C}$  aufzuheizen, kann die Viskosität des Binders gesenkt werden. Des Weiteren sind Überlaufrinnen zur Aufnahme des überschüssigen Pulvers vorhanden. Das nicht verfestigte Pulver kann nach einem Siebevorgang ohne weitere Recyclingschritte wieder in den Pulvervorratsbehälter gefüllt und erneut angewendet werden. Somit besteht ein geschlossener Pulverkreislauf. Der Recoater und die drei Achsen werden getrennt voneinander über eine zweiteilige Software gesteuert.

Die Baujobvorbereitung, wozu das Festlegen der Auflösung in allen drei Raumrichtungen sowie das Slicen und Umwandeln der STL- in PBM- und CSV-Dateien gehört, findet in RAPIX3D, einer kommerziellen Software zur Baujobvorbereitung, statt. Eine CSV-Datei entspricht einer Textdatei, die eine Liste enthält. Dabei sind die Werte der Liste durch Zeichen von einander getrennt (Character Separated Values). Pro Schicht wird dabei eine PBM-Datei erzeugt, welche jedem Punkt in der Bitmap einen Wert  $0$  oder  $1$  zuweist. Die CSV-Datei bündelt die Informationen aller Schichten und bietet auch die Möglichkeit, weiteren Input, beispielsweise weitere PBM-Dateien pro Schicht, zu speichern. Die Maschinensteuerung gibt dann pro Pixel mit dem Wert  $1$  in der Bitmap einen Tropfen Binder am entsprechenden Punkt im Baufeld ab. Dieser Teil der Steuerung findet auf dem Anlagenrechner statt. Auf diese Art kann jedoch lediglich ein Material gedruckt werden.

Als Herausforderung bei der Herstellung von Multimaterialbauteilen im 3D-Druckprozess gilt, mindestens einen weiteren Werkstoff zusätzlich zum Pulver und Binder auf das Kunststoffsubstrat zu bringen. Dieses soll mittels eines Auftragsmechanismus an einer in allen drei Raumrichtungen genau definierten Position im Bauraum geschehen.

Zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen sind verschiedene Möglichkeiten

denkbar. Es kann über einen zweiten Druckkopf dosiert werden, um ein weiteres Material einzubringen (CANNY ET AL. 2004, CZYZEWSKI ET AL. 2009, GODLINSKI ET AL. 2009, WITS & SRIDHAR 2010). So ist jedoch lediglich eine Zufuhr von Fluiden möglich. Unter gewissen Bedingungen können auch Suspensionen verarbeitet werden, der maximale Durchmesser der enthaltenen Partikel darf jedoch  $1\ \mu\text{m}$  nicht übersteigen, da sie sonst nicht durch die Düsen des Druckkopfs ausgegeben werden können. Steuerungstechnisch ist diese Lösung leicht umzusetzen, da nur die Software für die Baujobvorbereitung zu ändern ist, jedoch keine Modifikationen in der Hardware der Maschinensteuerung durchgeführt werden müssen. Wegen der hohen Einschränkungen bei der Materialauswahl wurde jedoch ein flexibleres System entwickelt. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Notwendigkeit, leitfähige Strukturen zu erzeugen, sinnvoll, da so auf Suspensionen mit Partikeln größeren Durchmessers zurückgegriffen werden kann. Diese sind ohne anschließendes Sintern zu verarbeiten, weshalb ein neues Modul zum Auftrag entwickelt wurde. Dieses basiert auf einer Klebstoffdosiereinheit, bei der eine Düse mit Druckluft beaufschlagt wird. So können auch Materialien mit hoher Viskosität und großen Partikeln verarbeitet werden. Des Weiteren wurde ein geeignetes Mittel gefunden, um eine Sedimentierung, also das Absetzen von Partikeln am Behälterboden, zu verhindern. Es wurde so ausgelegt, dass neben der Verarbeitung leitfähiger Substanzen, welche unter Abschnitt 6.4 näher beschrieben werden, auch andere Materialien zu verarbeiten sind. Leitfähige Systeme sind wegen ihrer Konsistenz und der Darreichungsform als Suspension problematisch in der Anwendung im Druckkopf. Die große Flexibilität des Systems bietet zahlreiche weitere Möglichkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Einbringen von Silber- und Graphitsuspensionen näher betrachtet und das Modul zur Prozessierung für diese Materialien qualifiziert. Der Mechanismus bietet die Möglichkeit, auch andere Materialien als Fluide oder Suspensionen zu dosieren. So ist theoretisch denkbar, mit dem System Silikone zu verarbeiten, um selektive Elastizität an Bauteilen wie beispielsweise Griffschalen zu erzeugen. Der entwickelte Auftragsmechanismus (vergleiche Abbildung 4.4 und 4.5) besteht aus einer Kartusche mit wechselbaren Kanülen (6) unterschiedlicher Durchmesser zur Dosierung (4) und einem elektrisch angetriebenen integrierten Propeller als Mischsystem (5) zur Durchmischung der Suspension. Der Elektromotor wird an (1) aufgehängt. Der Ausstoß einzelner Tropfen wird über ein Druckluftsystem (2) realisiert. Über die Kupplung (3) können sowohl Materialzufuhrsysteme als auch Druckluft zugeschaltet werden.

Durch Variation der Druckluftstoßdauer und des Kanüledurchmessers kann das Volumen der ausgegebenen Tropfen anforderungsgemäß von etwa 1 bis 10 ml angepasst werden. Insbesondere der Kanüledurchmesser beeinflusst das Volumen der auszugebenden Tropfen. Das Modul wird auf der y-Achse des 3D-Druck-Demonstrators montiert und bietet die gleichen Verfahrensmöglichkeiten über die y-Achse wie der Druckkopf. Das modulare System zur Bevorratung besteht aus konventionellen, chemisch beständigen Kartuschen aus Polypropylen (PP). Diese können im leeren sowie im gefüllten Zustand ein- und ausgebaut werden und damit sowohl in der Anlage als auch außerhalb als Vorratsbehälter fungieren. Die aus Aluminium bestehenden weiteren Komponenten sind zur besseren Beständigkeit eloxiert. Das Mischen der Suspension findet über einen elektrisch

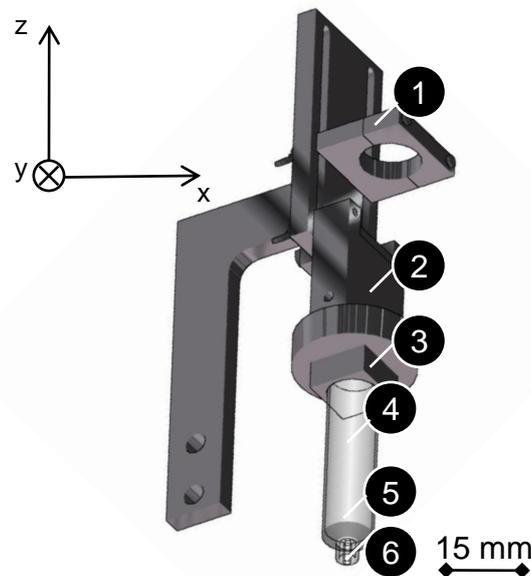


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Multimaterialmoduls des 3D-Druckers;  
1: Aufhängung des Elektromotors 2: Druckluftzufuhr  
3: Kupplung 4: Dosiersystem 5: Mischsystem 6: Anschluss für Kanülen

angetriebenen Rührmechanismus statt (Abbildung 4.5).

Der Propellerrührer befindet sich im unteren Bereich der Kartusche, wo die Gefahr der Sedimentierung aufgrund der Schwerkraft am größten ist. Das Antriebsmoment für die Rührwelle wird mit einem Elektromotor (1) erzeugt und mit einer geradzahnten Stirnradpaarung übertragen. Zur Variation der Drehzahl des Motors wurde ein Netzgerät mit einstellbarer Spannung ( $U_R = 3 - 12 \text{ V}$ ) gewählt. Die zum Motor gehörige Drehzahl-Spannungs-Kennlinie ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Daraus ergibt sich eine Drehzahl von maximal  $1000 \frac{1}{\text{min}}$  bei 12 V.

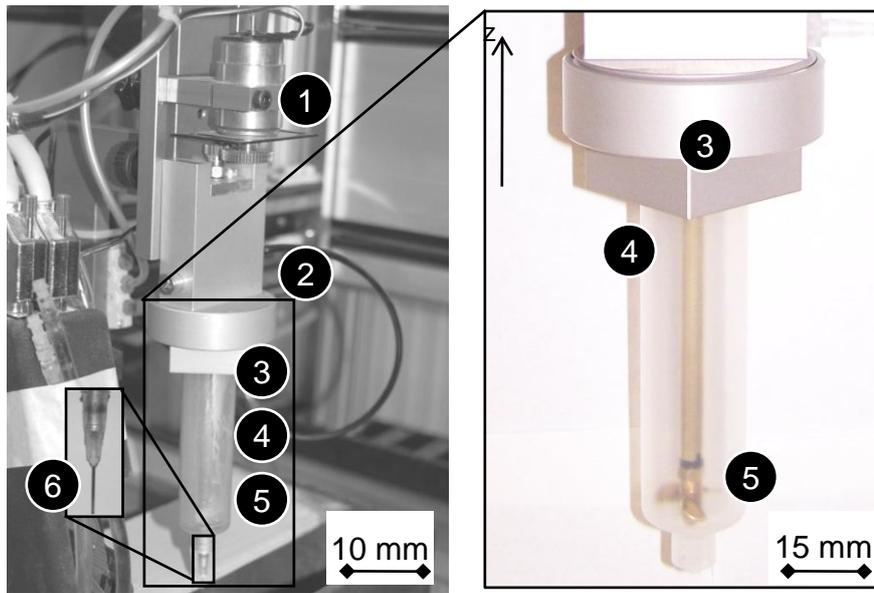


Abbildung 4.5: Umgesetztes Multimaterialmodul des 3D-Druckers;  
 1: Elektromotor 2: Druckluftzufuhr  
 3: Kupplung 4: Dosiersystem  
 5: Mischsystem 6: Kanüle

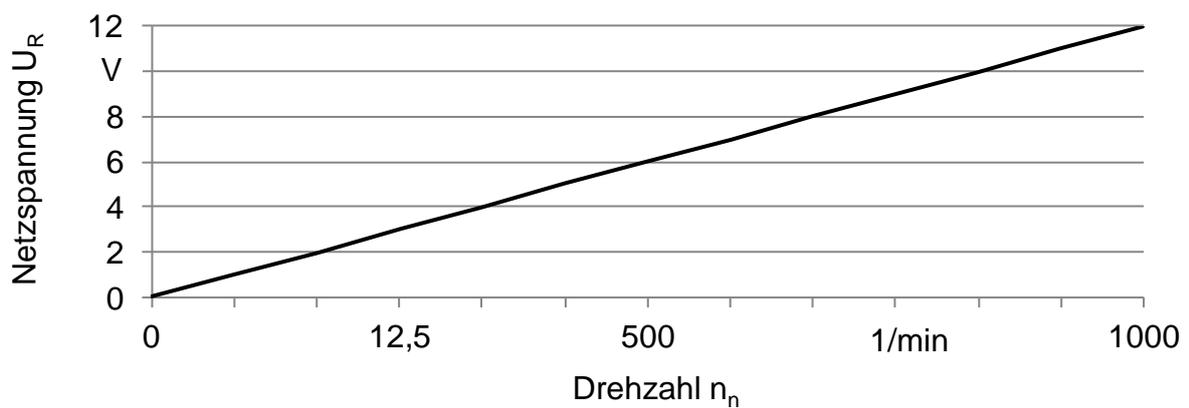


Abbildung 4.6: Drehzahl-Spannungs-Kennlinie des Motors für den Bereich  $U_R = 0 - 12 V$

Das Multimaterialmodul wird über ein Unterprogramm in der Maschinensteuerung angesprochen. Dessen Funktionen umfassen:

- Ausgabe einzelner Tropfen und Variation der Druckstoßdauer
- Bewegung des Auftragsmoduls in x- und y-Richtung
- Drucken von gespeicherten Mustern
- Ansteuerung von Punkten auf der x- und y-Achse aus CSV-Daten

Die Daten zu den Punkten in x- und y-Richtung können aus einer Erweiterung der Baujob-vorbereitenden Software RAPIX3D gewonnen werden. Diese speichert auf den Bauraum bezogene Koordinatenpunkte in zwei weiteren Spalten der CSV-Datei. Die Einstellung von z-Koordinate, Druckstoßstärke und Drehzahl des Mischmechanismus wird manuell an der Hardware eingegeben, wobei eine Veränderung der z-Höhe in manchen Fällen auch über eine Bewegung der Bauplattform realisiert werden kann.

Der Ablauf der Schichterzeugung einer Ebene mit zwei Materialien folgt dem in Abbildung 4.7 dargestellten Ablauf.

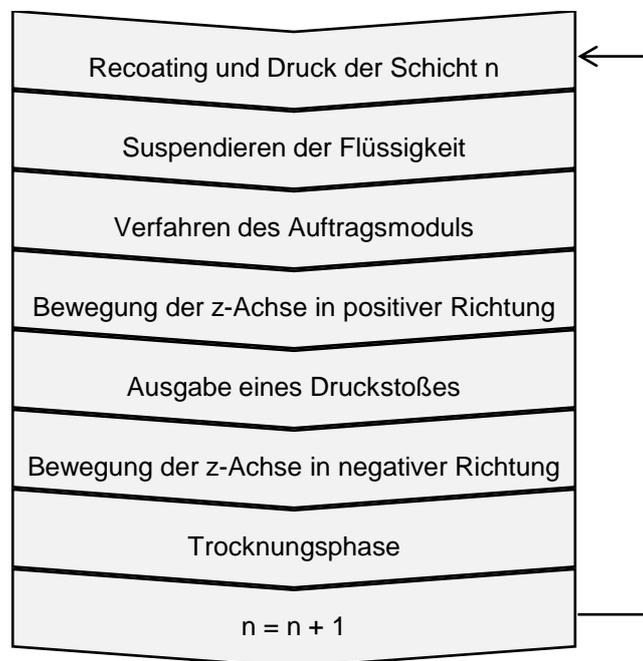


Abbildung 4.7: Prozessablauf bei der Schichterzeugung einer Ebene mit zwei Materialien

So wird zuerst eine Schicht  $n$  mit dem Monomaterial gedruckt, darauffolgend wird die Suspension in der Kartusche durchmischt, das sogenannte *Suspendieren*. Anschließend wird das Auftragsmodul an die gewünschte Position im Bauraum gefahren und die  $z$ -Achse angehoben, so dass sich die Kanüle ohne Abstand zum Pulverbett befindet. Nach Abgabe des Tropfens durch einen Druckstoß wird die  $z$ -Achse wieder in die Ausgangsposition gefahren und nach einer kurzen Trocknungsphase die Schicht  $n + 1$  aufgetragen und gedruckt. So entstehen Bauteile aus mehreren Materialien schichtweise. Von elementarer Bedeutung ist das vorrangige Aufbringen des Zusatzmaterials innerhalb einer Schicht, welches erst nach der Trocknung des ersten recoated wird. Das heißt, es wird innerhalb einer Schicht zuerst das Zusatzmaterial dosiert und getrocknet, erst anschließend wird das Pulvergrundmaterial aufgebracht und die Schicht lokal mit Binder bedruckt. So kann verhindert werden, dass sich beide Werkstoffe vermischen und damit ist ein Recycling ohne großen Mehraufwand möglich.

### 4.3.3 Prozessparameter

Basierend auf den prinzipiellen Erläuterungen zum monomateriellen 3D-Druck (vgl. Abschnitt 2.2.1) kann diese Technologie als System beschrieben und dessen Verhalten, wie bei jedem Fertigungsprozess, auf einige Grundgrößen reduziert werden. Abbildung 4.8 zeigt schematisch die Einfluss- und Zielgrößen des 3D-Druckprozesses. Einflussgrößen sind neben den eigentlichen Eingangsgrößen, welche sich definiert ändern lassen, die Störgrößen, welche den Prozess beeinflussen, ohne dass sie geregelt werden können. Durch Zusammenspiel dieser ergeben sich die Antworten des Systems (Zielgrößen). Die Prozessparameter wurden in Submodul *P2* ermittelt.

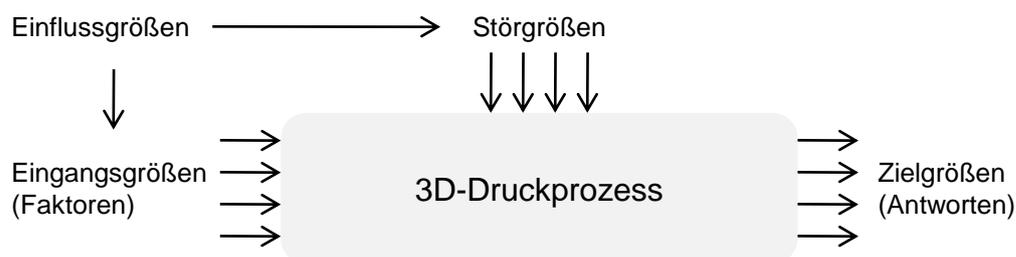


Abbildung 4.8: Einfluss- und Zielgrößen des Systems 3D-Drucken

Neben der Binderkomposition spielen zahlreiche weitere Parameter des Binders eine entscheidende Rolle für den 3D-Druckprozess. Von großer Bedeutung sind folgende Größen:

- Viskosität  $\eta$
- Dampfdruck  $p_{DD}$
- Masse eines Tropfens  $m_{t1}$
- Tropfenanzahl  $n_T$  und Druckauflösung im Sinne der Punktdichte  $\rho_{dpi}$

Die ersten drei Werte sind wiederum von den am Drucker einzustellenden Eingangsgrößen Düsenspannung  $U_{DK}$ , Pulsdauer  $t_I$  und Drucktemperatur, also der Prozesstemperatur des Binders beim Drucken  $T_{DK}$ , abhängig. Genauer dargestellt ist dies in der folgenden Definition. Diese anlagenseitig zu variierenden Parameter verändern das Druckergebnis.

#### Definition

- $\eta$  ist eine Funktion mit einer Menge  $m_1$  von Variablen  $m_1 = \{x_1, \dots, x_n\}$  und  $T_{DK} \in m_1$ .
- $p_{DD}$  ist eine Funktion mit einer Menge  $m_2$  von Variablen  $m_2 = \{y_1, \dots, y_n\}$  und  $T_{DK} \in m_2$ .
- $m_{t1}$  ist eine Funktion mit einer Menge  $m_3$  von Variablen  $m_3 = \{z_1, \dots, z_n\}$  und  $n_T, t_I, T_{DK} \in m_3$ .

Die Druckkopftemperatur ist die Temperatur der Binderflüssigkeit im Druckkopf. Dieser kann bis zu einer Temperatur von 70 °C aufgeheizt werden. Die Pulsdauer gibt die Dauer der Verformung (Dehnung oder Zusammenziehen) der Piezokristalle des Tintenstrahl Druckkopfs an. Die Düsenspannung  $U_{DK}$  benennt den Potentialunterschied zwischen den Piezoaktoren. Durch den piezoelektrischen Effekt verformen sich diese Elemente ähnlich einem Bimetall unter der elektrischer Spannung  $U_{DK}$  für eine Dauer von  $t_I$ . Dies führt dazu, dass in den einzelnen Düsen ein Überdruck aufgebaut wird und die Tinte auf das Pulverbett gepresst wird. Die Tinte bildet somit Tropfen, deren Volumen sich über die angelegte elektrische Spannung steuern lässt. Je höher diese Spannung  $U_{DK}$ , desto größer ist die Verformung der Piezoelemente. Damit steigt der Durchfluss und auch die Masse eines Tropfens  $m_{t1}$ . Dieser Zusammenhang kann für Bindertyp 2 bei  $t_I = 5$  und  $T_{DK} = 30$  °C der Abbildung 4.9 entnommen werden.

Die Druckgeschwindigkeit umschreibt die Verfahrensgeschwindigkeit der x-Achse, an welcher der Druckkopf befestigt ist. Diese hat jedoch geringen Einfluss auf die Einbringung der Bindertröpfchen ins Pulverbett. Die Auflösung in z-Richtung wird über die Schichtstärke definiert.

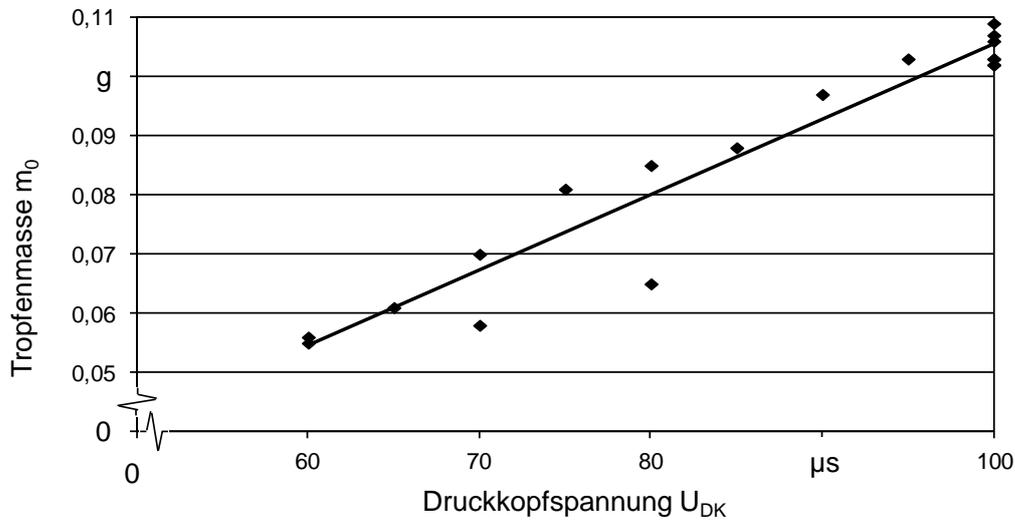


Abbildung 4.9: Linearer Zusammenhang zwischen Düsenspannung  $U_{DK}$  und resultierender Tropfenmasse  $m_0$  pro 10.000 Schuss; für Bindertyp 2 bei  $t_I = 5 \mu s$  und  $T_{DK} = 30 \text{ }^\circ C$ ;  
Masse eines Tropfens ergibt sich analog

Die Tropfenmasse  $m_0$  gibt an, welche Masse 10.000 Tropfen haben. Die Messung wird mit einer externen Feinwaage durchgeführt. Aus Gründen der Messbarkeit wird der Wert von 10.000 Tropfen ermittelt. Daraus lässt sich auch die Masse eines Tropfens  $m_{T1}$  berechnen.

Der Wert ist abhängig von den anderen Faktoren, wie Druckkopftemperatur, Pulsdauer sowie Düsenspannung. Somit ist die Tropfenmasse als resultierende Größe zu betrachten. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über den Wertebereich der Prozessparameter und der Tropfenmasse.

Auch die Tropfenanzahl und die Druckauflösung, welche der Punktdichte entspricht, haben einen Einfluss auf die Menge des eingebrachten Binders. Die Tropfenanzahl beschreibt die Genauigkeit der Bilddarstellung in der x-y-Ebene, also wie viele Tropfen pro Inch (dpi, dots per inch) ausgegeben werden. In x-Richtung ist sie über die Software des 3D-Druckers einzustellen. In y-Richtung ist sie vom Winkel des Druckkopfes ( $\alpha_{DK}$ ) abhängig, welcher den Winkel zwischen der Längsachse des Druckkopfes und dem Vektor der Druckrichtung beschreibt. Die Bindereintragsdichte kann also durch geeignete Einstellung des Winkels der Düsenanordnung festgelegt werden.

Abbildung 4.10 a) zeigt die Bauplatte und den Druckkopf im Winkel  $\alpha_{DK0}$ , Letzterer wird in parallelen Streifen in Druckrichtung über das Pulverbett verfahren. Durch Änderung des Druckkopfwinkels von  $\alpha_{DK0}$  in Abbildung 4.10 a) auf  $\alpha_{DK1}$  in Abbildung 4.10 b) kann der überfahrene Streifen verbreitert werden. Da die Bindermenge pro Streifen bei gleicher Düsenanzahl identisch bleibt, wird jeder Punkt bei breiterem Streifen mit geringerem Eintrag bedruckt.

| Parameter                     | Abk.          | Einheit | Wertebereich                                  |
|-------------------------------|---------------|---------|---|
| Druckkopftemperatur           | $T_{DK}$      | °C      | RT bis 70                                     |
| Pulsdauer                     | $t_I$         | $\mu s$ | 3 - 10  |
| Düsen <span>­</span> spannung | $U_{DK}$      | V       | 60 - 10                                       |
| Masse eines Tropfens          | $m_{t1}$      | g       | $0,09 \cdot 10^{-4}$ bis $0,11 \cdot 10^{-4}$ |
| Druckgeschwindigkeit          | $v_{Druck}$   | mm/s    | $\leq 200$                                    |
| Druckkopfwinkel               | $\alpha_{DK}$ | °       | 0 - 90  |
| Schicht <span>­</span> stärke | $h$           | $\mu m$ | 100 - 2.000                                   |

Tabelle 4.1: Prozessparameter mit Wertebereich beim 3D-Drucken

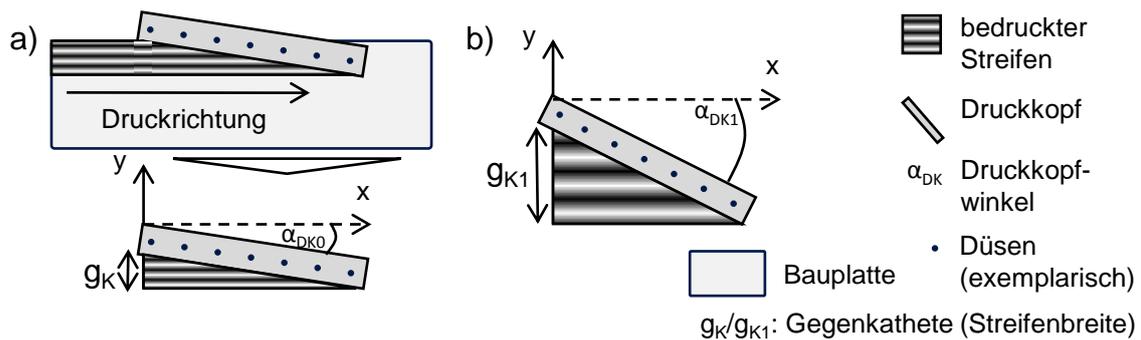


Abbildung 4.10: Druckkopfwinkel und dessen Auswirkungen auf die Breite  $g_K$  des bedruckten Streifens

Je größer also der Druckkopfwinkel  $\alpha_{DK}$  ist, desto breiter ist der bedruckte Streifen. Der Einfluss des Druckkopfwinkels auf die Menge des eingebrachten Binders, welcher über die Breite des Druckkopfes beziehungsweise pro Düse konstant bleibt, kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$g_K = h_K \cdot \sin \alpha_{DK} \quad (4.1)$$

Dabei ist  $g_K$  die Gegenkathete zum Druckkopfwinkel  $\alpha_{DK}$  und  $h_K$  die Hypotenuse. Somit resultiert aus dem eingestellten Winkel der Eintrag in y-Richtung. Die berechnete Bindereinbringung pro Streifen geht nicht in weitere Simulationen, Berechnungen oder Auswertungen ein. Sie dient lediglich dem Verständnis des Einflusses des Druckkopfwinkels auf die Breite des gedruckten Streifens und damit auf die Bindermenge. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Wert durch Messen ermittelt.

Neben der falschen Einstellung des Druckkopfwinkels kann ein abweichender Bindereintrag

pro Streifen durch mehrere Faktoren verursacht werden:

- Falsche Wahl der Auflösung in y-Richtung
- Düsenausfall
- Abweichende Tropfenmasse durch falsche Werte der Prozessparameter

Bei sinkendem Bindereintrag werden die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst. Wird jedoch zu viel Fluid eingebracht, ist die Maßhaltigkeit schlechter. Eine präzise Anpassung der Tropfenmasse ist somit unbedingt notwendig.

Im Pulver sind die folgenden Eingangsgrößen relevant:

- Schüttdichte  $\rho_S$
- Partikelform, -größe und -verteilung
- Schichtstärke  $h$

Weitere Parameter kommen erst in der Nacharbeit zum Tragen. Das sind das Temperatur-Zeit-Profil beim Aushärten sowie die Lagerzeit nach dem Drucken im Pulverbett.

Im 3D-Druckprozess sind die folgenden Störgrößen relevant:

- Ungleiche Positionierung und Orientierung der Bauteile im Bauraum
- Umwelteinflüsse (Feuchtigkeit, Temperatur, Luftströmung)
- Chargenschwankungen (Pulver, Binder)
- Düsenausfall
- Fehler beim Schichtauftrag
- Nebenzeiten wie Trocknungsdauer im und außerhalb des Pulverbetts

Der Einfluss der Störgrößen muss minimiert werden. Ist dies nicht möglich, werden sie konstant gehalten, um einen negativen Einfluss auf die Bauteilqualität auszuschließen. Dies geschieht beispielsweise durch gleiche Positionierung im Bauraum.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Zielgrößen sind die Festigkeit und Steifigkeit, welche durch die Bruchspannung  $\sigma_B$  und die zugehörige Dehnung  $\epsilon_B$  sowie den E-Modul  $E_t$  charakterisiert werden, und die Maßhaltigkeit.

Für die Anwendung des Multimaterialmoduls sind ebenfalls für jedes Material geeignete Prozessparameterfenster zu identifizieren. Die zu variierenden Einflussgrößen für das entwickelte Auftragsmodul sind:

- Rührer-Drehzahl  $n_R$  (in Abhängigkeit der Netzspannung  $U_R$ ) und Dauer des Rührvorgangs  $t_R$
- Abstand zwischen Pulverschicht und Kanüle  $a_{PN}$
- Druckstoßstärke  $p_S$  und -dauer  $t_S$
- Dauer der Trocknungsphase  $t_T$
- Kanüledurchmesser  $d_N$  und Kanülenlänge  $l_N$

Die Ermittlung der Werte dieser Parameter steht am Anfang jeder neuen Materialqualifizierung für dieses Modul, der Wertebereich kann der folgenden Tabelle 4.2 entnommen werden.

| Parameter                                 | Abk.     | Einheit         | Wertebereich  |
|---|----------|-----------------|---------------|
| Netzspannung                              | $U_R$    | V               | 3 - 12        |
| Rührer-Drehzahl                           | $n_R$    | $\frac{1}{min}$ | 0 - 1000      |
| Dauer des Rührvorgangs                    | $t_R$    | s               | 1 - $\infty$  |
| Abstand zwischen Pulverschicht und Kanüle | $a_{PN}$ | mm              | -1 - 11*      |
| Druckstoßstärke                           | $p_S$    | bar             | 0 - 12        |
| Druckstoßdauer                            | $t_S$    | ms              | 0 - 60        |
| Dauer der Trocknungsphase                 | $t_T$    | min             | 0,5 - 160     |
| Kanüledurchmesser                         | $d_N$    | mm              | 0,2 - 1,0     |
| Kanülenlänge                              | $l_N$    | cm              | 2,54 = const. |

*Tabelle 4.2: Prozessparameter und Wertebereich beim Drucken eines zweiten Werkstoffs mit dem Multimaterialmodul;*

*\* Die Kanüle kann bis 1 mm in das Pulverbett einstechen*

### 4.3.4 Experimente, Fehlerbilder und Anlagenoptimierung

Die oben beschriebene Anlagentechnik wurde mit dem kommerziell erhältlichen Material PolyPor der Firma Voxeljet Technology GmbH auf Prozessfähigkeit untersucht. Dafür wurden Versuche zur Erstellung von Bauteilen durchgeführt. Die bekannten Prozessparameter für PolyPor sind in Tabelle 4.3 aufgezeigt. Um die Funktionsfähigkeit der Anlagentechnik zu testen, wurden auch Versuche mit von diesen optimalen Parametern abweichenden Werten durchgeführt, die entsprechenden Parameter sind bei den zugehörigen Fehlerbildern in diesem Abschnitt aufgeführt. Mit diesen wurden Experimente zur Erzeugung von Zugstäben durchgeführt. Darauf aufbauend wurde der Demonstrator verbessert und es wurden erste Anforderungen an eine kommerzielle Anlage abgeleitet. In das Multimaterialmodul

| Parameter            | Abk.          | Einheit | Wert                |
|----------------------|---------------|---------|---------------------|
| Druckkopftemperatur  | $T_{DK}$      | °C      | RT - 40             |
| Pulsdauer            | $t_I$         | $\mu s$ | 6                   |
| Düsenspannung        | $U_{DK}$      | V       | 70 - 80             |
| Masse eines Tropfens | $m_{t1}^*$    | g       | $0,1 \cdot 10^{-4}$ |
| Druckgeschwindigkeit | $v_{Druck}$   | mm/s    | 200                 |
| Druckkopfwinkel      | $\alpha_{DK}$ | °       | 10                  |
| Schichtstärke        | $h$           | $\mu m$ | 150                 |

Tabelle 4.3: Werte der Prozessparameter für den Druck des kommerziellen Binders für PolyPor;

\*Masse eines Tropfens  $m_{t1}$  bei  $U_{DK} = 75 V$ ,  $T_{DK} = 40; ^\circ C$ ,  $t_I = 6 \mu s$

wurde konventionelles Leitsilber (Suspension) gefüllt und es wurden unter Variation der Einflussgrößen Versuche zur Prozessfähigkeit des Moduls durchgeführt. Die entstehenden Fehlerbilder für den Monomaterial verarbeitenden 3D-Druck-Demonstrator lassen sich nach Verursachern in drei Kategorien einteilen:

- Anlage
- Material
- Baujobvorbereitung

In Abbildung 4.11 ist der im Demonstrator eingebaute Walzenrecoater zu sehen.

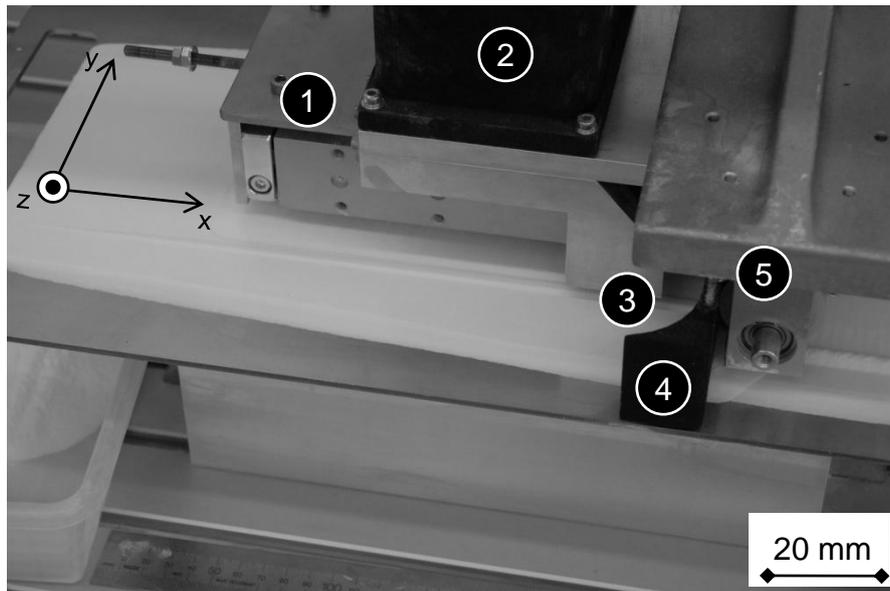


Abbildung 4.11: Walzenrecoater des 3D-Druck-Demonstrators;  
 1: Pulverzufuhr (Schublade) 2: Pulvervorrat  
 3: Pulverausgabe 4: Abstreifer 5: Walzenrecoater

Nach Ausgabe einer einzustellenden Pulvermenge wird die zur Verfahrriichtung der x-Achse gegenläufig rotierende Walze über das Pulverbett gefahren. So entstehen Schichten definierter Höhe. Bei den ersten Schichtaufträgen im Rahmen dieser Arbeit kam es zu einer unregelmäßigen Schichtoberfläche, es bildeten sich die in Abbildung 4.12 dargestellten **anlagenseitigen** Fehler. Zum einen entstanden Riefen (1) im Pulverbett und zum anderen Pulveranhäufungen (2). Beides war auf den gewählten Mechanismus für den Schichtauftrag zurückzuführen.

| Fehlerbild: Pulverriefen und -anhäufungen |  |
|---|--|
|   | <b>Erscheinungsbild:</b> Ungleichmäßige Schichtoberfläche<br><b>Material:</b> PolyPor<br><b>Prozessparameter:</b> $T_{DK} = 40 \text{ °C}$ $P = 3 \text{ ms}$<br>$m_{t1} = 0,11 \cdot 10^{-4} \text{ g}$ $v_{Druck} = 200 \text{ mm/s}$<br>$h = 150 \text{ }\mu\text{m}$ $\alpha_{DK} = 10^\circ$<br><b>Physikalischer Effekt:</b> Statische Aufladung der Walze |

Abbildung 4.12: Fehlerbild Pulverriefen und -anhäufungen beim 3D-Drucken;  
 Erscheinungsbild, Material und eingestellte Prozessparameter sowie physikalischer Effekt mit 1: Druckkopf 2: Pulverriefen 3: Pulveranhäufungen

Die Riefen resultierten aus der unregelmäßigen Walzenoberfläche des Recoaters, welche durch statische Aufladung und darauf folgende Pulveranhaftungen auftrat. Anhäufungen von Pulver entstanden durch eine nicht auslaufende Walze, d.h. am Rande der Walze wurde überschüssiges Pulver angesammelt und blieb auf dem Pulverbett zurück. Um Pulverakkumulation an den Rändern zu vermeiden, wurden Abstreifer auf mindestens einer Seite des Walzenrecoaters angebracht, welche das überschüssige Pulver geregelt in Überlaufbehälter verschoben. So wird der Druckkopf vor Pulverpartikeln geschützt.

Ein weiteres auftretendes Fehlerbild war das Aufschwingen der y-Achse, was auf eine unzureichende Lagerung der Achse zurückzuführen war. In einer ersten Ausbaustufe wurde eine Ausgleichsmasse eingebaut, was die Schwingungen erheblich reduzierte. Um jedoch die Schwingung vollständig zu eliminieren, war eine erweiterte Lagerung nötig. Diese war vorerst fliegend ausgelegt, später wurde auf eine klassische Anordnung zurückgegriffen und die Welle an der dem Motor entgegengesetzten Seite zusätzlich gelagert.

Ein weiterer Defekt trat auf, wenn der Druckkopfwinkel, wie unter Abschnitt 4.3.3 beschrieben, nicht korrekt und dem Baufeld entsprechend eingestellt war. Der Druckkopf verfährt in Streifen über die Ebene, was bei falscher Einstellung des Winkels eine Überlappung oder eine Trennung zwischen den Streifen zur Folge hat. In letzterem Fall kommt es zu einer Spaltung des Bauteils, also einem Bruch der Probe entlang eines Streifens, wie in Abbildung 4.13 zu sehen, während bei Überlappung ein ungleichmäßiger Bindereintrag zur Schwächung des Bauteils führt.

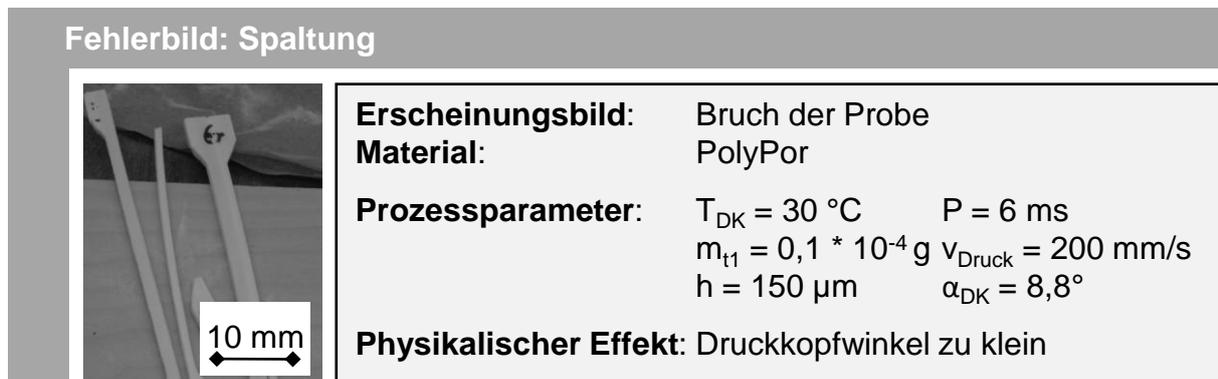


Abbildung 4.13: Fehlerbild: Spaltung;  
Erscheinungsbild, Material und eingestellte Prozessparameter sowie physikalischer Effekt

In der Fehlerkategorie **Material** konnten Düsenausfälle beobachtet werden, welche zur Folge hatten, dass Bahnen nicht gedruckt wurden. Diese Störung des Druckkopfes hatte einen geringeren Bindereintrag im Material zur Folge. Wenn in jeder Schicht die gleiche Düse ausfiel, resultierte es in der Spaltung des Bauteils (vgl. Abbildung 4.14), da in der kommerziell erhältlichen Software jede Düse des Druckkopfes in jeder Schicht in der

gleichen Bahn verfährt. Zur Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Spaltung wurde die Baujob-steuernde Software angepasst. Nach der Software-Adaption wurde in jeder Bahn und jeder Bauteilebene mit einer andere Düse begonnen. Der Berechnung liegt ein Algorithmus zugrunde, der einen möglichst großen Abstand zwischen die Startdüsen jeder Schicht legt.

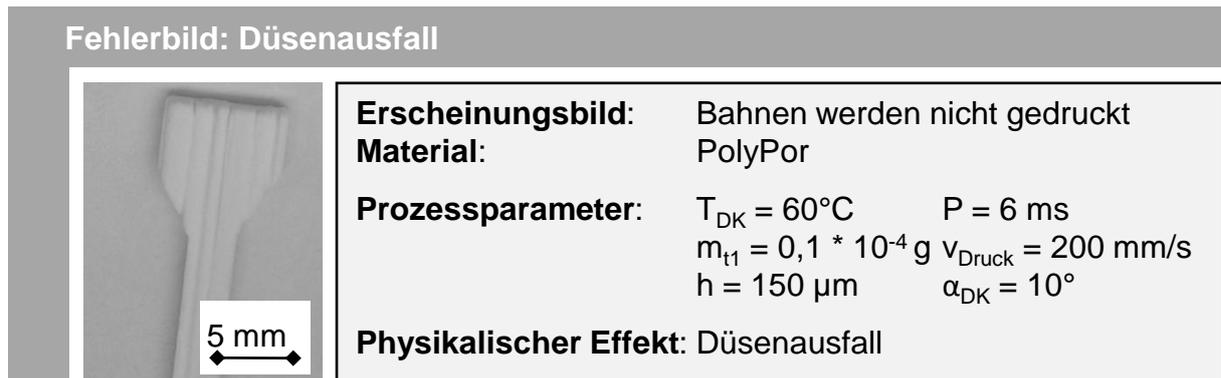


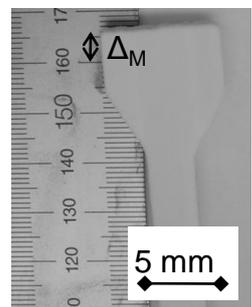
Abbildung 4.14: Fehlerbild: Düsenausfall;  
 Erscheinungsbild, Material und eingestellte Prozessparameter sowie physikalischer Effekt

In der Kategorie **Baujobvorbereitung** gab es weitere relevante Fehlerbilder. Abbildung 4.15 legt die eintretende Maßabweichung dar, welche sich dadurch zeigt, dass der Zugstab 166 mm statt 160 mm lang ist. Diese war auf Fehler in der Baujobvorbereitung bezüglich der Auflösung von PBM-Dateien und Druckkopf zurückzuführen.

Der auftretende Volumenschwund (vgl. Abbildung 4.16 und 4.17) ist, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, die Folge einer Polymerisationsreaktion. Schwund tritt in jeder Schicht zeitlich versetzt ein, wodurch sog. *Curling* und *Nasen* entstehen. Curling ist eine Aufbiegung der Probe durch ungleichmäßiges Aushärten der Schichten, welche auf der Unterseite der Probe startet. Zusätzlich bildeten sich an den oberen Bereichen Nasen, also eine kleine Verlängerung der Probe (vgl. Abbildung 4.17). Diese Probleme konnten durch bekannte Prozessstrategien nicht ausgeschaltet werden. Die Minimierung dieser Effekte ist das Ziel in der Prozesssimulation.

Wie bei allen Schichtbauverfahren kommt es auch beim 3D-Drucken zum Treppenstufeneffekt (vgl. Abbildung 4.18). Dieser ist durch eine treppenartige Bauteiloberfläche gekennzeichnet. Ihm konnte lediglich durch geschickte Platzierung im Bauraum oder eine Änderung der Schichtstärke begegnet werden. Denkbar ist es, die Schichtstärke automatisiert je nach benötigter Genauigkeit durch anforderungsgerechtes Slicen der Baudaten anzupassen. D. h. die Auflösung wird in z-Richtung je nach Krümmung der Oberfläche ausgeglichen. Wird eine größere Genauigkeit gefordert, sind die Schichthöhen niedriger. Dies erhöht sowohl die Baugeschwindigkeit als auch die Genauigkeit in z-Richtung, wie

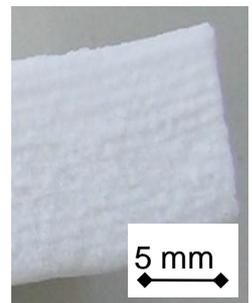
**Fehlerbild: Maßhaltigkeit**



|                               |                                       |                               |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Erscheinungsbild:</b>      | Probe ist zu lang                     |                               |
| <b>Material:</b>              | PolyPor                               |                               |
| <b>Prozessparameter:</b>      | $T_{DK} = 30\text{ °C}$               | $P = 6\text{ ms}$             |
|                               | $m_{t1} = 0,1 \cdot 10^{-4}\text{ g}$ | $v_{Druck} = 200\text{ mm/s}$ |
|                               | $h = 150\text{ }\mu\text{m}$          | $\alpha_{DK} = 10^\circ$      |
| <b>Physikalischer Effekt:</b> | Auflösung nicht korrekt               |                               |

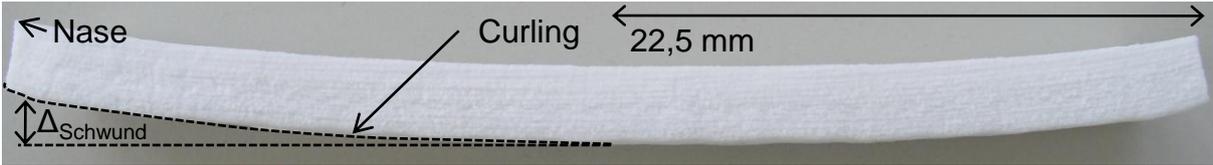
Abbildung 4.15: Fehlerbild: Maßabweichung  $\Delta_m$ ;  
Erscheinungsbild, Material und eingestellte Prozessparameter sowie physikalischer Effekt

**Fehlerbild: Schwund**



|                               |                                       |                               |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Erscheinungsbild:</b>      | Probe nach oben gebogen               |                               |
| <b>Material:</b>              | PolyPor                               |                               |
| <b>Prozessparameter:</b>      | $T_{DK} = 30\text{ °C}$               | $P = 6\text{ ms}$             |
|                               | $m_{t1} = 0,1 \cdot 10^{-4}\text{ g}$ | $v_{Druck} = 200\text{ mm/s}$ |
|                               | $h = 150\text{ }\mu\text{m}$          | $\alpha_{DK} = 10^\circ$      |
| <b>Physikalischer Effekt:</b> | Curling                               |                               |

Abbildung 4.16: Fehlerbild: Schwund;  
Erscheinungsbild, Material und eingestellte Prozessparameter sowie physikalischer Effekt



$\Delta_{Schwund}$ : Aufbiegung der Probe durch Schwund       $d_{Probe}$ : Probendicke

Abbildung 4.17: Darstellung von Curling und Nasen durch Schwund und ungleichmäßiges Aushärten der Schichten beim 3D-Druckprozess

von MARTHA & KÖHLER (2011) gezeigt. Eine gute Platzierung im Bauraum ist dadurch charakterisiert, dass Oberflächen mit der geringsten Krümmung in z-Richtung gebaut werden.

Im Zusammenhang mit dem Multimaterialmodul traten vier Fehler auf. Dazu gehörten das Sedimentieren der Feststoffe am Boden und die Abgabe zu großer oder zu kleiner Tropfenvolumina. Auch das Verblasen des Pulvers durch Druckluft und ein Verlaufen der Tropfen (in Abhängigkeit von der Entfernung über dem Pulverbett) konnten beobachtet werden.

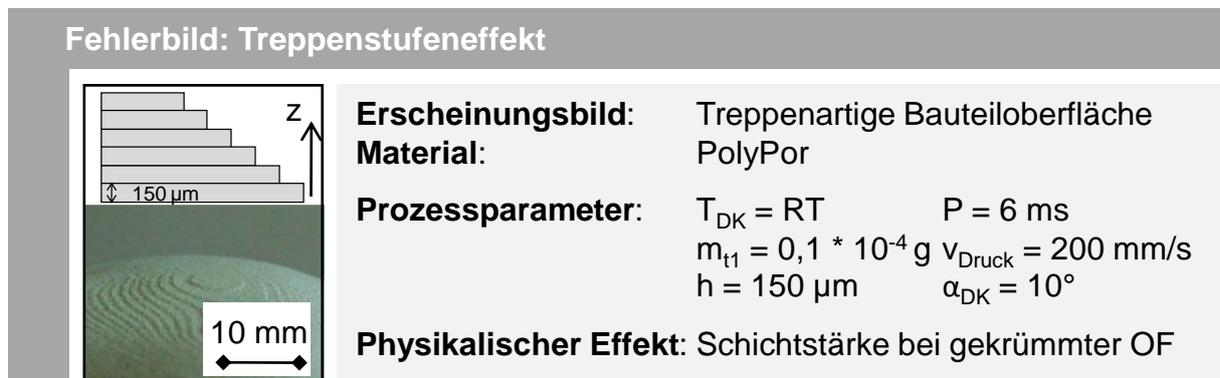


Abbildung 4.18: Fehlerbild Treppenstufeneffekt;

Erscheinungsbild, Material und eingestellte Prozessparameter sowie physikalischer Effekt mit OF: Oberfläche

Ein Sedimentieren der Feststoffe am Boden konnte durch den Rührmechanismus weitgehend verhindert werden. Wurde die Suspension nach dem Prozess in der Kartusche gelagert, trocknete diese jedoch in der Kanüle ein. Sie ist daher entsprechend zu wechseln.

Die Abgabe zu großer oder zu kleiner Tropfen ist in erheblichem Maße vom Kanüledurchmesser sowie von Druckstoßstärke und -dauer abhängig. Die in Abschnitt 6.4 durchgeführten Untersuchungen belegen die Eignung nur eines Durchmessers pro Material, welcher immer Punkte gleichen Durchmessers erzeugt. Bei der Wahl von Kanülen mit zu kleinen oder zu großen Durchmessern wurde entweder die gesamte in der Kartusche enthaltene Suspension auf einmal ausgegeben oder die Kanüle verstopfte. Daher konnte kein Material mehr platziert werden. Der Einfluss des Kanüledurchmessers ist somit größer als der von Druckstoßstärke und -dauer.

Ein Verblasen des Pulvers, also das Durcheinanderwirbeln des losen Pulvers der Bauebene durch Druckluft, tritt auf, wenn mit der Suspension zusätzlich Luft ausgegeben wird. Dies kann durch Bevorratung einer ausreichend großen Menge der Suspension in der Kartusche verhindert werden. Ein Verlaufen der Tropfen, was die Präzision des Auftrags mindert, tritt bei zu großem Abstand zwischen Kanüle und Pulverbett auf.

### 4.3.5 Industrielle Umsetzung

Die oben genannten Fehlerbilder führten zu einem Umbau des 3D-Druck-Demonstrators und somit zur Eliminierung der Probleme. Darüber hinaus wurden industrielle Anforderungen gesammelt und ergänzend ein kommerzieller Anlagenprototyp mit der Firma Voxeljet Technology GmbH aufgebaut. Dieser basiert auf den Grundkomponenten der Maschine vom Typ VX500, welche in Serie gebaut wird. Die Funktionalität des Demonstrators wurde durch einen wesentlich vergrößerten Bauraum (500 mm x 400 mm x 300 mm) erweitert. Dafür ist auch ein größerer Pulver- und Bindervorrat notwendig. Um ein automatisiertes Bauen zu ermöglichen, wurde darüber hinaus beispielsweise eine Reinigungsstation für den Druckkopf eingebaut. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente wurden alle auf dem 3D-Druck-Demonstrator realisiert, weshalb der kommerzielle Prototyp an dieser Stelle nicht weiter erläutert wird.

## 4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Methode zur Materialqualifizierung vorgestellt, welche aus drei Modulen mit je zwei Submodulen besteht. Es wurden Prozess, Simulation und Material und deren Submodule (*Anlagentechnik*, *Parameter*, *Prozess-* und *Materialsimulation*, *Mono-* sowie *Multimaterial*) und *Interaktionen* beschrieben.

Des Weiteren wurde der 3D-Druckprozess als System und die notwendige Anlagentechnik dargelegt. Erläutert wurden der Aufbau des 3D-Druck-Demonstrators mit einem Bauraum von  $x = 250$  mm,  $y = 110$  mm und  $z = 95$  mm sowie das zusätzliche Multimaterialmodul mit den jeweils zugehörigen Prozessparametern mit Wertebereichen und aus Experimenten resultierenden Fehlerbildern. Defizite, welche durch eine Änderung der Anlagentechnik zu beheben sind, wurden beschrieben und Lösungen aufgezeigt. Zusätzlich wurden die angewendete Steuerungstechnik sowie notwendige Erweiterungen zur Prozessbefähigung für die Multimaterialverarbeitung ausgeführt. Die Anlagentechnik bildete die Grundlage für alle in den nächsten Kapiteln 6 bis 7 zu beschreibenden Versuchsreihen.

# 5 Material- und Prozesssimulation

## 5.1 Vorgehen im Kapitel

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Simulationen anhand ihres Aufbaus erläutert und daraus Schlussfolgerungen für ein bezüglich der mechanischen Eigenschaften und der Maßhaltigkeit optimiertes Material abgeleitet. Das kommerzielle Materialsystem PolyPor, welches mit dem im vorangegangenen Kapitel dargestellten 3D-Druck-Demonstrator verarbeitet wird, weist bei für das System untypischen Flüssigkeitseinträgen Probleme in der Maßhaltigkeit der Bauteile sowie in den mechanischen Eigenschaften auf. Letztere werden durch die chemische Reaktion des Materialsystems sowie den Aufbau des Materials bestimmt. Das Kapitel gliedert sich folglich in die Material- (Submodul *S2*) und die Prozesssimulation (Submodul *S1*), um Maßnahmen auf Basis von PolyPor für ein neuartiges Material abzuleiten. Erstere wird auf Basis einer Multiskalenmodellierung (Mikro-Makro-Simulation) durchgeführt, um die notwendigen Materialeigenschaften zu ermitteln und anschließend das Werkstoffverhalten nachzubilden und gezielt zu ändern. Dafür wird ein Materialmodell erstellt und durch Variation der Parameter wird das Werkstoffverhalten verbessert. Darauffolgend wird in einem zweiten Ansatz der Prozess nachgebildet und die schichtweise Schwindung und der daraus resultierende Verzug modelliert. Die daraus abgeleiteten Maßnahmen ermöglichen eine verbesserte Maßhaltigkeit. Die Ergebnisse dieses Kapitels sind Grundlagen für ein optimiertes Material bezüglich der mechanischen Eigenschaften und der Maßhaltigkeit unter Beachtung der Partikelverteilung, des Bindereintrags, der Schichtstärke und des Schwindverhaltens.

## 5.2 Materialsimulation auf multiplen Skalen

### 5.2.1 Allgemeines

Die Simulation des Materialverhaltens wird auf multiplen Skalen durchgeführt. Es kommen die kommerziellen Programme *Digmat 3*, eine Software zur Multiskalensimulation, und *ANSYS 11.0*, eine Software auf Basis der FEM, zum Einsatz. Dabei wird in einem ersten Schritt das Materialsystem PolyPor mit *Digmat MF*, einem Modul zur Homogenisierung der Materialeigenschaften des Programms *Digmat*, modelliert und so können mit Hilfe des Reverse Engineering einige Werkstoffkennwerte des Binders wie beispielsweise der Elastizitätsmodul ermittelt werden. Anschließend werden unter Variation verschiedener Werkstoffparameter wie Bindereintrag, Korngrößenverteilung etc. unterschiedlichste Mikrostrukturmodelle von PolyPor und modifizierten Systemen erzeugt. Diese und die Daten des Reverse Engineering werden anschließend genutzt, um mit *Digmat FE*, einem Modul

zur Generierung von Mikrostrukturen des Programms Digimat, erzeugte Materialmodelle in ANSYS auf ihre mechanischen Eigenschaften hin zu untersuchen und bezogen auf ihre Werkstoffparameter zu verbessern. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 5.1 skizziert und wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

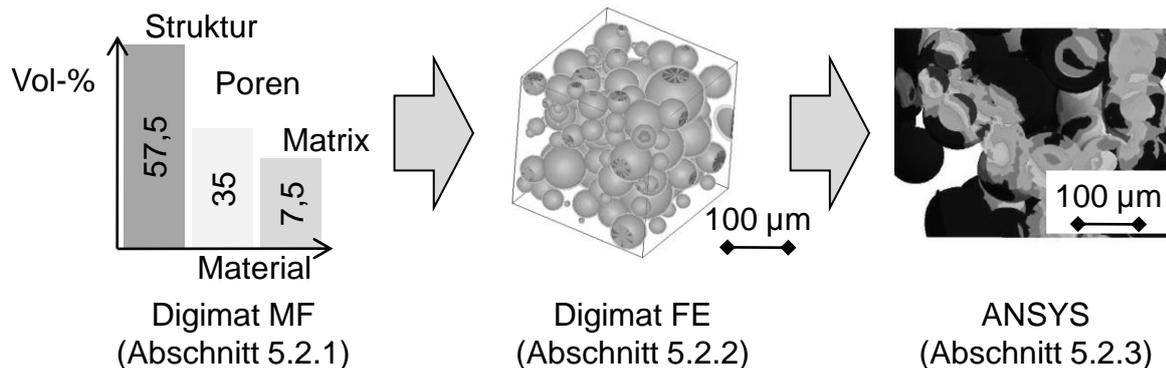


Abbildung 5.1: Modellvorstellungen eines Materials in Digimat MF und FE sowie ANSYS nach ZÄH & KELLNER (2010);

Vorgehensweise zur Simulation des Materialverhaltens auf multiplen Skalen mit Verweis auf die entsprechenden Abschnitte

### 5.2.2 Homogenisierung

Nach MORI (2001) ist die Homogenisierung die Schaffung einer möglichst gleichmäßigen Struktur des virtuellen Modells. Die *Mori-Tanaka-Methode* ist eine Feldtheorie, welche auf den elastischen Lösungen für Inhomogenitäten in infiniten, also grenzenlosen, Volumina nach *Eshelby* basiert. In der Materialwissenschaft wird die Eshelby-Theorie zur Berechnung von Verzerrungsenergie genutzt. Dieser Ansatz wurde von MORI (2001) weiterentwickelt, um Tensoren vierter Ordnung von Systemen zu berechnen, welche aus Matrix und Einschlüssen bestehen. Dabei wird eine durchschnittliche Dehnung beider Materialkomponenten angenommen und deren Auswirkungen auf das Gesamtmaterial berechnet. Digimat-MF ist eine Software, welche eine *Mean-Field-Homogenisierung* mit der Mori-Tanaka-Methode durchführt, um nichtlineares Verhalten von mehrphasigen Materialien zu berechnen. Eine Mean-Field-Homogenisierung berechnet ein System miteinander in Wechselwirkung stehender Teilchen. Das externe Feld wird dabei als konstant angenommen, wobei dieses gewählt werden muss. So kann der Einfluss der Teile im System berechnet werden.

Das nach dem 3D-Drucken feste Materialsystem (PolyPor) besteht aus drei Phasen mit Realitäts-naher Verteilung:

- 7,5 % Binder (Matrix)
- 57,5 % PMMA (Struktur)

- 35 % luftgefüllte Poren

Das sphärische Pulver des Kunststoffes Polymethylmethacrylat (PMMA) wurde lokal an den Grenzflächen mit einem Binder verklebt. Aufgrund der Schüttdichte der sphärischen Partikel bestand eine Restporosität von etwa 35 %, der Bindereintrag betrug 7,5 %. Der Bindereintrag wurde für die nachfolgenden Experimente mit einer Waage gemessen.

Zur Berechnung des homogenisierten Materials wurden für die polymere Struktur eine linear-elastische und für die Binder-Matrix eine nichtlineare Verformung angenommen, welche sich isotrop verfestigt. Es ist notwendig, die mechanischen Eigenschaften von mindestens zwei der Phasen und des Gesamtsystems zu kennen, um die resultierenden Eigenschaften der dritten Phase mit Hilfe des *Reverse Engineering* zu errechnen. In diesem Fall wurden die Charakteristika des Binders angenommen und gemeinsam mit denen der anderen Phasen in die Simulation des Gesamtmaterials gegeben. Nach Abschluss der Berechnung wurde das modellierte resultierende System mit dem aus dem Zugversuch bekannten abgeglichen. Dieser Vorgang wurde iterativ wiederholt, bis beide Modelle kongruent sind. Die zur Übereinstimmung gewählten Eigenschaften des Binders entsprechen dann den realen Bedingungen. Mit Hilfe der Software Digimat und des Programmmoduls MF wurde dafür ein Materialmodell des kommerziellen 3D-Druck-Werkstoffs PolyPor aufgebaut und mit der Mean-Field-Homogenisierung berechnet.

So ergibt sich das in Abbildung 5.2 dargestellte Materialmodell der einzelnen Phasen (Matrix, Struktur und Poren). Für die Homogenisierung wird lediglich die prozentuale Verteilung der relativen Anteile der Phasen berücksichtigt, die Größe der einzelnen Volumina jedoch nicht.

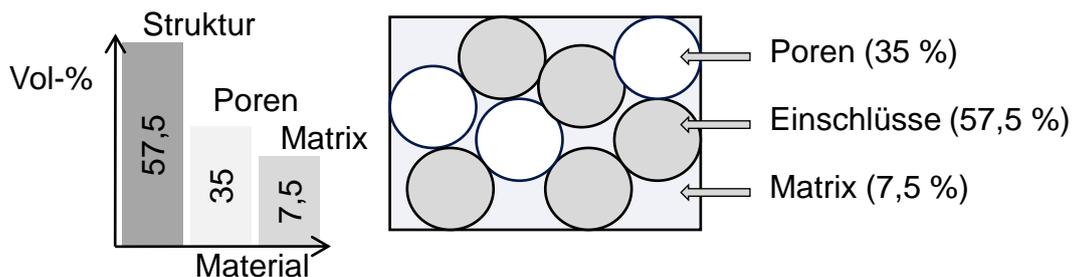


Abbildung 5.2: Modellvorstellung eines Materials in Digimat MF

Die Materialeigenschaften des PMMA, der Poren und des Gesamtmaterials PolyPor sind aus der Literatur oder eigenen Versuchen bekannt. Für die Simulation werden also folgende Werte für den E-Modul  $E_t$  und die Poissonzahl  $\nu$  angenommen:

|             |                          |             |
|-------------|--------------------------|-------------|
| <b>PMMA</b> | $E_t = 3200 \text{ MPa}$ | $\nu = 0,3$ |
| <b>Luft</b> | $E_t \ll 1 \text{ MPa}$  | $\nu = 1$   |

Die Eigenschaften des verfestigten Binders waren nicht bekannt und wurden somit als zu modellierende Phase angenommen. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus dem Zugversuch von PolyPor (vgl. Abbildung 5.3) wurde für die Simulation ebenfalls benötigt, wobei die relevanten Parameter neben dem E-Modul  $E_t$  die Bruchspannung  $\sigma_B$  sowie die Zugfestigkeit  $\sigma_m$  und die zugehörigen Dehnungen  $\epsilon_B$  und  $\epsilon_m$  waren:

**PolyPor**       $E_t = 400 \text{ MPa}$        $\epsilon_B = \epsilon_m = 1,1 \%$        $\sigma_B = \sigma_m = 3,2 \text{ MPa}$

Unter Anwendung der Mori-Tanaka-Methode und Variation der mechanischen Eigenschaften ( $E_t, \nu$ ) des Binders wurde das modellierte Spannungs-Dehnungs-Diagramm (vgl. Abbildung 5.3) mit Hilfe von Digimat MF der im Versuch ermittelten Kurve angenähert (sog. fitting). Bei ausreichender Übereinstimmung werden die Binderkennwerte ausgegeben. Dieses Modell berücksichtigt keine unterschiedliche Korngrößenverteilung, sondern nur, wie oben beschrieben, die prozentualen Anteile der Phasen.

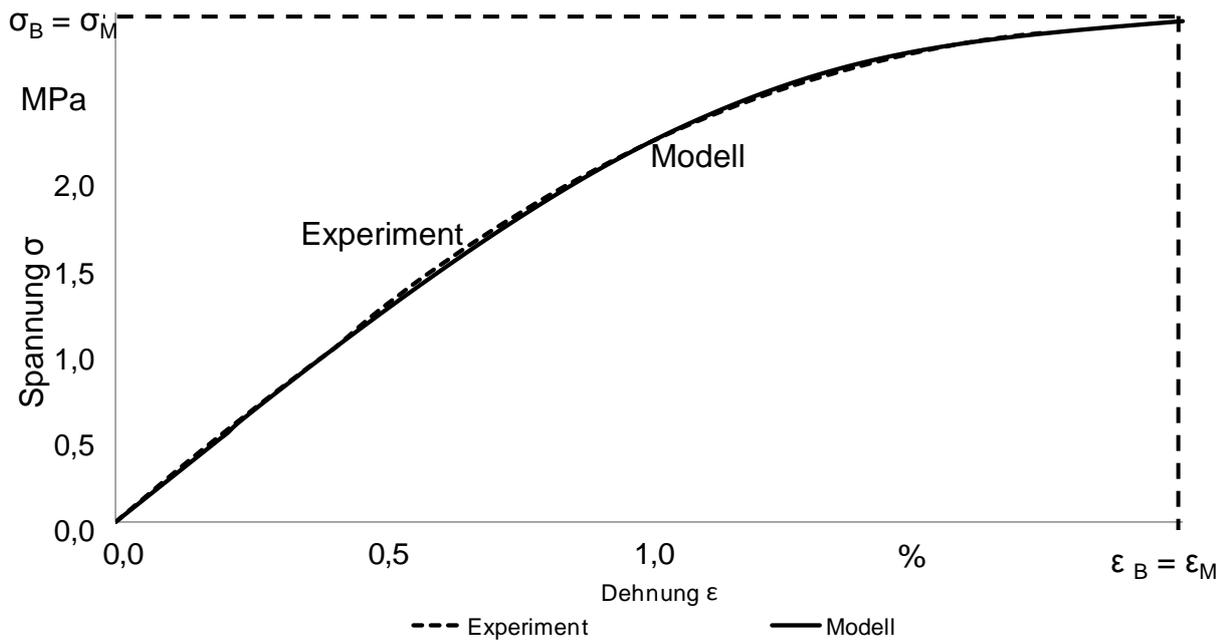


Abbildung 5.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PolyPor aus Modell und Experiment nach ZÄH & KELLNER (2010)

Mit den Methoden Reverse Engineering und Mori-Tanaka konnten die Eigenschaften des Binders wie folgt bestimmt werden:

**Binder**       $E_t = 18 \text{ MPa}$        $\nu = 0,3$

Die in Abbildung 5.4 skizzierten Kurven zeigen den Verlauf des Gesamtmaterials PolyPor, getrennt nach Phasen und damit die sehr unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Auch das homogenisierte Modell ist dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass der E-Modul des Binders geringer ist als der des Gesamtmodells und insbesondere als der des PMMA.

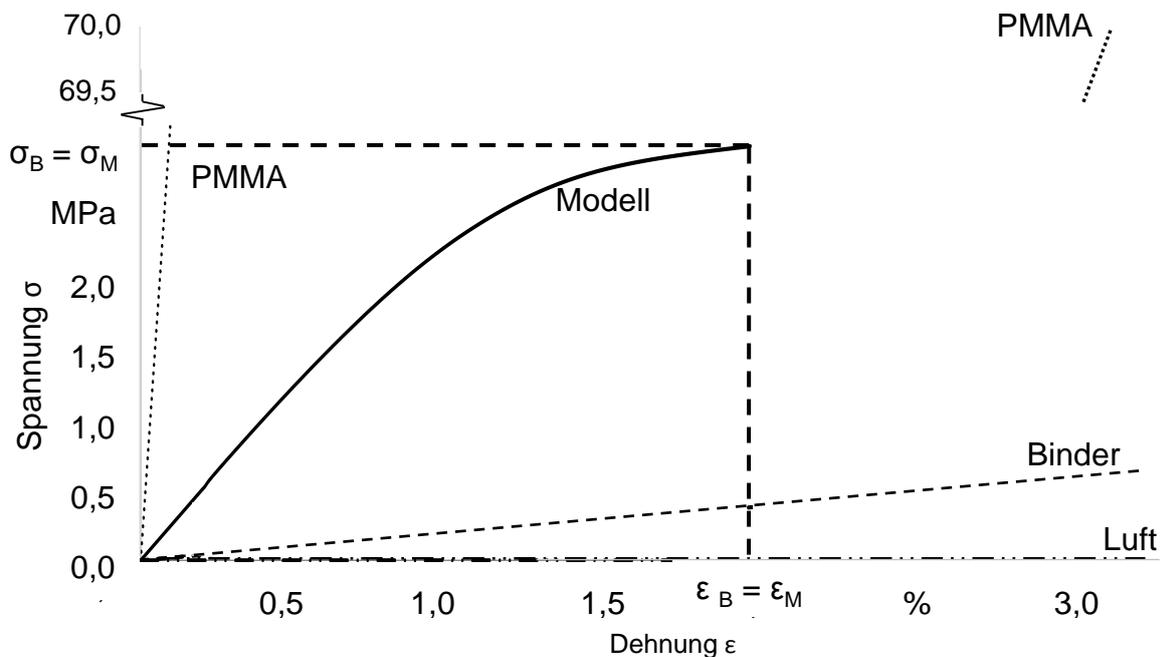


Abbildung 5.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der modellierten Komponenten von PolyPor nach ZÄH & KELLNER (2010)

Die Spannungs-Dehnungs-Kurve des PMMA weist die für spritzgegossenes PMMA übliche Steifigkeit auf. Völlig anders sind die Eigenschaften von Luft, für die ein E-Modul von « 1 MPa vorgegeben wurde, da Dehnung von Luft unendlich aufgenommen werden kann, weil die Luft wegen der offenen Porosität ungehindert entweichen kann. Ein Wert von  $E_t = 0$  kann nicht vorgegeben werden, da das Modell dann nicht mehr konvergent ist. Die Steifigkeit des Binders ist ebenfalls sehr niedrig und sie war gemeinsam mit der hohen Porosität ausschlaggebend für die insgesamt geringe Steifigkeit der Gesamtstruktur PolyPor.

Der niedrige E-Modul des Binders gegenüber PolyPor war erwartet worden und wurde durch REM-Aufnahmen der Bruchfläche eines Zugstabs aus PolyPor bestätigt (siehe Abbildung 5.5). Es ist deutlich zu erkennen, dass das Material immer an der Übergangsfläche von Partikel zu Partikel, also im Binder, bricht.

Die ermittelten Werte werden für die im nächsten Abschnitt 5.2.3 erläuterten Materialmodelle benötigt. Mit der gleichen Methode lassen sich auch die Eigenschaften des Binders der im Abschnitt 6.2 vorgestellten Materialien DikaDens und DikaPor ermitteln.

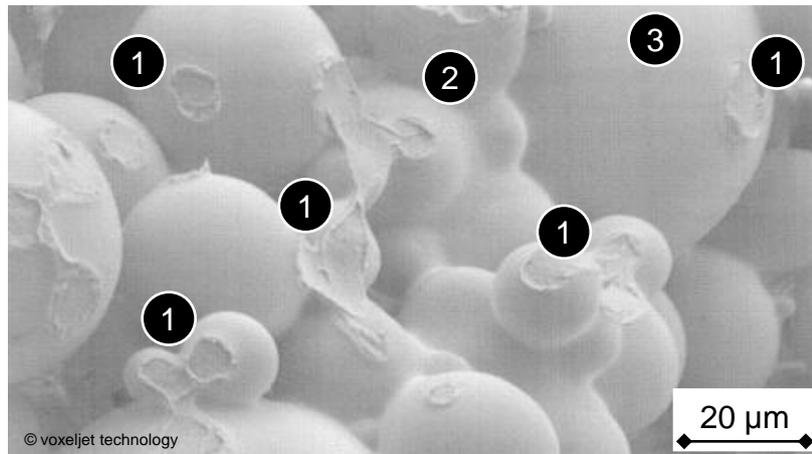


Abbildung 5.5: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines PolyPor-Zugstabes;  
1: Bruchflächen 2: verfestigter Binder  
3: von verfestigtem Binder umhüllte PMMA-Partikel

### 5.2.3 Materialstrukturaufbau

Um eine Materialstruktur zu erzeugen, welche als repräsentative Geometrie in ANSYS eingeladen werden kann, wurde das Programmmodul Digimat FE angewendet. Dieses ermöglicht die Erstellung dreidimensionaler Modelle in Form quaderförmiger repräsentativer Volumenelemente (RVE), welche im STEP- oder IGES-Format ausgegeben und in andere Programme wie beispielsweise ANSYS oder CATIA importiert werden können. Anschließend können die homogenisierten Materialeigenschaften aufgebracht werden.

Um den Einfluss unterschiedlicher Partikeldurchmesser und Bindereinträge abschätzen zu können, wurden fünf Modellreihen für Materialstrukturen generiert. Eine bildet die Eigenschaften von PolyPor (D), die anderen (A, B, C) virtuelle Charakteristika ab. Diese sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Dabei wurden Korndurchmesser, -verteilung und Bindereintrag variiert sowie die Korngrößenverteilung des in PolyPor verwendeten PMMA modifiziert und simulativ untersucht. Die erzeugten digitalen Materialstrukturen werden mit A5 bis E15 bezeichnet, wobei A bis E den Durchmesser und 5 bis 15 den Bindereintrag repräsentieren.

Bei den Reihen A bis C war der Durchmesser in der Simulation ( $d_{Simulation}$ ) konstant. In Reihe D entsprach die Partikelgrößenverteilung  $d_{Simulation}$  den Durchmessern der vorangegangenen Experimente mit PolyPor auf dem 3D-Drucker ( $d_{PMMA}$ ). Für Reihe E wurde ein  $d_{Simulation}$  analog zur Korngrößenverteilung des in PolyPor verwendeten PMMA angenommen und um 50 % reduziert. Für alle fünf Simulations-Reihen wurden mit den Bindereinträgen 5 %, 10 % und 15 % Modelle erzeugt.

Die Pulverkörner wurden im Modell mit Binderflüssigkeit umhüllt („gecoatet“), so dass der Eintrag zwischen 5 % und 10 % lag. So konnte die entstehenden Zwischenräume realitätsnah

| Reihe | $d_{Simulation}$ | Bindereintrag |      |      |
|-------|------------------|---------------|------|------|
|       |                  | 5 %           | 10 % | 15 % |
| A     | 10 $\mu m$       | A5            | A10  | A15  |
| B     | 45 $\mu m$       | B5            | B10  | B15  |
| C     | 200 $\mu m$      | C5            | C10  | C15  |
| D     | 10 - 200 $\mu m$ | D5            | D10  | D15  |
| E     | 5 - 100 $\mu m$  | E5            | E10  | E15  |

Tabelle 5.1: Bezeichnung der erzeugten Materialstrukturen A5 bis E15;

A bis E entsprechen der Korngrößenverteilung, 5 bis 15 repräsentieren den Bindereintrag

als Luft modelliert werden. Das Material aus Serienfertigungsverfahren wurde mit einem Bindereintrag von 15 % im Randbereich und 7,5 % im Bauteilinneren bedruckt. Abbildung 5.6 zeigt ein Modell mit einem Partikeldurchmesser  $d_{Partikel}$  von 10 bis 200  $\mu m$  und einem Bindereintrag von 10 % (Reihe B, Versuch B10, also die reale Korngrößenverteilung). Das hellgraue Coating der Partikel mit Binder ist gut erkennbar. Zudem wurde das PMMA-Pulver durch den Binder angelöst, was beim Verkleben eine Überschneidung von etwa 10 % zur Folge hatte. Das Volumen der RVEs wurde an die Korngrößen angepasst.

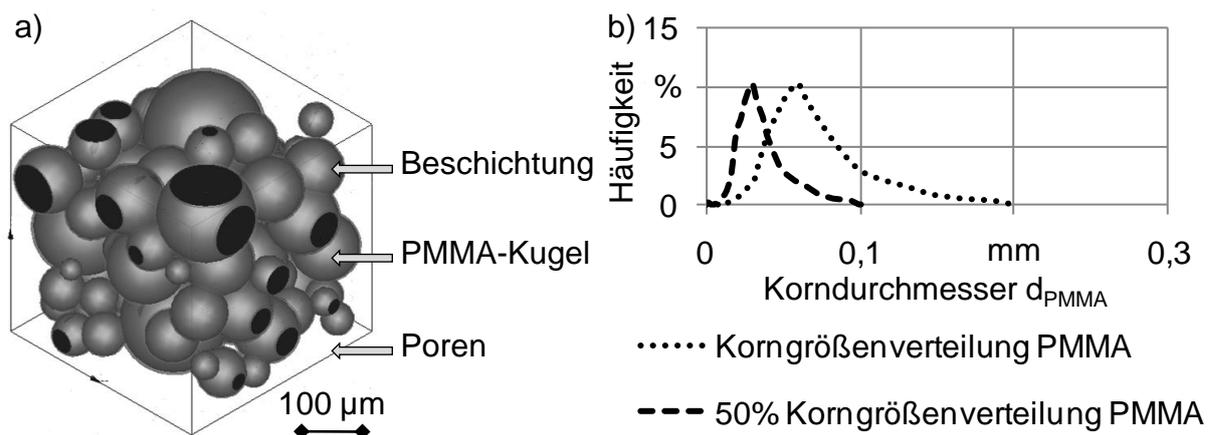


Abbildung 5.6: a) Materialmodell mit einem Partikeldurchmesser  $d_{Partikel}$  von 10 bis 200  $\mu m$  und einem Bindereintrag von 10 % (D10)

b) Korngrößenverteilung des PMMA-Pulvers

Dieser Effekt ist in der REM-Aufnahme in Abbildung 5.7 gut erkennbar. Links ist die Materialstruktur der realen ebenfalls sphärischen Korngrößenverteilung bei einem Bindereintrag von 7,5 % bis 10 % sichtbar, was in etwa der Reihe D10 entspricht. Rechts ist die Überschneidung der Partikel sowie das Umhüllen der Kugeln mit verfestigtem Binder deutlich zu erkennen. Die Nahtstelle zwischen zwei Elementen wird mit Binder umhüllt.

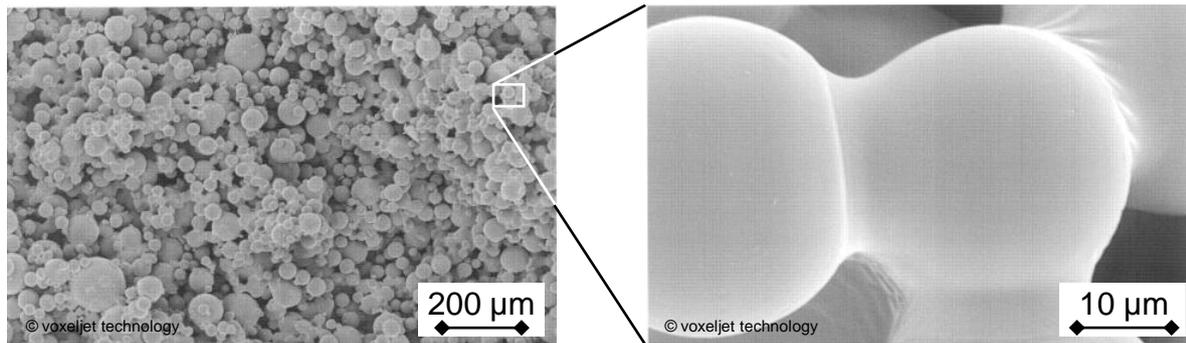


Abbildung 5.7: REM-Aufnahme des PolyPor-Materials und Vergrößerung eines Ausschnitts mit von Binder umhüllten Partikeln

Bei den Modellreihen konnten unterschiedliche Raumfüllungsgrade (RFG) erreicht werden. Bedingt durch den in Digimat FE hinterlegten Algorithmus ist es jedoch nicht möglich, den realen Wert von 65 % zu erzeugen. Dieser ist kein Schüttgutalgorithmus, sondern die RVEs werden von der Mitte her aufgebaut. Dabei wird im ersten Schritt ein Partikel großen Durchmessers in der Mitte des Quaders abgelegt und dieser in zahlreichen Iterationsschleifen  $n_I$  gefüllt, bis keine Partikel mehr in die Lücken passen. Es wurden Raumfüllungsgrade zwischen 43 % und 54 % erreicht, zur Abschätzung der Materialeigenschaften in Abhängigkeit der variierten Parameter ist dies ausreichend. Abbildung 5.8 zeigt die erreichten Füllgrade *RFG* bei unterschiedlichen Bindereinträgen in Abhängigkeit der Modellreihen. Dabei wird deutlich, dass der Raumfüllungsgrad wie erwartet steigt, wenn die angewendeten Partikel eine variable Korngröße haben. Die durchgeführte Reduktion der Korngrößenverteilung um 50 % im Modell E wirkte sich gegenüber Modell D kaum auf den Raumfüllungsgrad aus. Zudem sank mit steigendem Bindereintrag der Raumfüllungsgrad.

Die in Digimat FE erstellten Modelle zeigen ein interessantes Charakteristikum: Nicht alle Partikel lagen im Endmaterial gebunden vor. Abbildung 5.9 stellt ein Beispiel eines Modells mit einem Füllgrad von 47,1 % dar, bei dem ca. 5 % der Partikel ungebunden existieren. Dies hat einen negativen Einfluss auf die Steifigkeit, da diese Partikel zwar theoretisch den Spannungsquerschnitt für einen Zugversuch erhöhen, jedoch im Experiment keine Kraft übertragen können, da ihnen die Verbindung zu den anderen Partikeln fehlt. Bei steigendem Bindereintrag nimmt die Zahl ungebundener Partikel ab. Eine vollständige Verfestigung kann erst bei Infiltration mit Binder, also einem Eintrag von etwa 40 %, erreicht werden, was 3D-Druck-technisch jedoch nicht realisierbar ist.

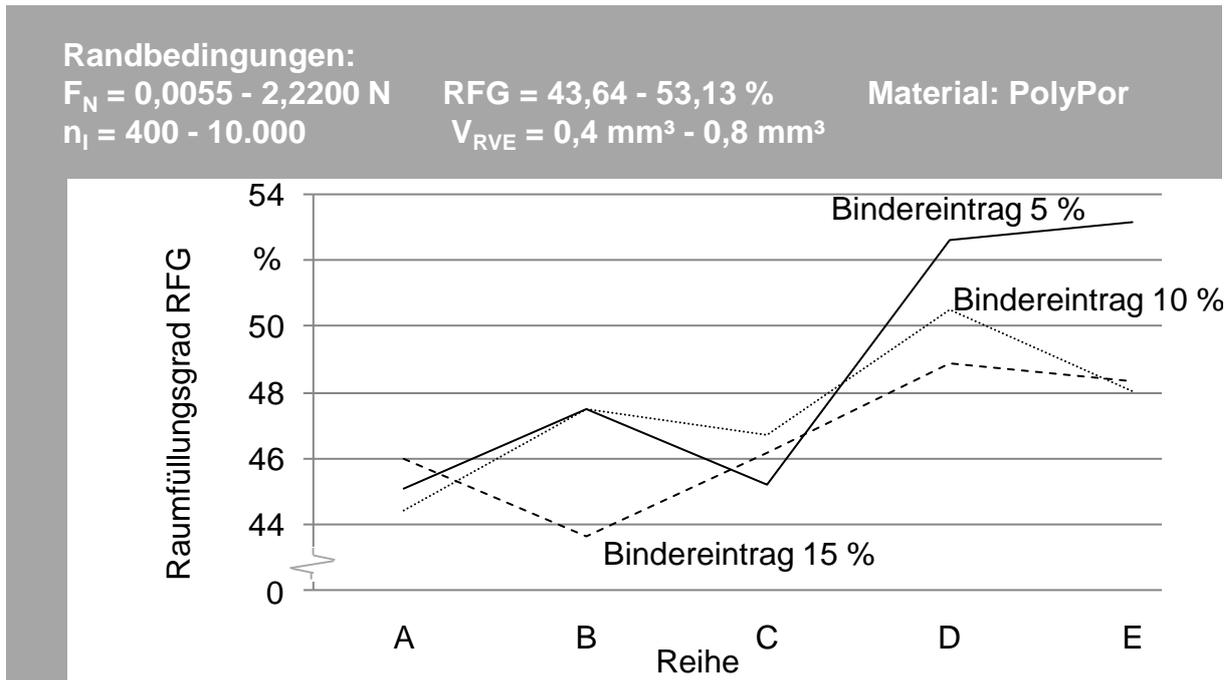


Abbildung 5.8: Raumfüllungsgrad der unterschiedlichen Modellreihen, bezogen auf die Korngrößenverteilung und den Bindereintrag mit den Randbedingungen für die Simulation

- A: Korndurchmesser  $10 \mu\text{m}$
- B: Korndurchmesser  $45 \mu\text{m}$
- C: Korndurchmesser  $200 \mu\text{m}$
- D: Korndurchmesser  $10 \text{ bis } 200 \mu\text{m}$
- E: Korndurchmesser  $5 \text{ bis } 100 \mu\text{m}$

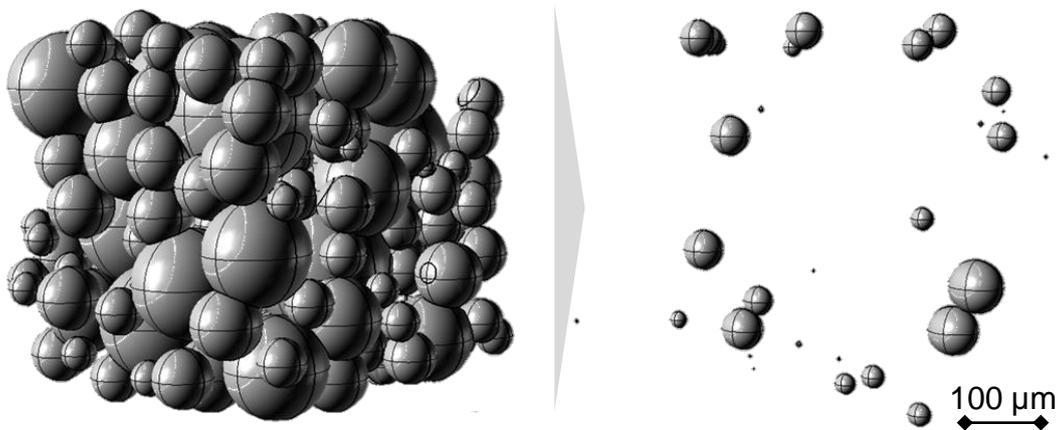


Abbildung 5.9: Materialmodell mit einem Füllgrad von 47,5 % (links), ungebundene Partikel (rechts) nach KELLNER & ZÄH (2011)

Somit konnten unterschiedliche Materialstrukturen erzeugt werden, welche im weiteren Verlauf für mechanische Analysen herangezogen werden. Zudem kann konstatiert werden, dass sich eine heterogene Korngrößenverteilung positiv auf den Raumfüllungsgrad auswirkt. Trotzdem ist nicht zu vernachlässigen, dass dieser keine Aussage über mit der Struktur verbundene Partikel zulässt. Da nicht alle Partikel verbunden sind, ist der reelle Raumfüllungsgrad ungebundener Teilchen in der Größenordnung von 5 bis 10 % niedriger.

### 5.2.4 Mechanische Belastungen

Mit Hilfe des Simulationssystems ANSYS kann der Einfluss unterschiedlicher Materialstrukturen auf das Materialverhalten untersucht werden, um daraus Rückschlüsse auf das Versagen zu ziehen. Die Materialstrukturen wurden als STEP-Datei aus Digimat exportiert und in ANSYS geladen. Das repräsentative Volumenelement wurde starr gelagert, mit einem Lastkollektiv beaufschlagt und der Kraftverlauf über die Partikel abgebildet. Die starre Lagerung fand durch zwei Platten mit Diamanteigenschaften statt. Durch Belastung unterschiedlicher Modelle konnten die Auswirkungen verschiedener Raumfüllungsgrade, Bindereinträge, Korngrößen und -verteilungen auf resultierende Spannungen und Dehnungen simuliert und eine geeignete Strategie zur gezielten Einstellung der Bauteileigenschaften durch Materialdesign auf RVE-Ebene abgeleitet werden.

Die in ANSYS importierten Geometrien der RVEs wurden in der x-y-Ebene gelagert, wobei die untere Ebene fixiert wurde, während die obere durch eine Zugbelastung translatorisch bewegt werden konnte (vgl. Abbildung 5.10 a)). So konnte auch die Einschnürung in der y-z-Ebene, also die Querkontraktion, abgebildet werden. Die angreifende Kraft  $F_N$  wurde auf die Modellgröße normiert und analog zum Zugversuch weggesteuert aufgebracht. Die Validierung der Simulation fand durch Vergleich der Längenänderungen im Zugversuch mit den modellierten Dehnungen statt. Alle im Rahmen der Materialsimulation angewendeten Werkstoffeigenschaften sind in Tabelle 10.2 im Anhang unter Abschnitt 10.2 zusammengefasst.

Da die größten Spannungen und auch der spätere Bruch im Bereich des verfestigten Binders, welcher die PMMA-Partikel umhüllt, auftraten, wurden Coating und Partikel einzeln vernetzt, wie in Abbildung 5.10 zu sehen ist. So konnte die Vernetzung des Binders feiner gestaltet und eine höhere Ergebnisgenauigkeit vor allem vor dem Hintergrund der sehr dünnen Beschichtungen mit Binder realisiert werden. Zudem konnten den beiden Phasen auf diese Weise unterschiedliche Materialeigenschaften zugewiesen werden, wie unter Abbildung 5.2.2 erläutert.

Abbildung 5.11 zeigt die Spannungsverteilung in der simulierten realen Materialstruktur (D10: Korndurchmesser 10 bis 200  $\mu\text{m}$ , Bindereintrag von 10 %). Im linken Bildteil a) ist in einem ebenen Schnitt durch ein RVE zu sehen, wie die Spannung sich innerhalb eines solchen über die Partikel verteilt. Dabei treten Spannungen von bis zu 30 MPa auf. Je nach Anbindungsstellen zwischen den Körnern konnten unterschiedliche Formationen (vgl.

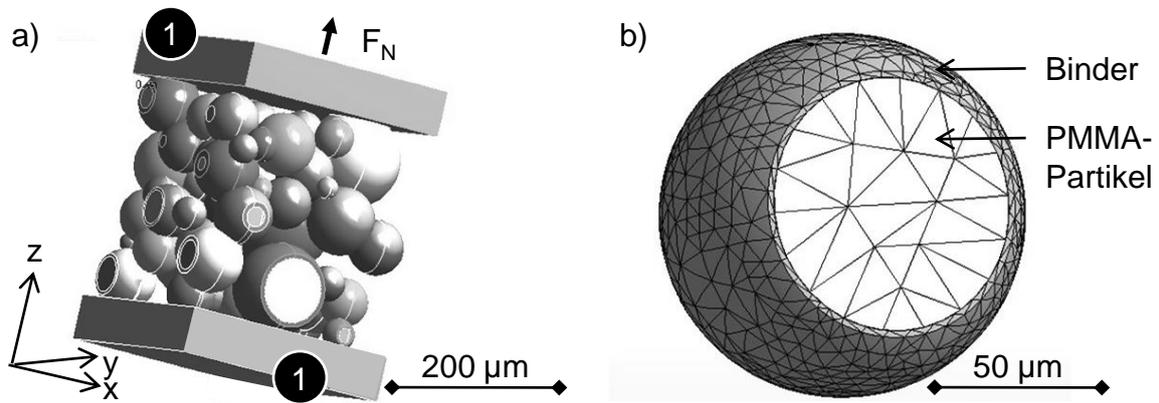


Abbildung 5.10: a) Zugrichtung und Kraftangriffspunkt an den Materialstrukturen;  
 b) Getrennte Vernetzung von Partikeln und Binder  
 1: Starrkörper

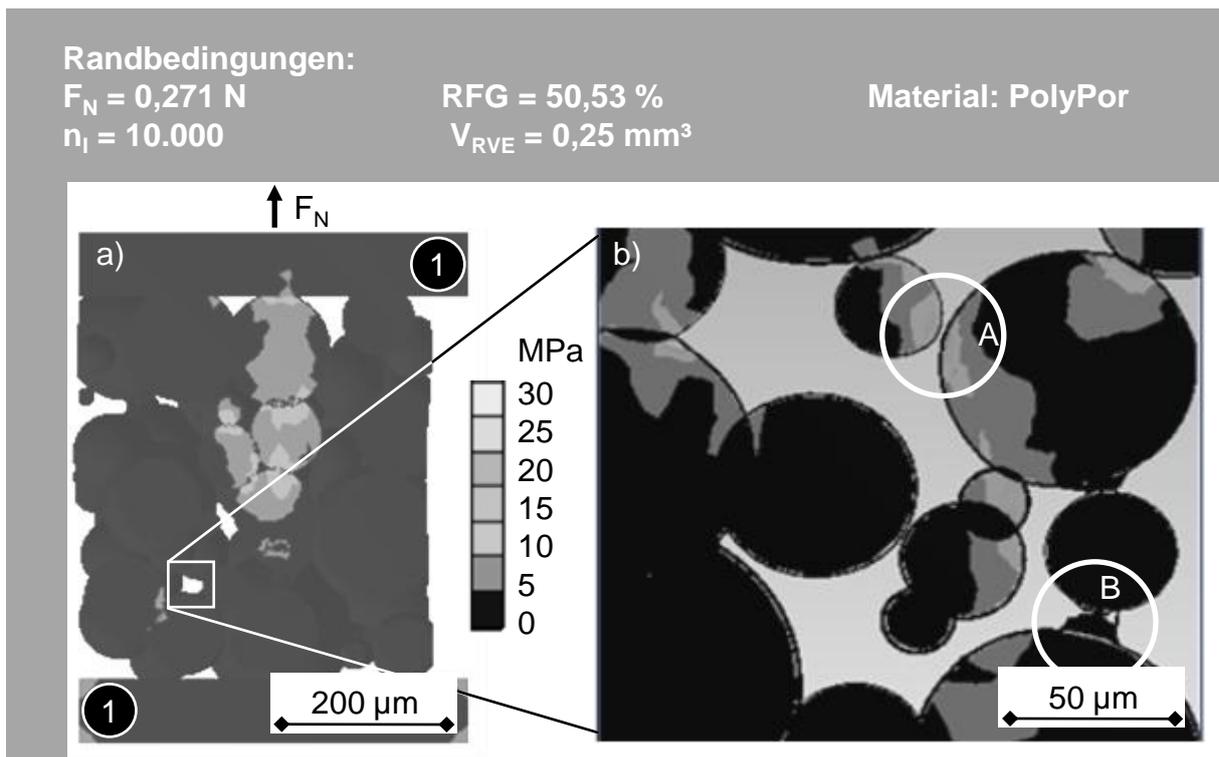


Abbildung 5.11: Spannungsverteilung in untersuchten Materialstrukturen mit den Randbedingungen für die Simulation;  
 a) Spannungsverteilung in einer Struktur D10;  
 b) Details der Spannungsverteilung;  
 A und B Charakteristika;  
 D: Korndurchmesser 10 bis  $200 \mu\text{m}$  und Bindereintrag 10 %

Abschnitt 5.2.5) beobachtet werden, welche erheblichen Einfluss auf die Steifigkeit des Gesamtmaterials haben. Die stark schwankende Partikel-Anordnung, welche über das Bauteil zwar verteilt auftrat, sich jedoch nicht unbedingt gegenseitig eliminierte bzw. ausglich, vermindert die Chancen, reproduzierbare Eigenschaften zu erhalten.

Im rechten Teil b) von Abbildung 5.11 ist eine Vergrößerung einer tiefer liegenden Ebene des RVEs aus 5.11 a) dargestellt. Die größten Spannungen traten jeweils an den Kontaktflächen zwischen zwei Partikeln auf. Dies entsprach den Erwartungen. Die Ursache ist die elastische Verformung des Binders unter dem Krafteinfluss. Dadurch wird die Kraft auf eine größere Fläche verteilt und die auftretende Spannung sinkt. Wegen der Definition der Flächen zwischen Binder und Struktur als Verbund können sich diese Grenzflächen nicht relativ zueinander verschieben.

Zu bedenken war, dass nur eine Ebene betrachtet wurde, der Kontaktpunkt der Partikel kann somit auch in geringem Abstand über oder unter der Schnittebene liegen. Dies ist an der mit „A“ markierten Stelle der Fall. Der einzeln vernetzte Binder ist als dunkle Beschichtung der Partikel zu erkennen. Der mit „B“ gekennzeichnete Bereich zeigt die Verformung des verfestigten Binders unter Belastung, wobei die modellierte Duktilität des Binders deutlich wird.

In Abbildung 5.12 ist die Verschiebung der Reihen D und E in  $\mu\text{m}$  dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Verschiebungen mit steigendem Bindereintrag meist leicht zunehmen. In x-Richtung der Reihe D betrug die Erhöhung der Dehnung beispielsweise  $1,4 \mu\text{m}$  (von  $2,1$  auf  $3,5 \mu\text{m}$ ). Deutlicher ist der Einfluss der Raumachsen zu erkennen. Die Verschiebungen in y-Richtung, also der Zugrichtung, waren am stärksten ausgeprägt und lagen mit  $5,5$  bis  $8 \mu\text{m}$  mehr als doppelt so hoch wie in x- bzw. z-Richtung ( $1,7$  bis  $3,5 \mu\text{m}$ ).

Dieser Effekt trat bei allen Modellreihen auf, wobei der Wert der Verschiebung variierte. Die Reihe E, bei der die Korngrößen um genau  $50\%$  verkleinert wurde, zeigt auch um etwa  $50\%$  reduzierte Verschiebungen. Bei konstantem Durchmesser stiegen die Verformungen mit der Korngröße an, da auch die Elemente größer sein mussten. Die Abhängigkeit von den Raumrichtungen bleibt bestehen. Schwankungen sind durch die unter Abschnitt 5.2.5 beschriebenen Strukturmodelle zu erklären. Für die Modellreihe D mit den besten Ergebnissen wurden exemplarisch Zugversuche durchgeführt, um die berechneten Verschiebungen zu validieren. Dabei wurde eine Abweichung zwischen den zwei Simulationen um den Faktor 2 festgestellt. Da die Modelle einen geringeren Raumfüllungsgrad hatten, als der Werkstoff in der Realität aufwies, ist dies erklärbar. Die Simulation ist somit hinreichend genau.

Spannungen von über  $100 \text{ MPa}$  traten in den repräsentativen Volumenelementen nur vereinzelt auf, wie Abbildung 5.13 deutlich macht. In dieser Grafik sind die Spannungen, die in allen Knoten eines Modells der Reihe D10 auftraten, bezogen auf ihre Häufigkeit aufgetragen. Die dargestellten Spannungen würden in der Realität zum Bruch führen. Dieses Modell ist jedoch weggesteuert aufgebaut, weshalb der maximale Spannungsverlauf angegeben wird.

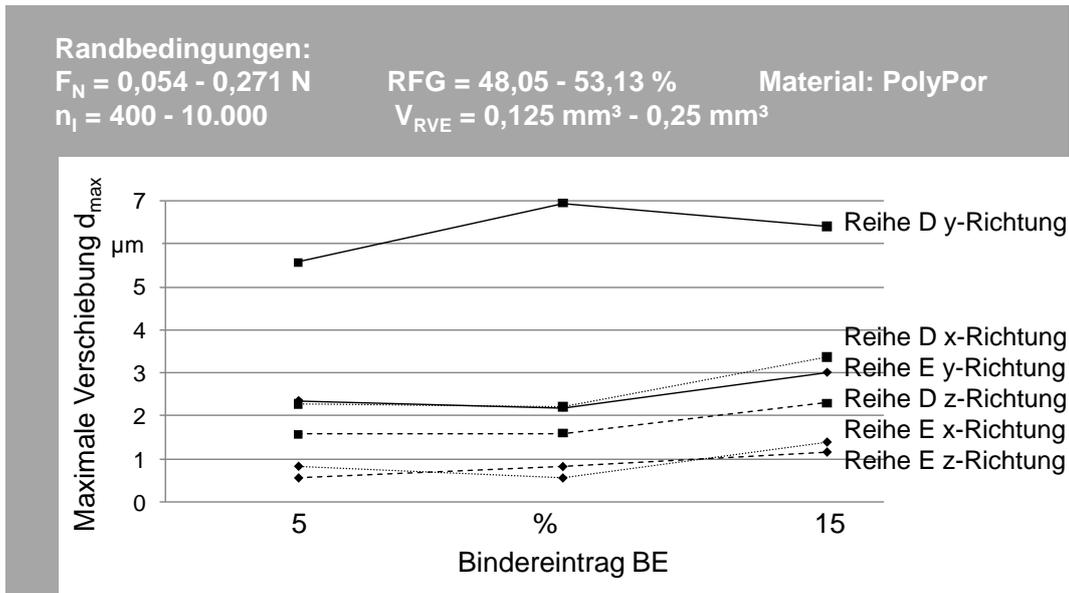


Abbildung 5.12: Maximal auftretende Verschiebung  $d_{max}$ , bezogen auf den Bindereintrag am Beispiel der Reihen D und E mit den Randbedingungen für die Simulation;

D: Korndurchmesser 10 bis 200  $\mu\text{m}$ ;

E: Korndurchmesser 5 bis 100  $\mu\text{m}$

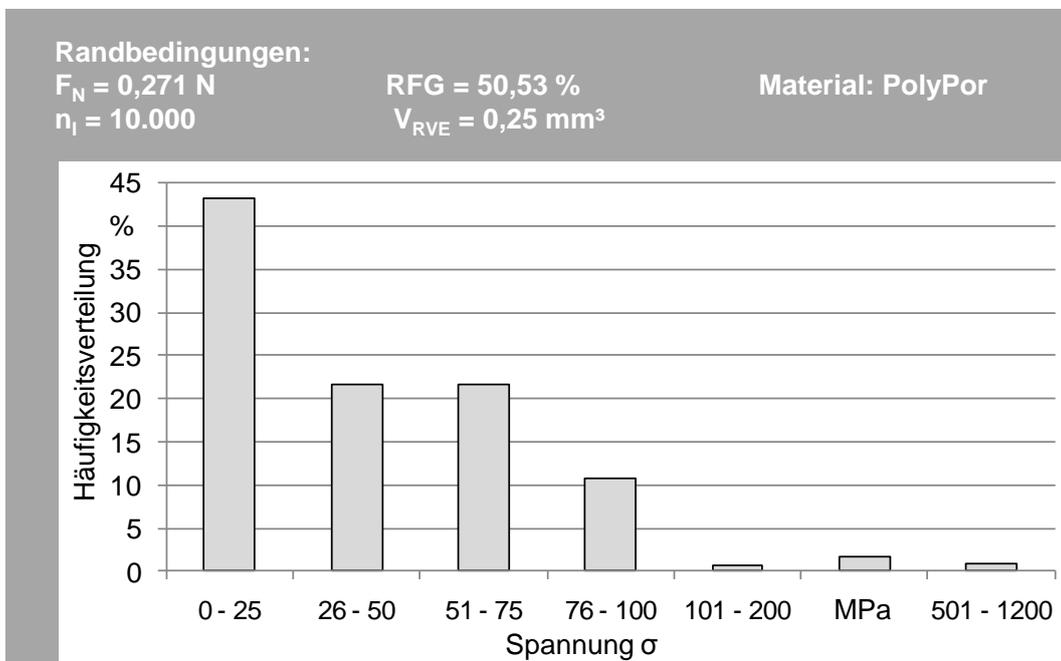


Abbildung 5.13: Häufigkeitsverteilung der Spannungen  $\sigma$  am Beispiel D10 mit den Randbedingungen für die Simulation nach ZÄH & KELLNER (2010);

D: Korndurchmesser 10 bis 200  $\mu\text{m}$  und Bindereintrag 10 %

Eine örtliche Zuordnung der Knoten war nicht möglich, Beobachtungen ergaben jedoch starke Schwankungen der lokalen Spannungen. Über 97 % und somit die große Mehrheit der in der Simulation auftretenden Spannungen war kleiner als 100 MPa. Lediglich knapp 1 % der Werte war größer 500 MPa. Bezüglich der Steifigkeit des entwickelten Materials ist jedoch nicht die Anzahl, sondern allein das Auftreten solch hoher Spannungen maßgebend, da sie zum Bruch führen. Eine optimale hybride Struktur minimiert die maximal auftretenden Spannungen und kann durch eine möglichst vielfältige Korngrößenverteilung erreicht werden.

Abbildung 5.14 zeigt die Auswirkung des Raumfüllungsgrades auf die maximal auftretenden Dehnungen  $\epsilon_{max}$ .

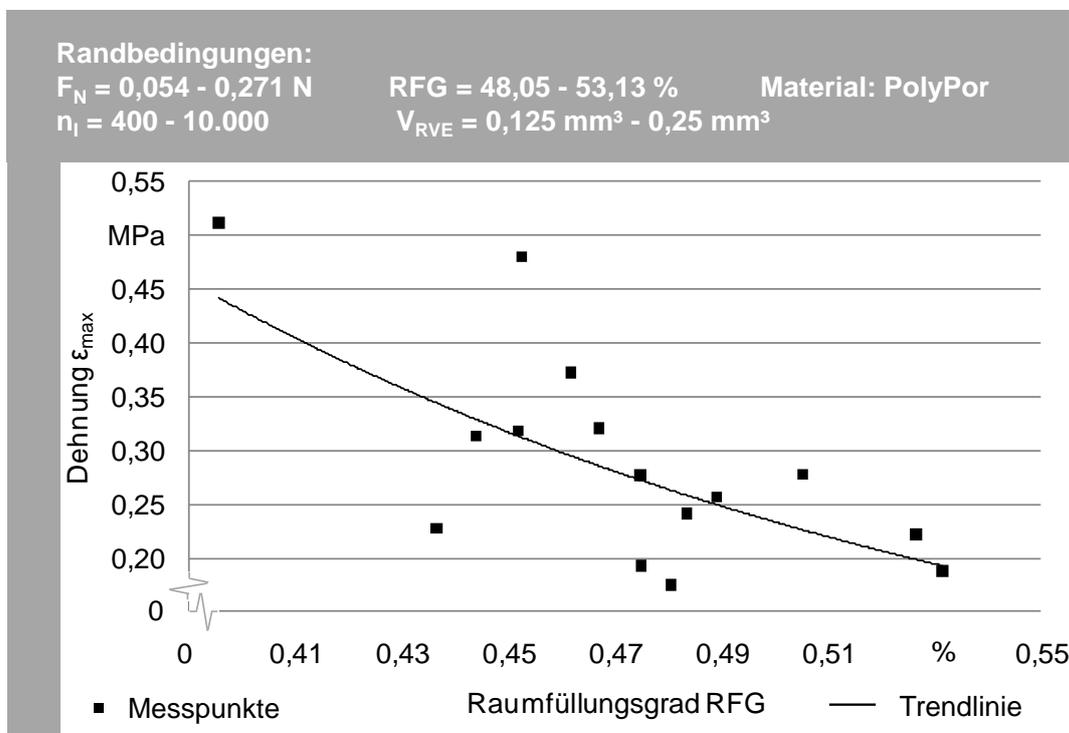


Abbildung 5.14: Auswirkung des Raumfüllungsgrads auf die maximale Dehnung  $\epsilon_{max}$  des RVEs mit den Randbedingungen für die Simulation

Es wird deutlich, dass die Dehnungen bei sinkendem Raumfüllungsgrad auf bis zu 0,5 % steigen. Ein größerer Raumfüllungsgrad hat steigende Kontaktflächen zur Folge, weshalb sich auftretende Dehnungen verringern und diese bei 53 % Füllung nur noch bei 0,19 % liegen. 3D-gedruckte Proben mit einem Raumfüllungsgrad von 65 % ergaben im Zugversuch eine Bruchdehnung von  $\epsilon_{max} = 1,1 \%$ . Diese ist somit etwa um den Faktor 10 größer, was vermutlich aus der gewählten Größe der RVEs resultiert. Zudem steigt der Raumfüllungsgrad bei nicht konstanter Korngrößenverteilung. Das ist darauf zurückzuführen, dass die durch Schüttung zwischen den Partikeln entstehenden Poren bei variierendem Korndurchmesser

mit kleineren Elementen gefüllt werden und somit die Porosität sinkt. Eine Reduktion der Korngröße um 50 % bewirkt hier jedoch kaum Unterschiede.

In Abbildung 5.15 ist der Einfluss des Bindereintrags auf die maximalen Dehnungen der unterschiedlichen Modellreihen dargestellt. Die auftretenden Dehnungen betragen zwischen 0,2 % und 0,5 %. Bei steigendem Bindereintrag ist eine leichte Zunahme der Verformung in y-Richtung zu erkennen. Auch dies war auf die höhere Duktilität des Binders zurückzuführen. Experimentelle Untersuchungen ergaben eine um den Faktor 10 höhere Dehnung. Ursache ist vermutlich die geringe im Modell angewendete Kantenlänge von 0,25 mm der RVEs.

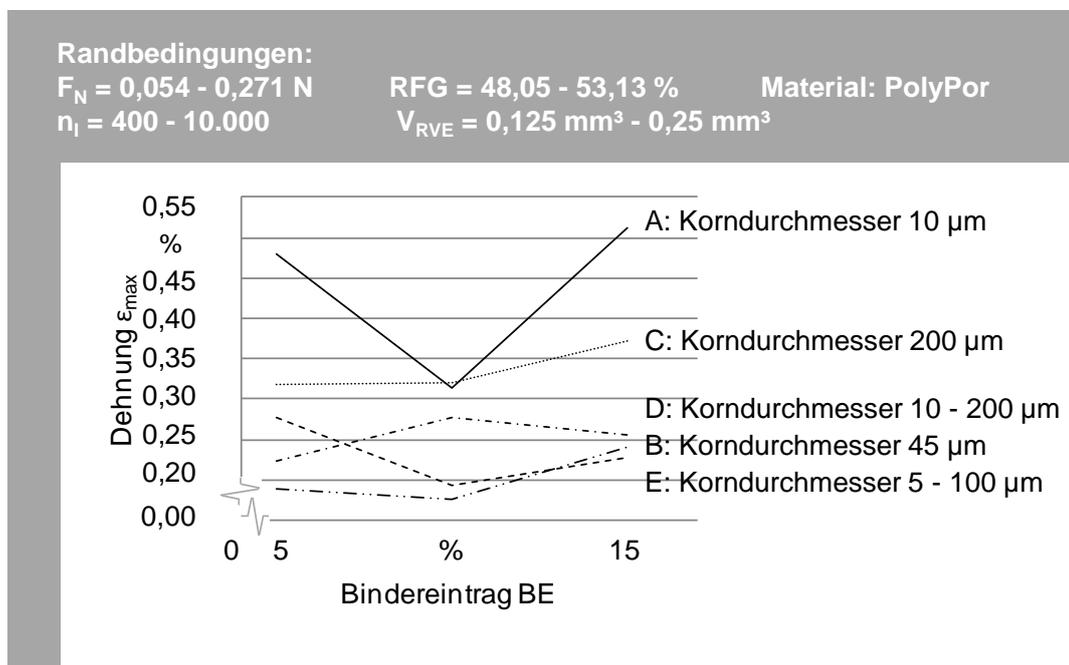


Abbildung 5.15: Maximal auftretende Dehnung  $\epsilon_{max}$  bezogen auf den Bindereintrag BE mit den Randbedingungen für die Simulation

### 5.2.5 Einteilung in Strukturmodelle

In den verschiedenen Modellreihen konnten diverse Pulverpartikelanordnungen beobachtet werden. Die Kraft wurde über unterschiedliche Wege durch das RVE geleitet. Diese Pfade ergaben sich durch verbundene bzw. nicht zusammenhängende Körner. Wurden aus einem Element alle Partikel eliminiert, die nicht im Kraftfluss lagen, blieben Anordnungen variierender Struktur übrig. Diese bildeten das tragende Gerüst des Materials und können bei Übertragung aus dem 3D-Raum in die Ebene in drei Grundtypen unterteilt werden:

- Z-Struktur
- C-Struktur
- O-Struktur

Daneben traten auch Mischformen (Hybride) auf. Alle Formen sind in Abbildung 5.16 dargestellt, sie können beliebig gedreht sein und haben einen Einfluss auf die Spannungsverteilung sowie die lokalen Spannungserhöhungen. Die Z- und die C-Struktur biegen sich in den in Abbildung 5.16 mit „A“ gekennzeichneten Bereichen stark auf, was vergleichsweise hohe Spannungen und damit im Experiment frühen Bruch in den Winkeln zur Folge hat. Dabei ist die C-Struktur eine Unterform der Z-Struktur. Den besten Einfluss auf die Steifigkeit hat die Hybridstruktur, da bei dieser die Spannungen relativ homogen über die Partikel verteilt werden.

Die stark schwankenden Partikelanordnungen, welche über das Bauteil zwar verteilt auftreten, sich jedoch nicht unbedingt gegenseitig eliminieren, vermindern die Chancen, reproduzierbare Eigenschaften zu erhalten.

### 5.2.6 Anforderungen an ein verbessertes Materialsystem

Es wurde ein Simulationsmodell in Digimat aufgebaut, welches die Mikrostruktur und weitere Werkstoffeigenschaften abbilden kann. So wurden beispielsweise die mechanischen Eigenschaften des Binders bestimmt sowie repräsentative Volumenelemente mit einem Füllgrad von bis zu 53 % erzeugt. Höhere Werte konnten wegen des zugrunde liegenden Berechnungsverfahrens nicht erreicht werden (vgl. Abbildung 5.15). Die RVEs wurden Untersuchungen in ANSYS unterzogen, um den Kraftverlauf über die Partikel darzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Einfluss von Korngrößen und Bindereintrag beim pulverbettbasierten 3D-Drucken von Kunststoffen auf die Steifigkeit des Endmaterials beschrieben werden. Es wurden fünf Modellreihen unterschiedlicher Korngrößen mit je einem Bindereintrag von 5 %, 10 % und 15 % aufgebaut und mit diesen konnten unterschiedliche Simulationen durchgeführt werden. So konnte der Verlauf von Spannungen und Dehnungen sowie der daraus resultierenden Verformung auf die Materialmodelle abgeschätzt werden.

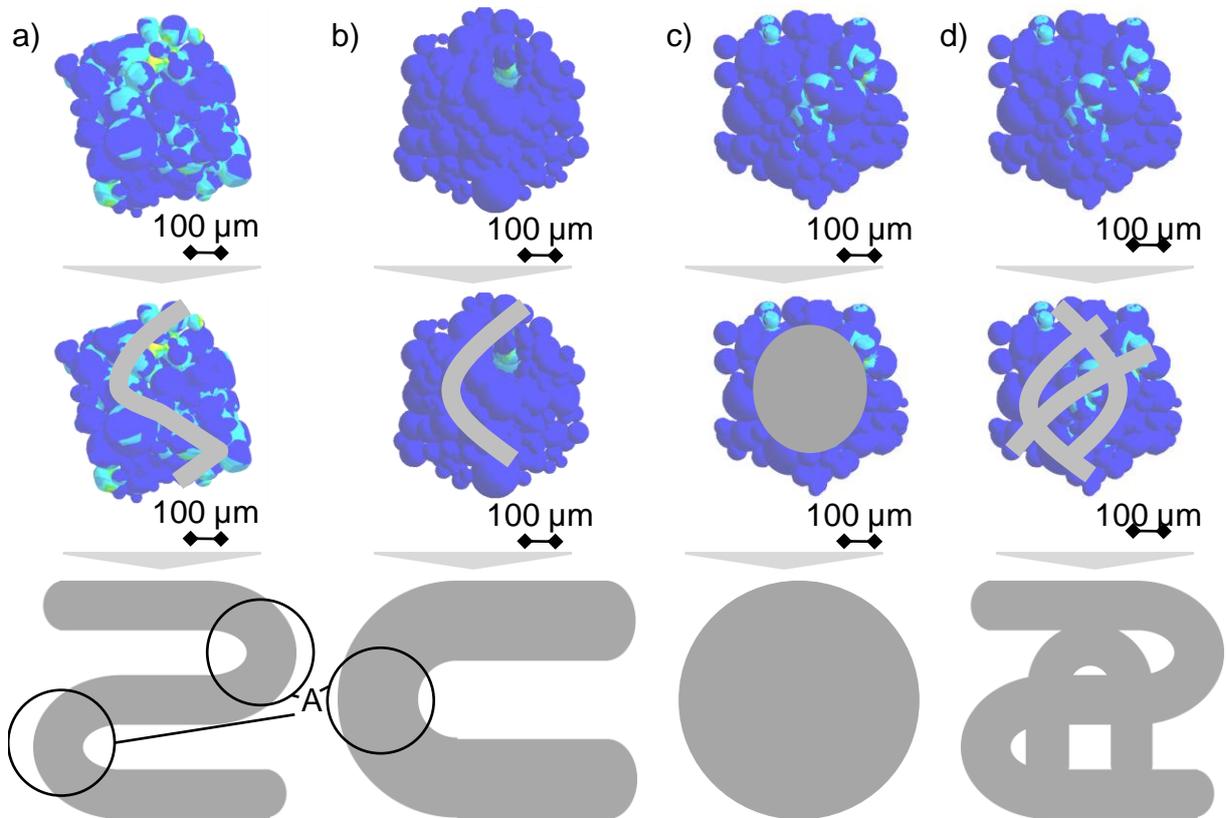


Abbildung 5.16: Materialaufbau und abgeleitete Strukturmodelle (Bereiche hoher Spannungen bei Zugbelastung in vertikaler Richtung sind mit A markiert) nach ZÄH & KELLNER (2010);

a) Z-Struktur b) C-Struktur

c) O-Struktur d) Hybridstruktur

Auf der Basis dieser Ergebnisse konnte der in Bezug auf die Spannungen und Verformungen optimale Bindereintrag sowie eine bestmögliche Korngrößenverteilung des Kunststoffgrundmaterials angenommen werden. Es gilt:

- Je höher die Raumfüllung ist, desto günstiger sind die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes.
- Die beste Raumfüllung wird bei der Reihe D (also der Korngrößenverteilung von 10 bis 200  $\mu\text{m}$ ) erreicht, welche dann auch für die unter Kapitel 6 beschriebenen Experimente angewendet wurde.
- Zudem ist eine Steigerung der Raumfüllung mit erhöhtem Bindereintrag oder der Anwendung von Füllern möglich.
- Grundsätzlich sollte der Bindereintrag unter 10% liegen, da dies geringe auftretende Spannungen zur Folge hat.

- Ein variierender Korndurchmesser liefert bessere mechanische Eigenschaften als ein konstanter.
- Ist der Korndurchmesser konstant, so liegt der beste Korndurchmesser im betrachteten Bereich von  $10\ \mu\text{m}$  bis  $200\ \mu\text{m}$  bei einem Wert von  $45\ \mu\text{m}$ .

Die experimentelle Umsetzung für ein neues Materialsystem nach diesen Anforderungen wird im folgenden Kapitel 6 beschrieben. Es wurden kontinuierlich Iterationsschleifen zwischen Simulation und experimenteller Werkstoffentwicklung zur Ermittlung des optimalen Materials bezüglich Korngröße und Bindereintrag durchgeführt.

### 5.3 Prozesssimulation des Schwundverhaltens

#### 5.3.1 Allgemeines

Um die Auswirkungen des beim 3D-Drucken auftretenden Schwunds abschätzen zu können, wurde das Verhalten während der Verfestigung des Binders im Pulverbett simuliert (KELLNER & ZÄH 2010). Der Schwund tritt auf, weil sich die Schicht durch die chemische Reaktion zusammen zieht. Hierdurch kommt es zu einer Aufbiegung in Baurichtung und damit zu Verzug. Um dies abzubilden, wurde ein schichtweises Modell aufgebaut, welches mit variablem Biegeverhalten belegt werden kann. Einen weiteren Effekt hat auch der Bindereintrag, welcher als inhomogen über die Schicht angenommen und modelliert wurde. In Abhängigkeit dieser unterschiedlichen Eingangsparameter wurden die Verformungen in ihrer Art und Ausprägung bewertet und es wird ein Vorschlag für ein bezüglich der Aufbiegung verbessertes Schwundverhalten und den geeigneten Bindereintrag erarbeitet. Für die Materialentwicklung aus Kapitel 6 ist dabei insbesondere das Verhalten der Aufbiegung über der Zeit relevant. Dieses Phänomen kann über entsprechende Beimengungen im Pulver oder Binder beschleunigt oder verlangsamt und damit gesteuert werden.

#### 5.3.2 Randbedingungen

Zur Umsetzung der Simulation waren die folgenden Randbedingungen vorgegeben:

- Schichtweiser Aufbau des Referenzbauteils mit den Maßen  $15\text{mm} \cdot 45\text{mm} \cdot 3\text{mm}$ , wie unter Abschnitt 5.3.3 dargestellt;
- Inhomogener Bindereintrag, wie unter Abschnitt 5.3.3 beschrieben;
- Aufbringen des Schwunds als virtuelle Temperaturlast nach Gleichung 5.1;
- Mechanische Eigenschaften nach Tabelle 5.2 mit einem E-Modul des Pulvers nahe  $E_t = 0\ \text{MPa}$  und einem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Pulvers nahe  $\alpha_W = 0$ ;

Gleichung 5.1 beschreibt den rein elastischen Zusammenhang des Schwunds und des Temperaturfelds, auf dessen Basis die Verformung abgebildet ist:

$$\Delta l = \alpha_W \cdot l_0 \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

Dabei ist  $\Delta l$  die Längenänderung, während  $\alpha_W$  der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient ist.  $l_0$  entspricht der Ausgangslänge und  $\Delta T$  der Änderung der Temperatur. Dabei gilt zudem, dass die Längenänderung eine Funktion der Schwundzeit  $t_{Schwund}$  und der Konzentration  $c$  des Binders ist (vgl. Gleichung 5.2)

$$\Delta l = \Delta l(t_{Schwund}, c) \quad (5.2)$$

| Bezeichnung                          | Formelzeichen | Einheit                  | Verfestigtes Material (Poly-Por) | Pulver (PM-MA) |
|--------------------------------------|---------------|--------------------------|----------------------------------|----------------|
| Elastizitätsmodul                    | $E_t$         | MPa                      | 400                              | «1             |
| Poissonzahl                          | $\nu$         | -                        | 0,3                              | 0,4999         |
| Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient | $\alpha_W$    | $\frac{1}{K \cdot 10^6}$ | 1                                | «1             |

*Tabelle 5.2: Werkstoffdaten für die Prozesssimulation*

#### 5.3.3 Modellaufbau

Der Aufbau des Simulationsmodells orientierte sich an der Vorgehensweise im 3D-Druck-Prozess. Das Referenzbauteil, welches als Quader angenommen und auf einer Grundlage aus Pulver modelliert wurde, war schichtweise erstellt. Der Quader hatte die Maße  $15\text{mm} \cdot 45\text{mm} \cdot 3\text{mm}$ . Ab einer Kantenlänge von etwa 30 mm traten im Experiment mit dem bloßen Auge sichtbare Verformungen und Schwund auf. Der Aufbau des Quaders ist in Abbildung 5.17 schematisch dargestellt. Im linken Bildteil ist das Modell bereits in Elemente geteilt, diese waren jedoch alle über den sog. *ekill-Befehl* deaktiviert und entsprachen damit dem pulverförmigen Zustand des Grundmaterials. In Verfahrrichtung des Druckkopfs wurden die Elemente einzeln und dem Schichtaufbau folgend über den sog. *ealive-Befehl* aktiviert, was dem verfestigten Zustand des Bauteils entsprach.

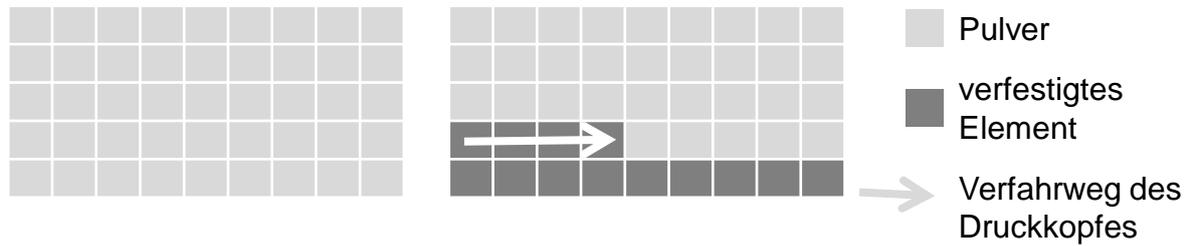


Abbildung 5.17: Modellaufbau der Prozesssimulation mit aktivierten und deaktivierten Elementen in z-Richtung

Dabei setzte in jedem Element die durch Schwund ausgelöste Verformung zeitlich versetzt ein und die Verfestigung dauerte bis zu 24 Stunden. Der zeitliche Abstand ergab sich entsprechend der Aktivierung der Verfestigung. So konnte die Auswirkung bezüglich der Form und der Geschwindigkeit unterschiedlicher Verfestigungsarten abgeschätzt werden. Dabei fand die Prozesssimulation über ein virtuelles Temperaturfeld pro Schicht statt und dieses stand lediglich als Platzhalter für die auftretende Verformung. Diese würde unter realem Temperatureinfluss ebenfalls entstehen und so konnte das virtuelle Temperaturfeld als Stellvertreter über einen linearen Schwundfaktor anhand eines Referenzwertes das Verhalten beeinflussen (*Analogmethode*). Die Verknüpfung der Schichten spielte dabei eine sehr wichtige Rolle. Jede Schicht verformte sich zwar einzeln, beeinflusste aber auch die darüber liegende, beispielsweise durch den Schichtauftrag, und die darunter liegende durch Aufbringen einer zusätzlichen Verformung.

Der Binder wurde in den einzelnen Schichten als virtuelle äquivalente thermische Last aufgebracht. Dabei wurden einzelne Punkte definiert (in Abbildung 5.18 als  $x$  dargestellt), an denen eine bestimmte Menge Fluid abgegeben wurde. Zusätzlich sollte der Fehlerfall betrachtet werden, bei dem zu Beginn des Drucks eine größere Menge Binder abgegeben wurde als zum Ende des Druckvorgangs. So konnte zu einem späteren Zeitpunkt auch das Phänomen des Düsenausfalls berücksichtigt werden. Die Schicht wurde in Streifen von links nach rechts abgefahren, wobei für das gewählte Referenzteil vier Streifen notwendig waren. Die Ausgabe des Binders begann immer am linken Rand ( $y = 0$ ). In der Mitte des Elements wurde der mittlere Bindereintrag als  $m_A$  angenommen und entsprechend obiger Logik durch Multiplikation mit einem linearen Skalierungsfaktor den jeweiligen Werten für den Bindereintrag angepasst.  $m_A$  war dabei der mittlere Wert zwischen dem minimalen und maximalen Binderaustrag ( $m_{min}, m_{max}$ ). Durch ein sog. *Mapping* wurde die Flüssigkeitsmenge nicht an einem Punkt, sondern auf eine jeden Punkt umgebende Fläche (im Bild dunkelgrau dargestellt) aufgebracht. Auf diese Weise konnte der inhomogene Bindereintrag, bspw. durch Düsenausfall, in der Simulation umgesetzt werden.

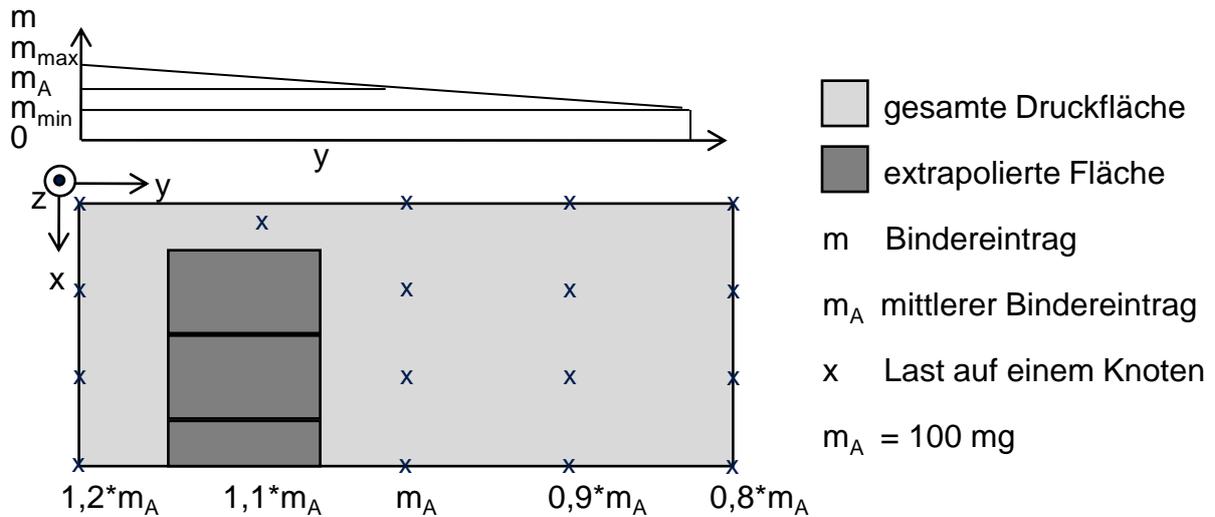


Abbildung 5.18: Modellaufbau der Prozesssimulation in der  $x$ - $y$ -Ebene bezüglich des abnehmenden Bindereintrags in  $y$ -Richtung

Das Modell wurde mit unterschiedlichen Biegeverläufen als Last berechnet, welche exemplarisch in Abbildung 5.19 zu sehen sind. Dabei ist jeweils die prozentuale Aufbiegung durch Schwund in Abhängigkeit von der Auslagerungszeit im Pulverbett bei einer Probenlänge von 45 mm aufgetragen. Die Bauteile aus PolyPor wurden 24 Stunden zur Verfestigung im Pulverbett belassen und dann entpackt. Modell A stellt dabei einen bei diesem Material gemessenen Verlauf dar, bei dem die gesamte Aufbiegung durch Schwund erst zu- und dann wieder abnahm. Dabei wurden Werte zwischen 0,23 % und 0,8 % erreicht. Im Gegensatz dazu stehen die Modelle B, C und D, welche eine konstante Zu- (B) oder Abnahme (C und D) der Aufbiegung durch Schwund als Voraussetzung haben und einander genau gegensätzlich sind. Der Schwund bei Modell D war dabei nur halb so groß wie das Modell C. Die Aufbiegung nahm über die Zeit hinweg kontinuierlich ab (von 0,82 % bzw. 0,41 % bis 0 %). Das Modell B entspricht dem Verhalten des aktuellen Materials aus Serienfertigerungsverfahren. Die Aufbiegung durch Schwund begann erst nach etwa 2 Stunden und stieg dann rasant an, nach etwa 5 Stunden wurde ein Wert von 0,65 % erreicht und die Steigung der Kurve wurde geringer. Nach 24 Stunden betrug die Aufbiegung 0,81 %.

Es wurde das Verformungsverhalten des Referenzbauteils in Abhängigkeit der Modelle A, B, C und D bewertet, um minimalen Verzug zu erhalten. Somit war für die Materialentwicklung bekannt, welches das optimale Verhalten war, und die chemische Zusammensetzung konnte entsprechend eingestellt werden. Beispielsweise könnten für einen verlangsamten Schwund Inhibitoren, also chemische Substanzen, die den Prozess abbremsen, zum Pulver oder Binder gegeben werden, welche die Reaktion verzögern oder verlangsamen und so zu einem anderen Verformungsverhalten führen.

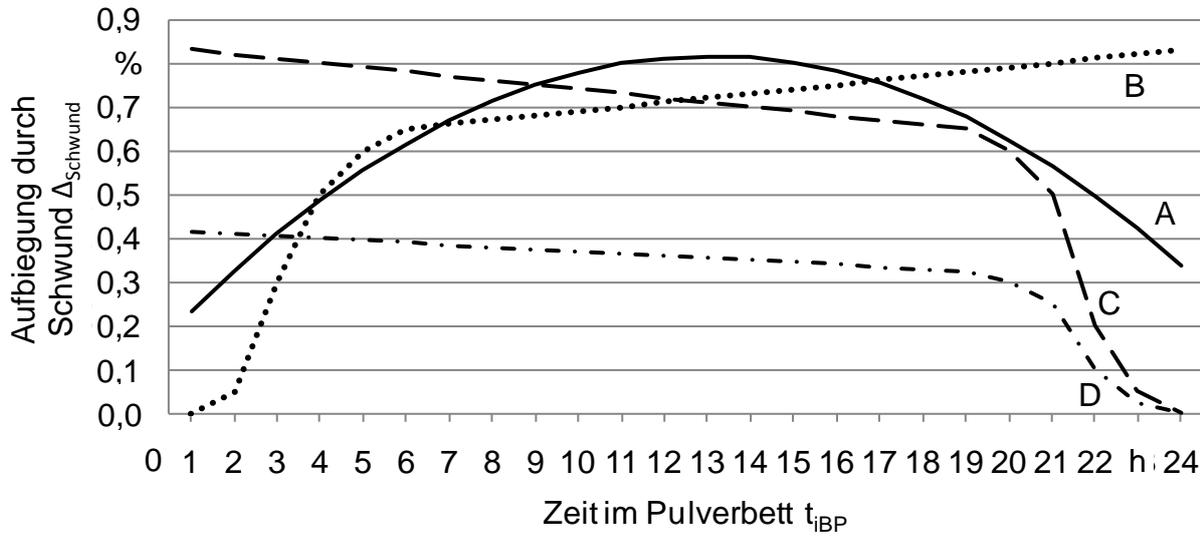


Abbildung 5.19: Biegelinien der Modelle A, B, C und D als aufbrachte Last in einem virtuellen Temperaturfeld;

$\Delta_{Schwund}$  in % bezogen auf eine Probenlänge von 45 mm;

$\Delta_{Schwund}$  wie in Abbildung 5.20 skizziert;

A: Verlauf der Aufbiegung durch Schwund

B: Zunahme der Aufbiegung durch Schwund

C: Abnahme der Aufbiegung durch Schwund

D: Reduktion des Modells C um 50 %

### 5.3.4 Verformungsverhalten

Die Aufbiegung durch Schwund konnte durch das oben beschriebene Prozessmodell dargelegt werden. In Anlehnung an Abbildung 4.17 in Kapitel 4 konnte das Verformungsverhalten in der Simulation mit dem Experiment verglichen werden. Hierfür stellt Abbildung 5.20 die relevanten Phänomene in der Simulation (Abbildung 5.20 a)) und im Experiment (Abbildung 5.20 b)) dar. Im oberen Bildteil a) wird deutlich, dass das Referenzbauteil aus der Simulation ein ähnliches Verformungsverhalten aufwies, wie das unter b) dargestellte reale Teil. Das 45 mm lange Referenzbauteil bog sich um 0,48 mm auf, was etwa dem  $\Delta_{Schwund} = 1\%$  aus dem Experiment entsprach. Dabei trat auch Curling auf, eine Aufbiegung der Probe, welche auf der Unterseite der Probe startet. Zusätzlich bildeten sich an den oberen Bereichen Nasen, also eine kleine Verlängerung der Probe. Es wurde deutlich, dass der inhomogene Bindereintrag wegen der Linearität zur gleichen Aufbiegung im äußeren Randbereich  $\Delta_{Schwund}$  auf beiden Seiten des Modells führte. Lediglich die Ecken wiesen einen leicht abgewandelten Verlauf auf. Die sogenannten Nasen (Eckenausprägungen) sind leicht unterschiedlich. In der Simulation (Nase A) wurde ein scharfer Kantenverlauf ermittelt, das Experiment (Nase B) zeigt eine abgerundete Kontur. Die Rundungsgenauigkeit und die Eckenausprägung waren somit für das Anwendungsgebiet 3D-Drucken ausreichend.

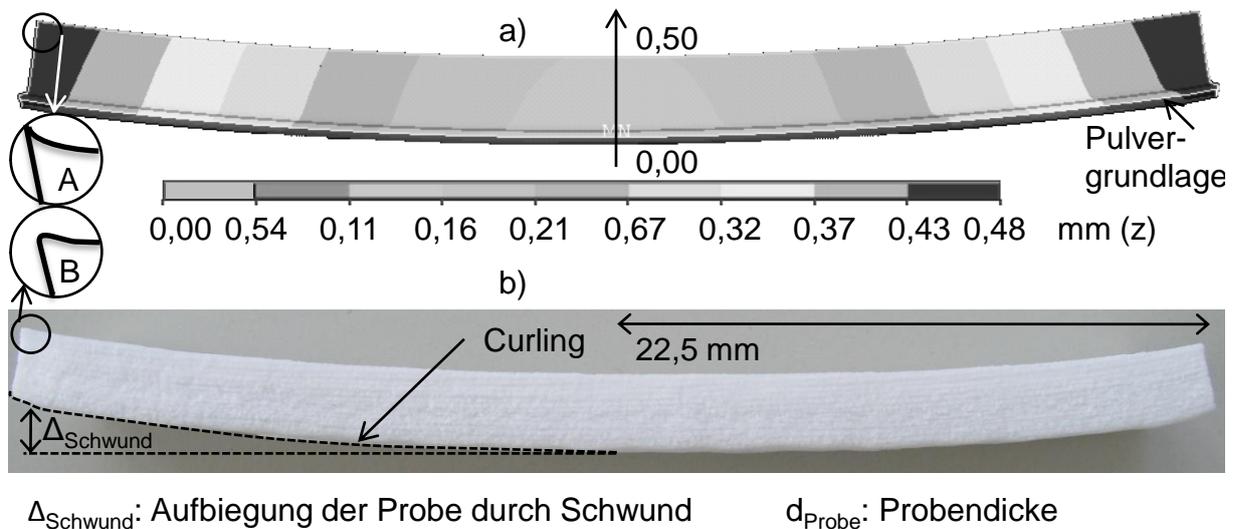


Abbildung 5.20: Ergebnisse der Prozesssimulation und Vergleich mit dem Experiment; Verformung durch Schwund mit Curling und Nasen (A und B); a) Simulation b) Experiment

Bei der Biegelinie A kam es wegen des späten Einsetzens der Reaktion zu einem starken Verwinden und zur Aufbiegung des untersuchten Bauteils. Dies konnte durch die Festigkeit, die beim Einsetzen bereits vorhanden war, begründet werden. Die Biegelinie B resultierte in einer gleichmäßigen Aufbiegung des Bauteils, welche den Graph C bei gleichem Schwund wegen höherer Eigenspannungen übersteigt. Diese beiden Biegelinien zeigten insgesamt die beste Maßhaltigkeit. Die stärkste Wölbung und der größte Schwund traten bei Biegelinie D auf. Somit konnte festgestellt werden, dass ein möglichst langsames und lineares Verfestigen des Binders im Pulverbett oder eine sehr schnelle Reaktion die geringsten Verformungen zur Folge haben. Die Erfahrung sagt, dass ersteres korrekt ist. Der Bindereintrag sollte auf der bedruckten Fläche insgesamt und an jeder Stelle immer der gleichen Menge entsprechen, um ein unterschiedliches Aufbiegen der Strukturen in Abhängigkeit der Platzierung im Bauraum zu verhindern. Dies war auf den großen Einfluss des Binders auf den Schwund und Verzug zurückzuführen. Ein verdoppelter Bindereintrag resultierte in zweimal so großem Verzug. Somit ist für Bauteile höchster Maßhaltigkeit ein geringer Bindereintrag sinnvoll, welcher allerdings zu geringerer Steifigkeit führt.

Zur Verminderung von Spannungen im Bauteil ist es sinnvoll, einen im Verlauf des Prozesses langsam und gleichmäßig ansteigenden E-Modul zu haben. Gleichzeitig ist es zielführend, ein Verkleben der Pulverpartikel untereinander möglichst frühzeitig zu erreichen, da so Schwund und Verzug minimiert werden können.

### 5.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Materialsimulation konnte der Einfluss der Mikrostruktur sowie der Korngrößen und des Bindereintrags im pulverbettbasierten 3D-Drucken von Kunststoffen auf die Steifigkeit des Endmaterials beschrieben werden. Es wurden Modellreihen mit fünf unterschiedlichen Korngrößen und je einem Bindereintrag von 5 %, 10 % und 15 % aufgebaut und mit diesen unterschiedliche Simulationen durchgeführt. So konnte der Verlauf von Spannungen und Dehnungen sowie der daraus resultierenden Verformung auf die Materialmodelle abgeschätzt werden. Ein für geringe auftretende Spannungen und Dehnungen optimaler Bindereintrag sollte unter 10 % liegen, was im Gegensatz zu der Aussage steht, das Material komplett mit Binder zu füllen, um ein dichtes Bauteil und auf diese Weise eine hohe Steifigkeit zu erhalten. Eine variierende Korngrößenverteilung zwischen 10 und 200  $\mu\text{m}$  wurde als geeignet identifiziert. Im folgenden Kapitel 6 liegen diese Ergebnisse der Materialentwicklung zugrunde.

Im Rahmen einer Prozesssimulation zum Schwund- und Verformungsverhalten wurden die geometrischen Auswirkungen der Phänomene der Polymerisation untersucht und Vorschläge für ein neues verbessertes Materialsystem mit geringerem Schwundverhalten und niedrigerer Aufbiegung abgeleitet. Ein langsames lineares Verfestigen des Binders im Pulverbett hat dabei die geringsten Verformungen zur Folge und ist somit anzustreben. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich ein, manchmal auftretender, inhomogener Bindereintrag negativ auswirkt und dieser deshalb an jedem Punkt der Fläche gleich sein sollte. Die Ergebnisse dieses Kapitels stehen in engem Zusammenhang mit den in Kapitel 6 erarbeiteten Materialsystemen. Die Resultate der Werkstoffentwicklungen flossen in großem Maße in die Modellierung ein und umgekehrt.

# 6 Materialentwicklung

## 6.1 Vorgehen im Kapitel

Die Motivation, auch im 3D-Druckprozess eine Polymerisationsreaktion durchführen zu können, liegt in der Möglichkeit, bessere mechanische Eigenschaften als mit bisherigen Materialien zu erhalten. Anlagentechnisch konnte die Polymerisation allerdings nicht wie bei klassischen Kunststoffherstellungsverfahren umgesetzt werden, da dafür Formen sowie hohe Drücke und Temperaturen notwendig sind. Mit der Zielsetzung der Materialentwicklung für den 3D-Druckprozess werden in diesem Kapitel Forschungen zu Mono- (Submodul *M1*) und Multimaterialien (Submodul *M2*) dargelegt. Diese basieren auf den Erkenntnissen der Simulation des vorangegangenen Kapitels 5, durch welche die Anforderungen an ein neues Materialsystem festgelegt wurden.

Das bisherige Materialsystem PolyPor auf PMMA-Basis zeichnet sich durch eine hohe Porosität aus und eignet sich damit hervorragend für Gussmodelle. Die schlechten mechanischen Eigenschaften mit einem E-Modul von  $E_t = 400$  MPa lassen eine Anwendung als Bauteil im Sinne des Rapid Manufacturing jedoch nicht zu. Daher besteht die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Werkstoffe, welche die gesetzten Anforderungen, insbesondere bessere mechanische Eigenschaften, erfüllen.

In diesem Kapitel werden mögliche Materialsysteme erörtert und Prozessparameter sowie zu erzeugende Bauteile dargelegt.

## 6.2 Monomaterialsystem

### 6.2.1 Allgemeines

Im Bereich der Monomaterialien wurden bereits Werkstoffe für das 3D-Drucken entwickelt, wie in Kapitel 3 erläutert. Bei den Kunststoffen ist dies insbesondere der Werkstoff PolyPor. Die Prozessparameter für diesen Werkstoff sind bekannt, die mechanischen Eigenschaften des gedruckten Materials können Tabelle 2.3 in Abschnitt 2.4 entnommen werden. Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens sind jedoch weitere Kunststoffe für den 3D-Druck zu qualifizieren und die nach Möglichkeit mit gleicher Anlagentechnik verarbeitet werden können. Dabei sind die geeigneten Prozessparameter zu ermitteln und deren Einfluss auf die Bauteilqualität aufzuzeigen.

Im 3D-Kunststoff-Druckprozess ist die radikalische Polymerisation auf wenige Monomere beschränkt, zu welchen auch die Methacrylate wie MMA zählen. Die Gruppen der Polyamide oder Polyimine konnten nicht verarbeitet werden, obwohl ihnen vielversprechende Werkstoffeigenschaften zugrunde liegen. Beide Polymere entstehen durch eine Polykondensations- bzw. eine Polyadditionsreaktion von zwei unterschiedlichen Substanzen, wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben. Die beiden Substanzen müssen im Pulverbett zur Reaktion gebracht werden, wobei es für die Zuführung unterschiedliche Möglichkeiten gibt:

- Ein flüssiger Reaktand wird in das Pulverbett, in dem der zweite Reaktand vorliegt, eingebracht.
- Zwei flüssige Reaktanden werden über zwei Druckköpfe in das Pulverbett dosiert.
- Die Reaktion wird durch ein Lösemittel an zwei fest im Pulver vorliegenden Reaktanden ausgelöst.

In einem fest vorliegenden PMMA-Perlpolymerisat zeigten Polyimine in Grundlagenversuchen eine unmittelbare Reaktion und eine Grundfestigkeit wurde verhältnismäßig schnell aufgebaut. Dazu wurden Pulver und Binder zusammen in ein Gefäß gegeben und es wurde untersucht, ob eine Reaktion stattfand. Ein PMMA-Perlpolymerisat wurde dafür mit Anteilen an 3,5-Diaminobenzoesäure (Abbildung 6.1 a)) gemischt und mit einem flüssigen Diketon, reines 2,5-Hexandion (Abbildung 6.1 b)), oder einem festen Dialdehyd, Terephthal-dialdehyd (Abbildung 6.1 c)) nahe zur Sättigung in Lösemittel getropft. Dabei kamen die Pulvermischungen aus Tabelle 6.1 und die zwei Binder aus Tabelle 6.2 zum Einsatz. Neben den Untersuchungen mit weißem PMMA-Perlpolymerisat wurden auch Untersuchungen mit farbigen und kohlefaserverstärkten PMMA-Partikeln sowie PA durchgeführt. Wegen der guten Quelleigenschaften des PMMA war dieses vielversprechend.

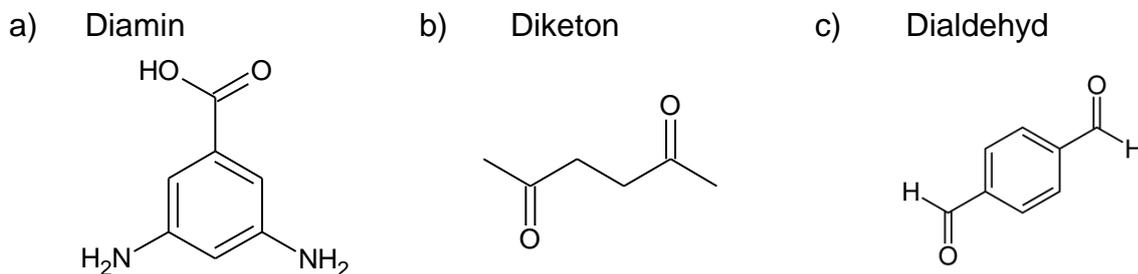


Abbildung 6.1: Darstellung der Moleküle eines a) Diamins (3,5-Diaminobenzoesäure), eines b) Diketons (2,5-Hexandion) und eines c) Dialdehyds (Terephthal-dialdehyd) mit Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N)

| Typ      | 3,5-Diaminobenzoesäure | PMMA | PA 12 | PA 6 | Kohlefaser | Polyvinylbutyral | Tulsimer® |
|----------|------------------------|------|-------|------|------------|------------------|-----------|
| Pulver A | 10 %                   | 90 % | -     | -    | -          | -                | -         |
| Pulver B | 20 %                   | 80 % | -     | -    | -          | -                | -         |
| Pulver C | 30 %                   | 70 % | -     | -    | -          | -                | -         |
| Pulver D | 10 %                   | 80 % | -     | -    | 10 %       | -                | -         |
| Pulver E | 10 %                   | -    | -     | 90 % | -          | -                | -         |
| Pulver F | 10 %                   | -    | 90 %  | -    | -          | -                | -         |
| Pulver G | 10 %                   | -    | 70 %  | -    | -          | 10 %             | 10 %      |
| Pulver H | 10 %                   | -    | 79 %  | -    | -          | 10 %             | 1 %       |
| Pulver I | 10 %                   | -    | -     | 79 % | -          | 10 %             | 1 %       |

Tabelle 6.1: Pulvertypen für ein Universal-Pulver-Bindermaterialsystem auf Diaminbasis

| Typ      | Komponente im Pulverbett                   | i-Propanol | Hexylacetat | $\text{Cu}(\text{acac})_2$                               | $\text{Fe}(\text{acac})_3$                               |
|----------|--|------------|-------------|--|--|
| Binder 1 | Diketon als Fluid: 2,5-Hexandion           | -          | -           | -  | -  |
| Binder 2 | Dialdehyd als Feststoff: Terephthalaldehyd | 50 ml      | 100 ml      | $\rho(\text{Cu}(\text{acac})_2)$ an der Sättigungsgrenze | $\rho(\text{Fe}(\text{acac})_3)$ an der Sättigungsgrenze |

Tabelle 6.2: Bindertypen für ein Universal-Pulver-Bindermaterialsystem auf Diketonbasis  
 $\rho(i)$  entspricht der Sättigungsgrenze des Stoffes  $i$  bei 20 °C;  
 Stoff  $i$  ist Kupfer(II)-acetylacetonat ( $\text{Cu}(\text{acac})_2$ ) bzw. Eisen(III)-acetylacetonat ( $\text{Fe}(\text{acac})_3$ ); acac entspricht Acetylacetonat

Zusätzlich wurden die Versuche mit PA durchgeführt, welches im Gegensatz zu PMMA erwartungsgemäß keine Löslichkeit zeigte und daher unter den am Markt im Maschinenbau verbreiteten Kunststoffen die größte Herausforderung für eine Umsetzung im 3D-Druckprozess darstellt. Als Pulvergrundmaterial wurden PMMA, PA 6 und PA 12 angewendet, welche mit weiteren Pulvern zur Verfestigung (Diamin, Kohlefaser) oder besseren Verarbeitbarkeit (Polyvinylbutyral, Tulsimer®) in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt wurden.

Grundlage der Bindertypen waren Diketon oder ein Dialdehyd. Da nur wenige geeignete flüssige Diketone am Markt erhältlich sind, wurde neben der Untersuchung des 2,5-Hexandion als Fluid auch ein Dialdehyd als Feststoff (Terephthaldialdehyd) bis nahe zur Sättigungsgrenze in i-Propanol und Hexylacetat gelöst betrachtet. Bei Letzteren wurden zur Verbesserung der Verfestigung Kupfer(II)-acetylacetonat ( $\text{Cu}(\text{acac})_2$ ) und Eisen(III)-acetylacetonat ( $\text{Fe}(\text{acac})_3$ ) ebenfalls bis zur Sättigungsgrenze zugegeben. Durch Beigabe dieser Metallsalze erhält der Binder eine weinrote Färbung. Man spricht von einer *gesättigten Lösung*, wenn die größtmögliche Menge eines Feststoffs in einem Lösemittel gelöst vorliegt. Die Sättigungsgrenze der Lösung ist dabei vom Feststoff, dem Lösemittel und vor allem der Temperatur abhängig.

Bei höherer Temperatur kann mehr Feststoff gelöst werden, weshalb die Sättigungsgrenze bei 20 °C gewählt wurde. Eine *Fällung*, also das Ausscheiden des Feststoffs aus dem Fluid, kann damit auch bei schwankender Raum- und erhöhter Druckkopftemperatur ausgeschlossen werden. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass die Temperatur nicht unter 20 °C absinkt.

Alle Pulvertypen wurden mit Binder 2 (Terephthaldialdehyd als Feststoff gelöst) untersucht. Eine weitere Kombination war Pulvertyp A mit Binder 1 (2,5-Hexandion). Es ist bekannt, dass Diamin und Diketon bzw. Dialdehyd sich bei Reaktion gelb-orange-rot färben, womit eine Wirkung des Materialsystems festgestellt werden kann (SUEMATSU 1985).

Alle Versuche mit unterschiedlichen PMMA-Perlpolymerisaten (kohlefaserverstärkt, weiß oder farbig) führten zu einem verfestigten Material, wobei eine Festigkeitssteigerung durch Beimengung von Kohlefasern (Typ D) nicht messbar war. Dies lag an der Größe der beigemischten Fasern; diese dürfen wegen der Verarbeitbarkeit die maximale Schichtstärke von 150  $\mu\text{m}$  nicht überschreiten. Damit liegen sie in der Größenordnung des vorliegenden Pulvers und ein positiver Einfluss der Fasern ist nicht gegeben. Die Systeme A bis C unterscheiden sich lediglich durch den Anteil an Diamin, weshalb mit unterschiedlichem Bindereintrag gedruckt wurde, um jedem Diamin die Reaktion mit einem Diketon oder Dialdehyd zu ermöglichen, also ein ausgeglichenes *stöchiometrisches Verhältnis* zu erhalten. Die *Stöchiometrie* wird angewendet, um die tatsächlichen Mengenverhältnisse einer bekannten Reaktion zu berechnen. Das Ergebnis ist die Menge der Produkte bei einer vorgegebenen Anzahl und Menge an Edukten.

System A zeigt dabei die größte Festigkeit bei geringstem Verlaufen des Binders im Pulverbett. Die Systeme E und F, welche lediglich aus PA und Diamin bestanden, wurden nicht fest, eine leichte Gelbfärbung des Pulvers als Zeichen einer Reaktion konnte jedoch beobachtet werden. Daher wurden Polyvinylbutyral als Kleber und Tulsimer® als Absorber beigemischt. Die besten Verarbeitungseigenschaften boten sich bei einer Mischung aus 10 % Diamin, 79 % PA, 10 % Polyvinylbutyral und 1 % Tulsimer® (System H und I).

Eine Polykondensation ist immer eine Abspaltungsreaktion. Im Fall der Reaktion von 3,5-Diaminobenzoesäure (Diamin) mit 2,5-Hexandion oder Terephthaldialdehyd (Diketon) entsteht als Abspaltungsprodukt Wasser, wie Abbildung 6.2 am Beispiel der Polykondensationsreaktion von Diamin und Diketon zu Polyimin demonstriert.

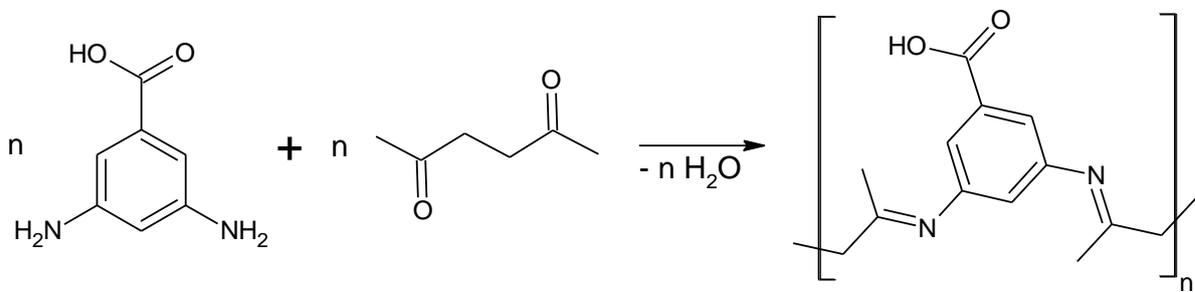


Abbildung 6.2: Polykondensationsreaktion von Diamin (im Pulver) und Diketon (im Binder) zu Polyimin unter Abscheidung von Wasser mit Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N)

Zur Beurteilung der Verarbeitung des Materialsystems im 3D-Druck muss eine ausreichende Festigkeit sicher gestellt werden. Bei den PMMA-Systemen bewies der Pulvertyp A mit Binder 1 und 2 die beste Reaktion. Wegen der Unlöslichkeit der Polymere PA 6 und PA 12 mussten dem Pulver zwei weitere Komponenten beigemischt werden. Dies war zum einen der Superabsorber Tulsimer® und zum anderen eine Art Kleber, das Polyvinylbutyral. Ohne Anwendung dieser Additive war die Grünteilhärte des Materials so gering, dass die Teile nicht ohne Beschädigung aus dem Bauraum entnommen werden konnten, wie Abbildung 6.3 a) darstellt. Es konnten lediglich Bruchstücke als feste Bestandteile (Abbildung 6.3 b)) herausgenommen werden. Die *Grünteilhärte* bezeichnet den Zustand der Bauteile nach Entnahme aus der Anlage ohne nachfolgende Behandlungen, wie zum Beispiel durch Ofenzyklen oder Infiltration. Selbst mit diesen Beimischungen wurden bei den PA-Systemen wesentlich geringere Grünteilestighärten beobachtet als bei PMMA-Systemen, wie unter Abschnitt 6.2.3 näher erläutert. Die Pulvertypen H (PA 12) und I (PA 6) wiesen dabei im System mit Binder 2 nach dem Druck vergleichbare Eigenschaften auf, weshalb die Versuche nur mit PA 12 fortgesetzt wurden.

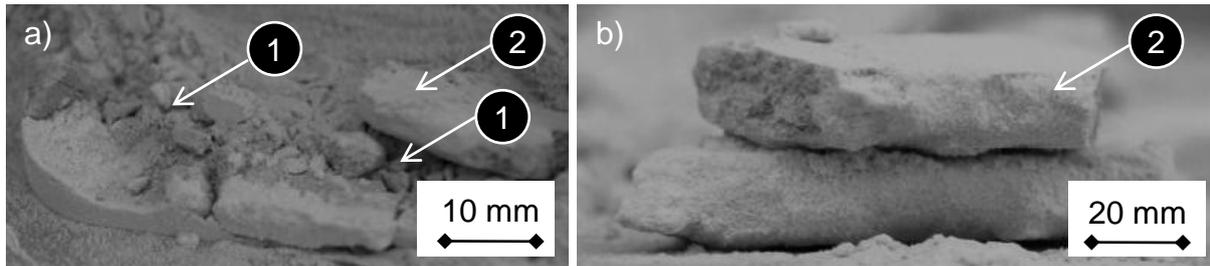


Abbildung 6.3: Geringe Grünteilhärte der PA-Systeme;  
1: Pulver 2: fester Bestandteil;  
a) Bauraum mit herausragenden festen Bestandteilen  
b) Fester Bestandteil nach dem Entpacken

Das 2,5-Hexandion im Binder 1 ist als gesundheitsschädlich (Xn) eingestuft und nerventoxisch. Das Terephthaldialdehyd im Binder 2 ist von der EU nicht als Gefahrstoff eingestuft worden. Daher ist die Gesundheitsgefährdung des Binders 2 weniger kritisch als die des Binders 1.

Durch geeignete Wahl von Diamin und Diketon oder Dialdehyd wurde nach kurzer Reaktionszeit eine Festigkeit erreicht, welche bereits nach einer Stunde eine Entnahme aus dem Pulverbett zuließ. Dies ist ein erheblicher Vorteil gegenüber bisherigen Systemen, welche Härtungszeiten von bis zu 24 Stunden haben. Auch konnte eine Verbesserung der Maßhaltigkeit und der mechanischen Eigenschaften beobachtet werden. Dieses System wurde von MÖGELE & KELLNER (2010) zum Patent angemeldet.

Eine Alternative stellen auch Systeme dar, bei denen die Diamine und Dicarbonylverbindungen im Pulverbett oder im Druckkopf vorgelegt werden. Da es sich bei der Polymerisation der beiden Verbindungen um eine Polykondensationsreaktion handelt, bei der ein stöchiometrisches Verhältnis der beiden Reaktanden günstig ist, bietet sich das Vorlegen der einen Komponente im Pulver und der anderen zu gleichen Teilen im Binder an. Da Amine oft korrosive Eigenschaften haben, wurden das Diketon und das Dialdehyd über den Druckkopf zugeführt, während das Diamin im Pulverbett vorgelegt wurde.

Der große Vorteil des Diamin-Diketon/Dialdehyd-Systems ist seine Unabhängigkeit vom Pulvergrundmaterial, welche durch Anwendung an den beiden unterschiedliche Voraussetzungen benötigenden Kunststoffen PMMA und PA nachgewiesen wurde. Nachteil ist das Vorliegen einer Reaktion, die ein stöchiometrisches Verhältnis der beiden Reaktanden fordert, so dass die beiden Reaktanden unter Umständen nicht vollständig zur Reaktion kommen, wenn nicht jedem Diamin-Molekül ein zugehöriges Diketon oder Dialdehyd zur Reaktion vorliegt. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Moleküle an unterschiedlichen Stellen im Pulverbett vorhanden sind. Durch Erhöhung des Anteils einer Komponente könnte das Problem geringer ausfallen. Dann verbleiben im Bauteil jedoch vermindert Bestandteile, die nicht reagiert haben. Diese mindern die Festigkeit. Eine gleichmäßige Verteilung, sowohl im Binder als auch im Pulver, erhöht jedoch die Wahrscheinlichkeit

einer vollständigen Reaktion und ist damit von großer Bedeutung. Gute Ergebnisse wurden mit einer Mischung aus 10 % Diamin mit 90 % Kunststoffgrundpulver erzielt, was auch dem in der Simulation (vgl. Abschnitt 5.2) ermittelten optimalen Bindereintrag von 10 % entspricht.

Das System Pulver A mit Binder 2 auf Grundlage von PMMA wird im weiteren Verlauf als DikaPor bezeichnet. Die modifizierte Variante mit Typ A und Binder 1 heißt DikaPor<sub>mod</sub>. Der PA-basierte Werkstoff (Typ H und Binder 2) wird DikaDens genannt.

### 6.2.2 Materialauswahl

Mit den Materialsystemen DikaPor und DikaDens wurden Druckversuche auf dem in Kapitel 4 beschriebenen 3D-Druck-Demonstrator durchgeführt. Die erreichbaren mechanischen Eigenschaften waren zwar durch Anwendung des Bindertyps 1 (DikaPor<sub>mod</sub>) höher, aber die Prozessierbarkeit wurde mit Bindertyp 2 verbessert. Zudem ist das in Binder 2 enthaltene Terephthaldialdehyd im Gegensatz zu 2,5-Hexandion in Binder 1 nicht gesundheitsschädlich, wie zuvor erläutert. Aus diesem Grund wurden zum System DikaPor<sub>mod</sub> lediglich Zugversuche durchgeführt und die weiteren Untersuchungen basierten auf Bindertyp 2. Dieser hat eine Viskosität von  $3,3 \pm 0,2$  mPas bei 25 °C. Die Spezifikationen des Druckkopfes geben, wie in Kapitel 4 dargestellt, 1 bis 30 mPas als optimalen Bereich vor. Versuchsreihen hatten für den Binder 2 eine optimale Druckkopftemperatur von 30 °C ergeben. Mit  $T_{DK} = 30$  °C konnte eine im Gegensatz zur Raumtemperatur konstante Temperatur sichergestellt werden. Im Temperaturbereich zwischen 30 °C und 70 °C, der maximalen Heiztemperatur, sank die Prozessstabilität bei der Binderprozessierung.

Die in Kapitel 4 genannten Störgrößen wurden nach Möglichkeit konstant gehalten, um deren Einfluss auf die Bauteilqualität auszuschließen. Die Herstellung aller Bauteile fand daher in derselben Maschine an derselben Stelle im Bauraum mit derselben Orientierung statt. Düsenausfall und Schichtauftrag wurden manuell überwacht und bei Fehlern wurde der Bauprozess abgebrochen. Nebenzeiten wurden konstant gehalten. Der Einfluss der Umwelt (Feuchtigkeit, Temperatur, Luftströmung) sowie Chargenschwankungen konnten ebenfalls minimiert werden, wegen der fehlenden Klimatisierung der Anlage jedoch nur in Grenzen. Die Binderkomposition wurde für die Sättigungsgrenze bei 20 °C eingestellt, somit konnte eine Fällung aus der Lösung nur bei Temperaturen unter 20 °C stattfinden, welche im Labor zu keiner Jahreszeit erreicht wurde.

Als Referenzwert für die Tropfenmasse diente eine Ausgabe von 10.000 Schuss aus den 128 Düsen des Druckkopfes. Die optimale Drucktemperatur des Fluids liegt bei 30 °C. Höhere Temperaturen führten zu Prozessinstabilitäten und Störungen an den Düsen. Abbildung 4.9 auf Seite 68 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Düsenspannung  $U_{DK}$  und resultierender Tropfenmasse  $m_0$  pro 10.000 Schuss für Bindertyp 2 bei  $t_I = 5$   $\mu$ s und  $T_{DK} = 30$  °C. Bei 100 V konnte ein Austrag von  $m_0 = 0,1$  g erreicht werden. Dieser erwies sich in den weiteren Versuchen als geeignet. Die Pulsdauer beträgt für optimale

Ergebnisse  $5 \mu\text{s}$ . Der Bindereintrag stieg dabei mit größer werdender Pulsdauer, wie in Abbildung 6.4 dargestellt, bis zu einem Wert von  $0,12 \text{ g}$  bei  $7$  bis  $9 \mu\text{s}$  und  $100 \text{ V}$  an, danach nahm er wieder leicht ab. Es ist zudem zu erkennen, dass mit steigender Düsenspannung die Eintragsmenge des Binders zunimmt. Mit den in Tabelle 6.3 aufgenommenen Werten konnte ein konstanter resultierender Bindereintrag mit einer Tropfenmasse von  $0,1 \text{ g}$  erreicht werden. Diese Menge entspricht dem optimalen Eintrag für die Reaktion mit stöchiometrischem Verhältnis. Der Großteil des Diamins reagierte mit dem Diketon und die folgenden Versuche wurden mit diesen Parametern durchgeführt wurde.

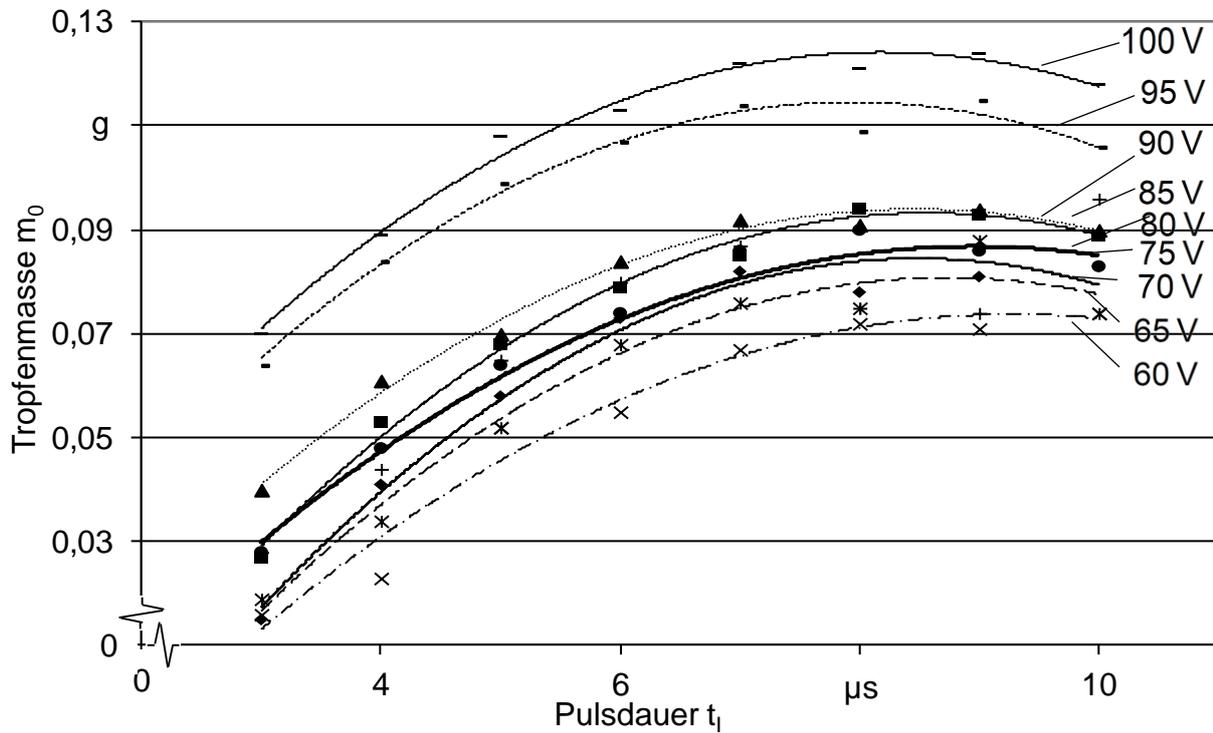


Abbildung 6.4: Einfluss der Pulsdauer  $t_I$  der Piezoaktoren und der Düsenspannung  $U_{DK}$  auf die Tropfenmasse  $m_0$

In Tabelle 6.4 sind die Prozessparameter für das Drucken für DikaDens und DikaPor ergänzend zu den Bindereigenschaften aus Tabelle 6.3 zusammenfassend dargestellt.

Nach Ermittlung der Korngrößenverteilung von  $10$  bis  $200 \mu\text{m}$  und der runden Partikelform durch Simulation (vgl. Kapitel 5) wurden für die Typen nach Tabelle 6.1 Pulver mit entsprechender Charakteristik für die Versuchsreihen für DikaDens und DikaPor gewählt. Die mittlere Korngröße  $d_{50}$  lag bei  $45 \mu\text{m}$  bei einer Verteilung zwischen  $10$  und  $150 \mu\text{m}$ . Es existierten sphärische Pulver.

| Parameter                                     | Abk.          | Einheit       | Wert |
|---|---------------|---------------|------|
| Druckkopf Temperatur                          | $T_{DK}$      | °C            | 30   |
| Pulsdauer                                     | $t_I$         | $\mu\text{s}$ | 5    |
| Düsen Spannung*                               | $U_{DK}$      | V             | 100  |
| Tropfenmasse bei einem Bindereintrag von 10 % | $m_0$         | g             | 0,1  |
| Druckgeschwindigkeit                          | $v_{Druck}$   | mm/s          | 200  |
| Druckkopfwinkel                               | $\alpha_{DK}$ | °             | 10   |
| Schichtstärke                                 | $h$           | $\mu\text{m}$ | 150  |

Tabelle 6.3: Einflussgrößen und Werte zur Prozessierung des Bindertyps 2 für die Herstellung von DikaDens und DikaPor im 3D-Druckprozess;  
\*Tropfenmasse für Bindertyp 2 bei  $t_I = 5$  und  $T_{DK} = 30$  °C

| Parameter                                   | Abk.       | Einheit       | DikaPor | DikaDens |
|---|------------|---------------|---------|----------|
| Schichtstärke                               | $h$        | $\mu\text{m}$ | 150     | 150      |
| Bindereintrag                               | $BE$       | %             | 10      | 10       |
| Zeit der Lagerung im Pulverbett             | $t_{iPB}$  | h             | 24      | 4        |
| Zeit der Lagerung außerhalb des Pulverbetts | $t_{aPB}$  | h             | 20      | 0        |
| Aushärtezeit im Ofen                        | $t_{Ofen}$ | h             | 4       | 0,75     |
| Aushärtetemperatur im Ofen                  | $T_{Ofen}$ | °C            | 50      | 180      |

Tabelle 6.4: Optimale Prozessparameter für die Herstellung von DikaDens und DikaPor im 3D-Druckprozess

Abbildung 6.5 stellt die Bruchfläche eines Bauteils aus DikaPor (Bildteil a)) und DikaDens (Bildteil b)) aus dem REM dar. Im linken Bildteil ist das sphärische Grundmaterial noch gut zu erkennen. Die einzelnen Partikel sind von Polyimin umhüllt, auch nicht verfestigtes Diamin ist auf den Körnern in plattenähnlicher Struktur zu erkennen. Das durch den Ofenprozess gesinterte DikaDens ist nahezu vollständig gefüllt und zeigt eine deutliche Bruchfläche. Die REM-Aufnahme wurde am Rand der Probe durchgeführt, so dass auch die gerade Wandstruktur mit guter Oberflächenqualität zu erkennen ist.

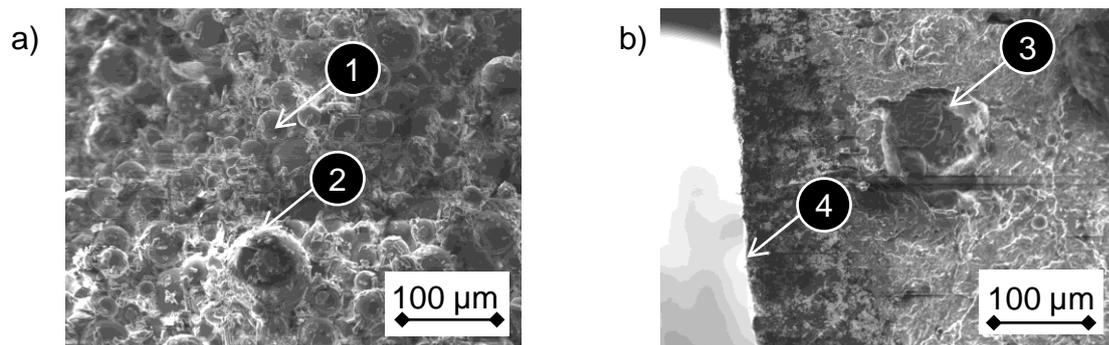


Abbildung 6.5: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines a) DikaPor- und eines b) DikaDens-Bauteils;  
1: Pulver 2: Diamin 3: Bruchfläche 4: Wandstruktur

Die Bauteile wurden analog zur Simulation mit einer Schichtstärke von 150 µm gedruckt. Versuche mit den Parametern aus Tabelle 6.3 ergaben bei dieser Schichtstärke einen exzellenten Schichtverbund, was zu den im folgenden Abschnitt angegebenen mechanischen Eigenschaften führt.

Das durch Polykondensation von Diamin und Diketon bzw. Dialdehyd zu Polyimin als Nebenprodukt entstehende Wasser war im späteren Bauteil vorhanden und beeinflusste die Festigkeit negativ, weshalb die Bauteile im Ofen getrocknet wurden. Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Trocknungs-ofen war dabei vom Grundmaterial abhängig. Für PMMA waren 4 Stunden bei 50 °C notwendig, während PA weit höhere Temperaturen benötigte (45 Minuten bei 180 °C). Insbesondere bei Letzterem war eine langsame Abkühlung im Ofen wichtig, um Eigenspannungsaufbau und damit starke Verformungen zu verhindern. Die Eigenspannungen entstehen durch schnelles Abkühlen des Bauteils und führten in diesem Fall zu einem Aufbiegen in z-Richtung. Des Weiteren konnte eine erhöhte Glasübergangstemperatur des DikaDens gegenüber PA aufgrund der Beimischung des Superabsorbers Tulsimers® beobachtet werden. Bei den meisten Polykondensationsreaktionen, welche bei einer im 3D-Druck herrschenden Temperatur von 20 bis 40 °C zu festen Bauteilen führen, werden sehr reaktive Reaktanden eingesetzt, um einen ausreichend schnellen und möglichst vollständigen Umsatz zu erhalten.

### 6.2.3 Eigenschaften

Im Fokus dieser Arbeit stand die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Die Zielgröße liegt bei  $E_t > 400$  MPa, was dem E-Modul von PolyPor entspricht. Analog dazu sollten die Bruchdehnung  $\epsilon_m$  und -spannung  $\sigma_m$  steigen.

Die Grünteilhärte von DikaPor wurde nach einer Unternehmens-internen Norm der Firma Voxeljet Technology GmbH bei Auslagerung einer Probe im und außerhalb des Pulverbetts mit dem in Abbildung 6.6 a) dargestellten Prüfaufbau gemessen. Im einen

Fall wurde die Grünteilhärte direkt nach Entnahme aus dem Pulverbett, wo sie zunächst eine definierte Zeit  $t_{iPB}$  verblieb, ermittelt. Beim anderen Fall wurden die Versuchskörper nach der gleichen Zeit aus dem Pulverbett entnommen und an Luft gelagert, bis sie nach einer bestimmten Zeit  $t_{aPB}$  mit einer Masse belastet wurden. Anschließend wurde die Eindringtiefe der Probe mit der Höhe  $d_{Probe} = 4 \text{ mm}$  bestimmt. Die Versuchsobjekte wurden mit zwei unterschiedlichen Massen ( $m_{N1} = 0,1 \text{ kg}$  und  $m_{N2} = 1,2 \text{ kg}$ ) während einer Zeit  $t_N = 10 \text{ s}$  belastet. Bei der größeren Masse wurde auch der Entlastungswert bestimmt.  $m_{N1}$  entspricht der Masse des Eindringkörpers und der Prüfuhr (vgl. Abbildung 6.6), für  $m_{N2}$  wird die Masse des Prüfzylinders  $m_{N3}$  mit  $m_{N1}$  addiert. Beides ist in Abbildung 6.6 a) zu sehen. Abbildung 6.6 b) zeigt die Geometrie des Prüfkörpers und c) sowie d) die des Versuchsobjekts. Der Entlastungswert entspricht der Eindringtiefe nach einer Zeit  $t_N = 10 \text{ s}$  nach einer Entfernung des Gewichts.

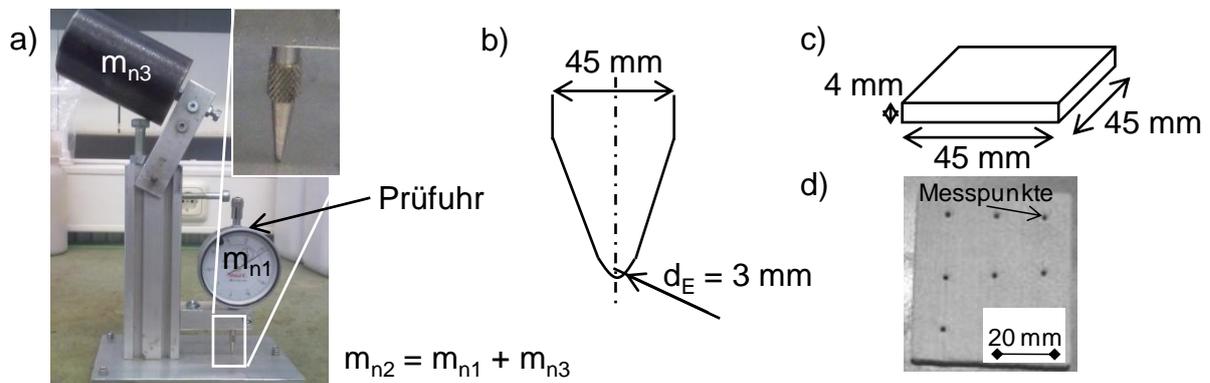


Abbildung 6.6: a) Versuchsaufbau zur Messung der Grünteilhärte mit den Prüfmassen nach einer Unternehmens-internen Norm der Firma Voxeljet Technology GmbH; b) Geometrie des Eindringkörpers; c) Geometrie des Versuchskörpers; d) Abbildung des geprüften Körpers

Die Ergebnisse der Härtemessung sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Oben rechts ist exemplarisch ein Probekörper abgebildet, der neun Messpunkte aufweist. Bei Auslagerung im Pulverbett war die Probe nach wenigen Stunden noch so weich, dass die Belastungsmasse den Körper vollständig durchdrang. Daher ergaben sich wegen der Probenhöhe von  $d_{Probe} = 4 \text{ mm}$  keine Werte größer als 4 mm. Erst ab einer Zeit von etwa zehn Stunden lag die Eindringtiefe  $d_e$  bei einer Masse von  $m_{N1B} = 0,1 \text{ kg}$  unter 0,5 mm. Dies ist ein Wert, ab welchem die untersuchten Körper eine ausreichende Härte für eine Entnahme aus dem Pulverbett aufwiesen. Es konnte somit eine Verkürzung der Auslagerungszeit gegenüber dem Material PolyPor aus Serienfertigungsverfahren um 14 Stunden erreicht werden. Testobjekte, welche außerhalb des Pulverbetts gelagert wurden, wiesen eine wesentlich höhere Grünteilhärte auf. Sie wurden nicht von Pulver umhüllt und das bei der Polykondensationsreaktion abgespaltete Wasser konnte besser verdunsten, was sich positiv

auf die Grünteilhärte auswirkte. Die Werte der Eindringtiefe  $d_e$  der Kurve „Auslagerung außerhalb des Pulverbetts“ bei einer Masse von 1,2 kg lagen daher etwa 1,5 mm niedriger.

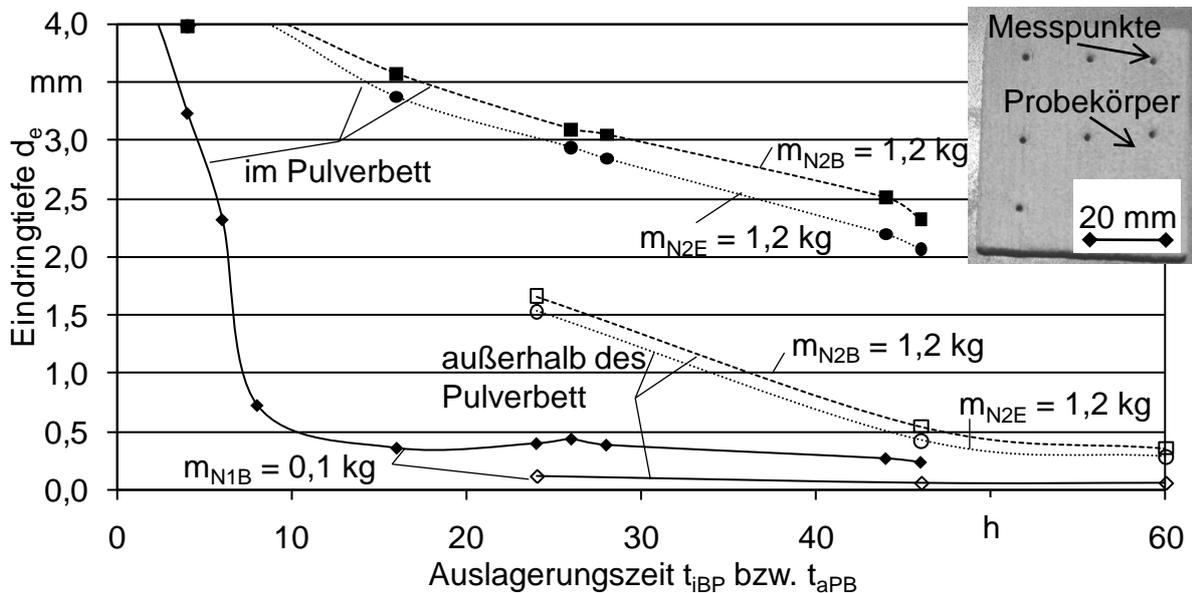


Abbildung 6.7: Grünteilhärte von DikaPor bei Auslagerung im und außerhalb des Pulverbetts sowie einer Probenhöhe von 4 mm nach einer Unternehmens-internen Norm der Firma Voxeljet Technology GmbH

Das Ergebnis der Entlastung betrug jeweils etwa 0,2 mm weniger als der Wert bei Belastung, was dem Bereich der elastischen Verformung entspricht. Die Werte bei Auslagerung außerhalb des Pulverbetts nahmen ab etwa 44 Stunden einen konstanten linearen Verlauf an, weshalb eine längere Wartezeit nicht zu einer Steigerung der Härte führte. Bei der Belastung der Proben mit 0,1 kg war lediglich eine Eindringtiefe von 0,1 mm (nach 24 Stunden) bis 0,01 mm (nach 60 Stunden) zu messen. Die Proben sollten also 10 Stunden im Pulverbett gelagert werden und anschließend weitere 34 Stunden an der Luft. Die Aushärtungszeit außerhalb des Pulverbetts konnte durch erhöhte Temperatur verkürzt werden. Ein Temperatur-Zeit-Profil von 4 h bei 40 °C und eine langsame Abkühlung im Ofen erwiesen sich als geeignet. Die Aushärtezeit konnte damit von 34 auf 4 Stunden gesenkt werden, was die Anwenderakzeptanz erheblich erhöht und die Fertigungskosten senkt.

Das verfestigte Material DikaDens wies ohne Ofenzyklus am Grünteil immer eine Eindringtiefe von 4 mm, also die vollständige Durchdringung der Probe auf. Eine Darstellung analog zu Abbildung 6.7 ist daher nicht sinnvoll. Zur Erzeugung einer geeigneten Härte wurde DikaDens bei 180 °C für 45 min gesintert und ebenfalls langsam im Ofen abgekühlt. Nach der Wärmebehandlung lag eine Serienwerkstoff-nahe Härte vor.

DikaPor und DikaPor<sub>mod</sub> zeigen die in Abbildung 6.8 dargestellte Charakteristik im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus dem Zugversuch. Bei DikaPor konnte eine Zugfestigkeit  $\sigma_m$  von bis zu 3,7 MPa erreicht werden, die zugehörige Bruchdehnung  $\epsilon_B$  betrug 0,36 % und der E-Modul erreicht  $E_t = 1000$  MPa. Die Änderung der Steigung bei einem Wert von 0,25 % Dehnung ist auf eine in DIN EN ISO 527 (1996) vorgeschriebene Änderung der Zuggeschwindigkeit zurückzuführen.

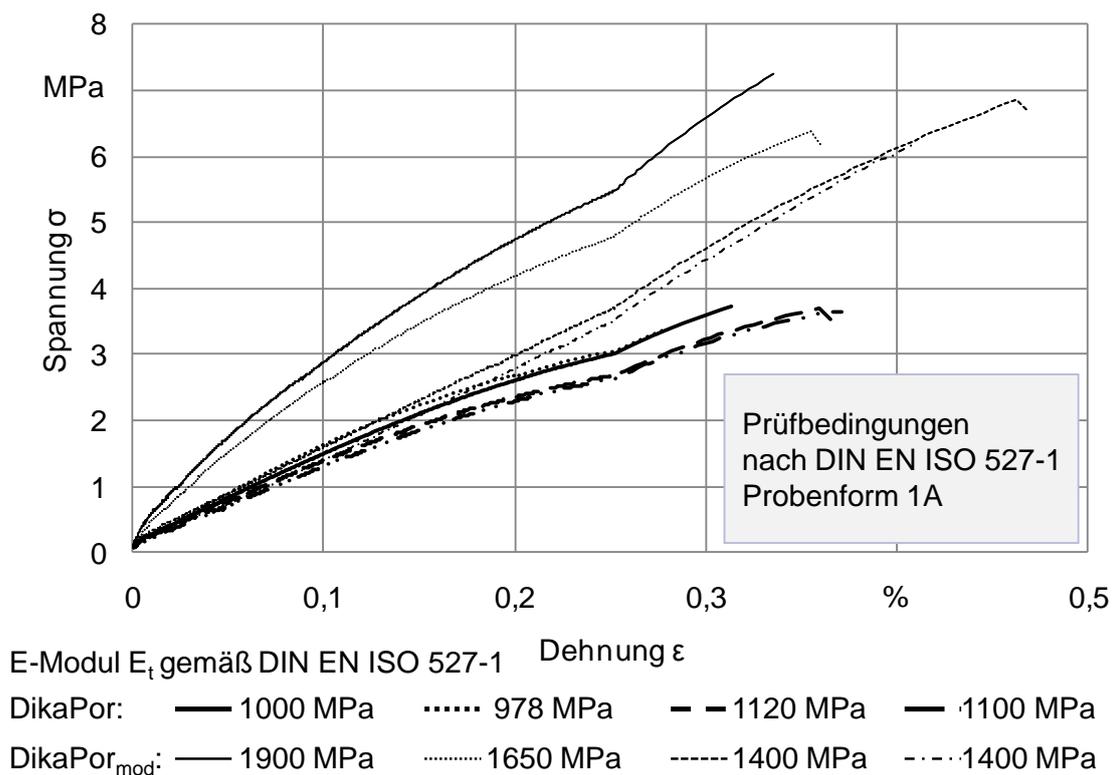


Abbildung 6.8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von DikaPor an acht Proben

DikaPor<sub>mod</sub> erreichte dagegen eine Zugfestigkeit bis zu  $\sigma_m = 7$  MPa, die zugehörige Bruchdehnung  $\epsilon_B$  betrug 0,3 % und der E-Modul  $E_t = 1900$  MPa. Die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  kann auf bis zu 0,5 % steigen.

DikaDens zeigte die in Abbildung 6.9 dargestellte Charakteristik im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus dem Zugversuch. Es konnte eine Zugfestigkeit  $\sigma_m$  von bis zu 27 MPa erreicht werden, die zugehörige Bruchdehnung  $\epsilon_B$  betrug 1,5 % und der E-Modul  $E_t = 2350$  MPa. Die Änderung der Steigung bei 0,25 % Dehnung trat auch hier auf, ist allerdings wegen der geringeren Auflösung schlechter zu erkennen. Aus den Spannungen und zugehörigen Dehnungen lässt sich, wie unter 2.4 ab Seite 28 beschrieben, der E-Modul aus dem Zugversuch  $E_t$  berechnen. Dieser wird für einen linear-elastischen Werkstoff als Steigung der Hookeschen Gerade angegeben.

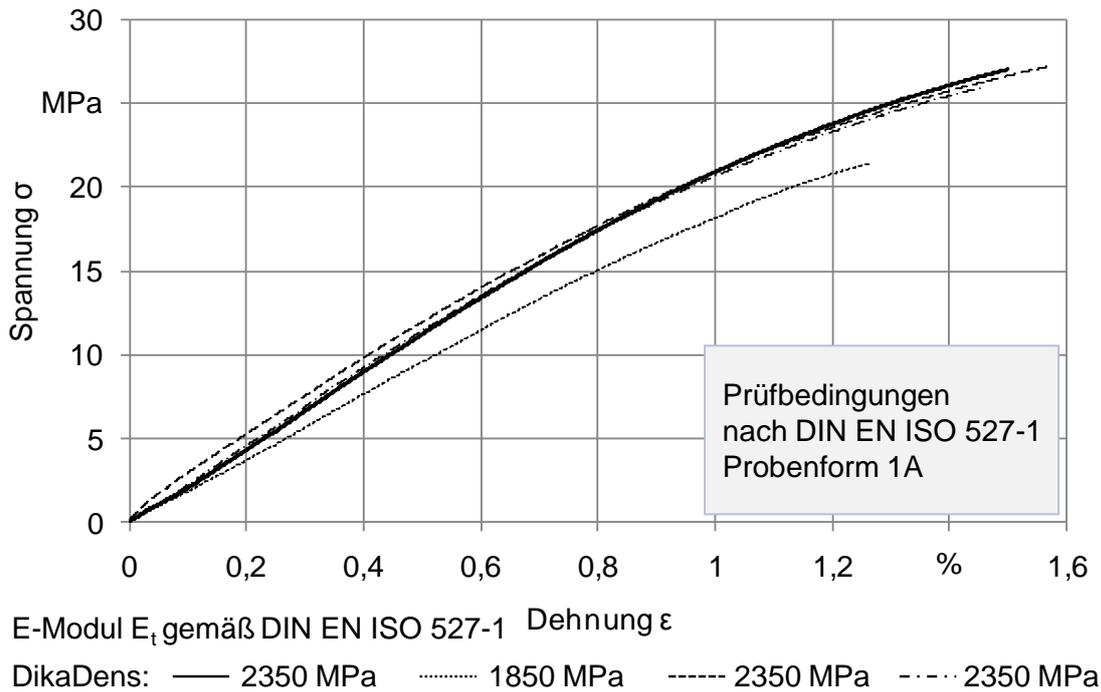


Abbildung 6.9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von DikaDens an vier Proben

Das Schwindverhalten der Materialien DikaPor und DikaDens nach dem Druckprozess und nach der auf den Werkstoff zugeschnittenen Ofenbehandlung (180 °C; 45 min; langsame Abkühlung im Ofen) zeigt grundsätzlich unterschiedliche Charakteristika (Abbildung 6.10).

Während DikaPor mit steigender Probengröße prozentual stärker schwindet, weist DikaDens das gegensätzliche Verhalten auf und verkleinerte sich mit zunehmender Probengröße weniger. Der Schwund betrug nach dem Druck bei DikaPor zwischen 2 % und 6 % und bei DikaDens zwischen 4 % und 5 %. Durch den eigentlichen Druckprozess wurde bei ersterem System also ein stärkerer Schwund ausgelöst, was auf die bessere Reaktion des Diamins und Diketons in dieser Zusammensetzung zurückzuführen ist. Dies wird auch durch die höhere Grünteilhärte des Systems belegt. Die im DikaDens zusätzlich eingebrachten Komponenten Tulsimer® und Polyvinylbutyral verringerten den Schwund, verminderten jedoch auch die Grünteilhärte. Durch eine Trocknung bei 50 °C über 4 h hinweg verringerte sich die Größe des DikaPor noch einmal um etwa ein weiteres Prozent. Im Gegensatz dazu stand das Sintern von DikaDens bei 180 °C für die Dauer von 45 min, welches einen starken und nicht-linearen Schwund zur Folge hatte. Die Werte betragen bei kleinen Bauteilen bis zu 21 %. Um solche Bauteile einsetzen zu können, ist zukünftig eine Vorskalisierung der Bauteile erforderlich. *Vorskalisierung* der Bauteile bedeutet, die Proben in der Baujobvorbereitung gegensätzlich so zu dimensionieren, dass diese durch den Schwund die gewünschte Größe annehmen. Die hier ermittelten Werte waren für eine Schwundsimulation, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, notwendig. Dort wurde das Prozessverhalten exemplarisch für den Werkstoff PolyPor modelliert.

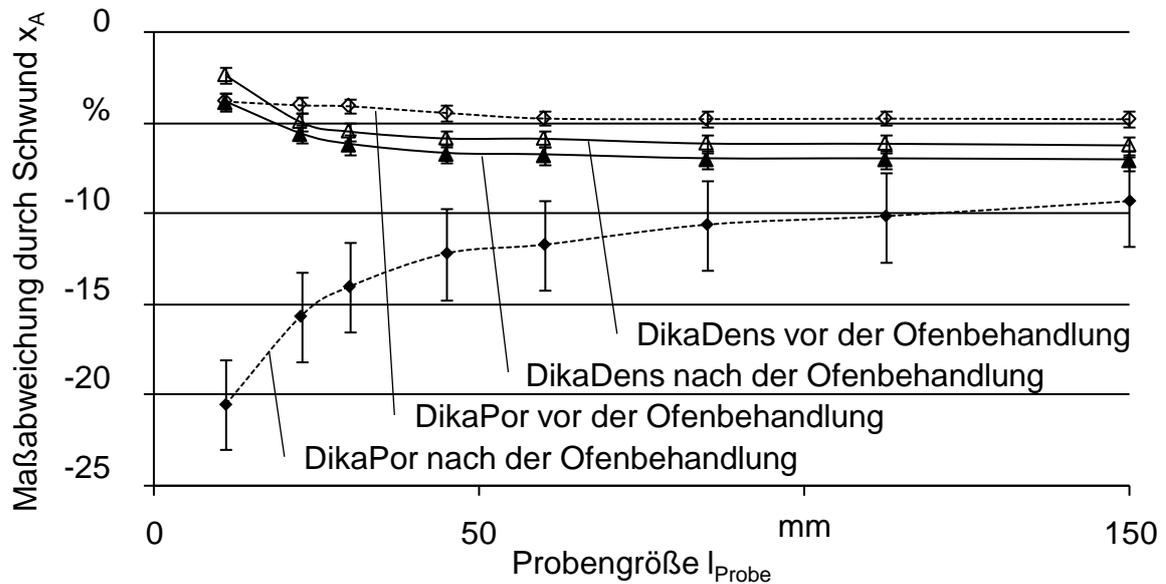


Abbildung 6.10: Schwund von DikaPor und DikaDens nach dem Druck und nach der Ofenbehandlung

Die 3D-gedruckten Proben verloren nach dem Prozess bis zu 5 % an Masse. Wie schnell dies geschieht, ist von der Lagerung abhängig, welche im und außerhalb des Pulverbetts sowie im Ofen stattfinden kann. Bei Trocknung an Luft wurden 5 % beispielsweise nach 60 Stunden erreicht. Die Masseabnahme ist auf die Verdunstung des bei der Polykondensationsreaktion entstehenden Abspaltungsprodukts Wasser zurückzuführen. Nicht vollständig getrocknete Proben weisen geringere Festigkeiten auf, weshalb eine schnelle Masseabnahme zielführend ist. Sie konnte durch den beschriebenen Ofenprozess erreicht werden.

#### 6.2.4 Fazit

Der folgenden Tabelle 6.5 sind die mechanischen Eigenschaften 3D-gedruckter Werkstoffe zu entnehmen. Dargestellt sind kommerzielles PolyPor und die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Materialsysteme DikaDens und DikaPor. Während das PolyPor einen E-Modul  $E_t$  von 400 MPa hat, weisen DikaDens 2350 MPa, DikaPor 1000 MPa bzw. DikaPor<sub>mod</sub> 1900 MPa auf. Dies entspricht einer Steigerung des E-Moduls um 250 bis 600 % gegenüber PolyPor, womit die Einsatzmöglichkeiten durch 3D-Drucken hergestellter Bauteile erheblich zunehmen.

| Parameter                 | Abk.              | Einheit | PolyPor | DikaPor | DikaPor <sub>mod</sub> | DikaDens |
|---------------------------|-------------------|---------|---------|---------|------------------------|----------|
| max. Zugfestigkeit        | $\sigma_{Bmax}$   | MPa     | 3,2     | 3,7     | 7,0                    | 27,0     |
| max. Bruchdehnung         | $\epsilon_{Bmax}$ | %       | 1,1     | 0,36    | 0,5                    | 1,5      |
| max. E-Modul (Zugversuch) | $E_{tmax}$        | MPa     | 400     | 1000    | 1900                   | 2350     |

*Tabelle 6.5: Mechanische Eigenschaften des kommerziellen Materials PolyPor sowie der entwickelten Werkstoffe DikaDens und DikaPor*

### 6.3 2D-Multimaterialsysteme

Bei einem 2D-Multimaterialsystem (siehe Abbildung 4.2 b) auf Seite 58) werden zwei verschiedene Pulver jeweils in Schichten aufgetragen und verfestigt. Eine Herausforderung für moderne Technik stellt dies nicht dar, denn es muss lediglich ein zweites Pulverauftragsmodul in die Anlage eingebaut und eine Verbindung der Schichten sichergestellt werden. Die Schwierigkeiten sind in der Ermittlung der geeigneten Prozessparameter für beide Materialien, ähnlich den Problemen bei Monomaterialsystemen sowie der nachgelagerten Trennung der beiden Pulvermaterialien, zu sehen. Bei stark variierender Korngrößenverteilung könnte das Pulver durch Zentrifugen oder Siebe separiert werden. Ist nur eines magnetisch, bietet sich eine Trennung durch Magnetismus an. Alle Verfahren sind jedoch sehr aufwändig und bieten keine absolute Sicherheit, ein reines Material zu erhalten.

### 6.4 3D-Multimaterialsysteme

#### 6.4.1 Allgemeines

Mit Hilfe der vorbereitenden Softwareschritte wurden verschiedene Bauteile platziert und möglichst platzsparend im Bauraum verteilt. Es stellt somit keinen Mehraufwand dar, unterschiedlich geartete Teile an Stelle von gleichen Geometrien in einem Prozess zu bauen. Konventionell werden komplexe Produkte in Einzelteilen produziert und anschließend zu Baugruppen zusammengesetzt. Durch Anwendung der 3D-Drucktechnologie können somit durch den Bau komplexer Produkte Montagevorgänge entfallen. Dieser Trend zur

Fertigung funktionsintegrierter Bauteile aus mehreren Materialien (Multimaterial) wird immer stärker (WEGNER & WITT 2010). Allein durch die Formgebungsfreiheit lassen sich jedoch keine Funktionen integrieren, welche auf unterschiedlichen Materialeigenschaften beruhen. Das Bauteil weist an jeder Stelle die gleichen mechanischen, elektrischen und thermischen Charakteristika auf und kann nur durch Variation von Wandstärken im Prozess angepasst werden. Zusätzlich zu auf Kunststoffen basierenden Verfahren werden in Zukunft mechatronische Komponenten eine wichtige Rolle spielen (GODLINSKI & MORVAN 2005). Daher ist es wünschenswert, 3D-Multimaterialbauteile mit diesen Komponenten zu fertigen. Werden in einem Prozess zwei oder mehrere Materialien verarbeitet, stellt neben der Zuführung und Bauteilpositionierung der Übergang zwischen den verschiedenen Werkstoffen und damit die sprunghafte Änderung der Eigenschaften die größte Schwierigkeit dar.

Um 3D-Multimaterialbauteile fertigen zu können, ist neben der in Abschnitt 4.3.2 erläuterten Anlagentechnik eine Materialentwicklung notwendig. Es müssen geeignete Werkstoffe gefunden und diese für den 3D-Druckprozess qualifiziert werden. Als Basis kann jedes im 3D-Druck zu verarbeitende Material (bspw. PolyPor) gesehen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prozess entwickelt, um Multimaterialbauteile aus einem Kunststoffgrundkörper mit Leiterbahnen herstellen zu können. Dies ist ein beispielhafter Anwendungsfall auf Basis der in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Anlagentechnik (Modul *P1*). Auch andere Materialien können über das dort beschriebene Modul zugeführt werden. Als Polymergrundmaterial wurden PolyPor und DikaPor verwendet.

In diesem Abschnitt werden Grundlagenversuche zur Herstellung von Multimaterialbauteilen mit Leiterbahnen erläutert. Der Kunststoffgrundkörper aus PolyPor wurde dabei als Isolator genutzt. Es wurde selektiv Metallpulver in das Bauteil eingebracht, wobei wegen des Kunststoffgrundkörpers auf ein nachgelagertes Sintern des Metalls verzichtet wurde. Das heißt, die Partikel mussten elektrisch leitend sein, ohne dass ein gesinterter oder geschmolzener Strang vorlag. Hier spielten Kontaktphänomene sowie Oxidation der Metalle eine entscheidende Rolle.

Die Herausforderung bestand also darin, ein Medium zu finden, welches leitfähig und im Prozess zu verarbeiten, also prozessierbar, ist. Dieses wurde durch den aus Abschnitt 4.3.2 bekannten Auftragsmechanismus gezielt lokal eingebracht. Dabei ist die schnelle Verfestigung des Materials ohne Verlaufen der Konturen relevant. Zudem muss es einen Zusammenhalt innerhalb der Schicht und zu den darunter- und darüberliegenden Schichten geben, so dass keine Delamination auftritt.

Um diese grundsätzliche Verarbeitbarkeit und eine potentielle Leitfähigkeit unterschiedlichster Materialien zu untersuchen, standen Pasten, Aerosole und Suspensionen im Fokus, da diese über ein Multimaterialauftragsmodul, wie unter Abschnitt 4.3.2 beschrieben, zugeführt werden können. Bei den Werkstoffen Stahl, Kupfer, Graphit und Silber ist eine Leitfähigkeit grundsätzlich möglich.

Die Materialien

- Zwei-Komponenten-Silberepoxidkleber [A],
- Leitsilberfluid [B],
- Graphitspray [C],
- Graphit-Pulver-Binder-System [D],
- 1.4404-Pulver-Binder-System [E],
- Kupfer-Pulver-Aerosol [F] und
- Kupfersuspension [G]

wurden als in Suspension oder als Aerosol manuell auf Probenkörper aufgetragen und unter Normalatmosphäre getrocknet. Anschließend wurden der elektrische Widerstand, die Länge des aufgetragenen Materials sowie dessen Querschnitt gemessen und daraus der spezifische Widerstand nach folgender Formel berechnet:

$$\rho_2 = \frac{R \cdot A_W}{l_W} \quad (6.1)$$

Dabei ist  $\rho_2$  der spezifische Widerstand,  $R$  der elektrische Widerstand,  $l_W$  die Länge und  $A_W$  die Querschnittsfläche (vgl. auch Abbildung 6.11).



$l_W$ : Länge des Widerstands

$A_W$ : Querschnitt des Widerstands

Abbildung 6.11: Maße eines elektrischen Leiters zur Berechnung des spezifischen Widerstands

Daraus ergeben sich die in Abbildung 6.12 dargestellten spezifischen elektrischen Widerstände. Es wurde deutlich, dass die spezifischen elektrischen Widerstände  $\rho_2$  der Systeme A, B, C und D wesentlich besser als die von E, F und G sind. Die letzteren drei sind als nicht-leitfähig anzusehen. Zusätzlich wurden die spezifischen elektrischen Widerstände der Versuchsmaterialien in Vergleich zu konventionell hergestelltem Silber, Kupfer und Graphit gesetzt. Dabei ist erkennbar, dass die hier verwendeten Silbersysteme einen größeren spezifischen Widerstand als konventionell erstelltes Silber haben. Bei Kupfer ist dieser Unterschied sogar noch wesentlich stärker ausgeprägt. Daher wird Kupfer im Gegensatz zu Silber im Rahmen dieser Arbeit keine Verwendung als Leiter finden. Graphit zeigt

dagegen bei der hier gewählten Verarbeitung einen niedrigeren spezifischen Widerstand als konventionell hergestelltes Graphit. Dies ist positiv. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden daher die Silber- und Graphitsysteme näher betrachtet. Für die gewählten Materialien wird die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  untersucht. Diese ergibt sich aus dem Kehrwert des spezifischen Widerstands  $\rho_2$ , wie unter Abschnitt 2.4.3 erläutert. Da die silber- und graphit-basierten Materialsysteme A, B, C und D in dem automatisierten Multimaterialmodul zu verarbeiten sein mussten, waren sowohl die Anwendung eines Sprays (Materialsystem C) als auch eines Zwei-Komponenten-Klebers (Materialsystem A) nicht möglich. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die weiteren Versuche mit Leitsilberfluid (B) und Graphitpulver-Binder-System (D) durchgeführt. Beide lagen in Suspension vor, es wurden sowohl die Zusammensetzung als auch die Suspensionsmedien variiert.

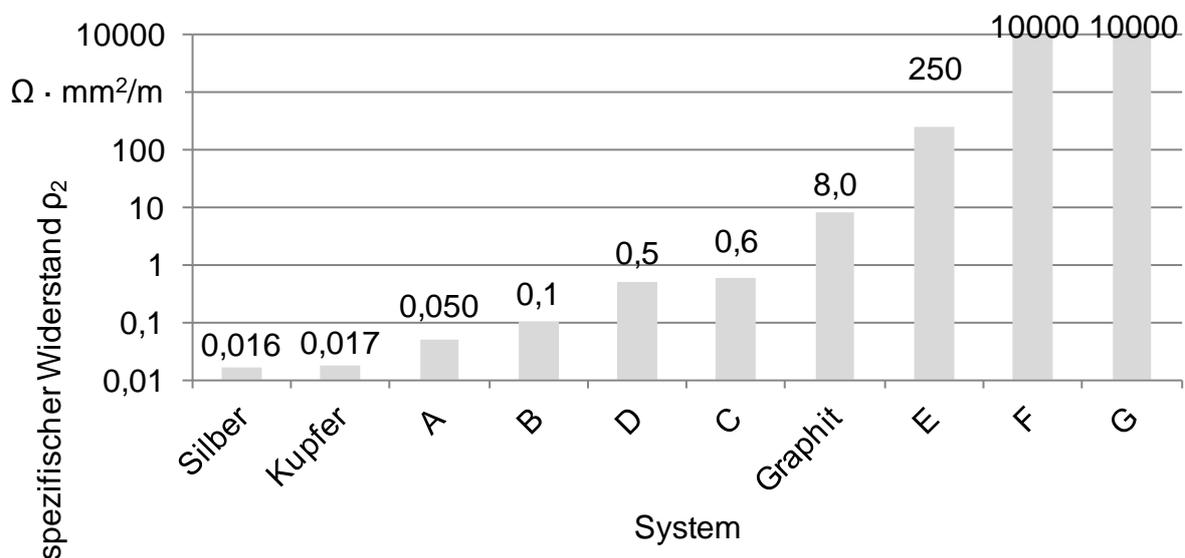


Abbildung 6.12: Spezifischer elektrischer Widerstand unterschiedlicher Materialien auf einem Grundkörper im Vergleich zu konventionell hergestelltem Silber, Kupfer und Graphit;  
 A: Zwei-Komponenten-Silberepoxidkleber, B: Leitsilberfluid,  
 C: Graphitspray, D: Graphitpulver-Binder-System,  
 E: 1.4404-Pulver-Binder-System, F: Kupferspray, G: Kupferpaste

## 6.4.2 Materialauswahl

Bei Leitsilber handelt es sich um eine instabile Suspension, in der 30 bis 50 % reine Silberpartikel vorlagen. Eine *instabile Suspension* ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Feststoffe schnell am Boden des Behälters absetzen. Die Silberpartikel hatten eine mittlere Korngröße  $d_{50}$  unter  $45 \mu\text{m}$  und wurden durch Mischen in der Schwebelage gehalten. Die verwendete Flüssigkeit war ein Gemisch aus 1-Ethoxypropan-2-ol (20,0 - 30,0 %), Ethanol

(12,5-20,0%), Aceton (5,0-7,0%) und Ethylacetat. Es wurden auch Versuche mit Nanosilber und weiteren Silberpulvern durchgeführt, die jedoch keine elektrische Leitfähigkeit aufwiesen.

Das verwendete Graphitpulver enthielt 91,6% Kohlenstoff und 3,6% Silizium, weitere Stoffe wie Aluminium, Eisen, Calcium, Schwefel und Magnesium waren in Anteilen unter 1% ebenfalls vorhanden. Die mittlere Korngröße  $d_{50}$  betrug unter  $45\ \mu\text{m}$  und die Partikel wurden in unterschiedlichen Mengen eingerührt. Als Suspensionsfluide wurden Ethanol, Benzylalkohol und Bindertyp 2 für die Experimente verwendet. Bei Letzterem nahm die Viskosität mit der Graphitkonzentration stark zu, was ein Verdrucken unmöglich machte. Ethanol resultierte in geringer Festigkeit, während die Anwendung von Benzylalkohol bereits eine Verfestigung des Polymergrundmaterials verursachte und damit zu festen Proben führte.

Für das entwickelte Auftragsmodul (vgl. Abschnitt 4.3.2 ab Seite 60) spielen die weiteren Charakteristika der Suspension im Gegensatz zur Verarbeitung im Druckkopf eine untergeordnete Rolle, da durch geeignete Wahl der Prozessparameter nahezu jede Suspension verarbeitet werden kann. Von großer Relevanz sind diesbezüglich folgende Größen:

- Drehzahl des Rührers  $n_R = 550 - 1000 \frac{1}{\text{min}}$  (bei den Spannungen  $U_R = 7 - 12\ \text{V}$ ), (vgl. Abbildung 4.6 auf Seite 64)
- Dauer des Druckstoßes ( $t_S = 1 - 10\ \text{ms}$ ) und -stärke ( $p_S = 2 - 8\ \text{bar}$ )
- Kanüldurchmesser ( $d_N = 0,15 - 0,5\ \text{mm}$ )
- Dauer der Trocknungsphase ( $t_T = 60\ \text{s}$ )

Die Abhängigkeit der Prozessparameter voneinander und deren Auswirkungen auf die Zielgrößen wurden für die Suspensionen ermittelt. Abbildung 6.13 zeigt den Einfluss des Kanüldurchmessers auf die Tropfenmasse bei  $p_S = 4\ \text{bar}$ ,  $t_S = 5\ \text{ms}$  und  $n_R = 1000 \frac{1}{\text{min}}$  (bei  $U_R = 7,5\ \text{V}$ ). Es ist deutlich erkennbar, dass mit steigender Größe der Kanülen die Masse der ausgegebenen Tropfen zunahm. Verglichen wurden die Leitsilber- und die Graphit-Ethanol-Suspension, bei denen je ein Teil Pulverpartikel zu zwei Teilen Fluid im Verhältnis stand. Ziel war ein möglichst geringer Auftrag, welcher prozesssicher ausgebracht werden kann. Dieser konnte für beide Suspensionen bei  $d_N = 0,2\ \text{mm}$  erreicht werden, die Tropfenmasse  $m_{t2}$  betrug dabei für Silber  $0,010\ \text{g} \pm 0,002\ \text{g}$  und für Graphit  $0,200\ \text{g} \pm 0,010\ \text{g}$ . Die Graphit-Benzylalkohol-Suspension wurde dagegen erst bei  $d_N = 0,33\ \text{mm}$  reproduzierbar prozessiert. Kanüldurchmesser über  $0,33\ \text{mm}$  führen wegen der zu geringen Viskosität der Suspension zu einem Ausfließen aus dem Multimaterialmodul. Der Einfluss des Kanüldurchmessers ist somit größer als der von Druckstoßstärke und -dauer. Die minimale Dauer der Trocknungsphase wurde experimentell mit  $t_T = 60\ \text{s}$  bestimmt.

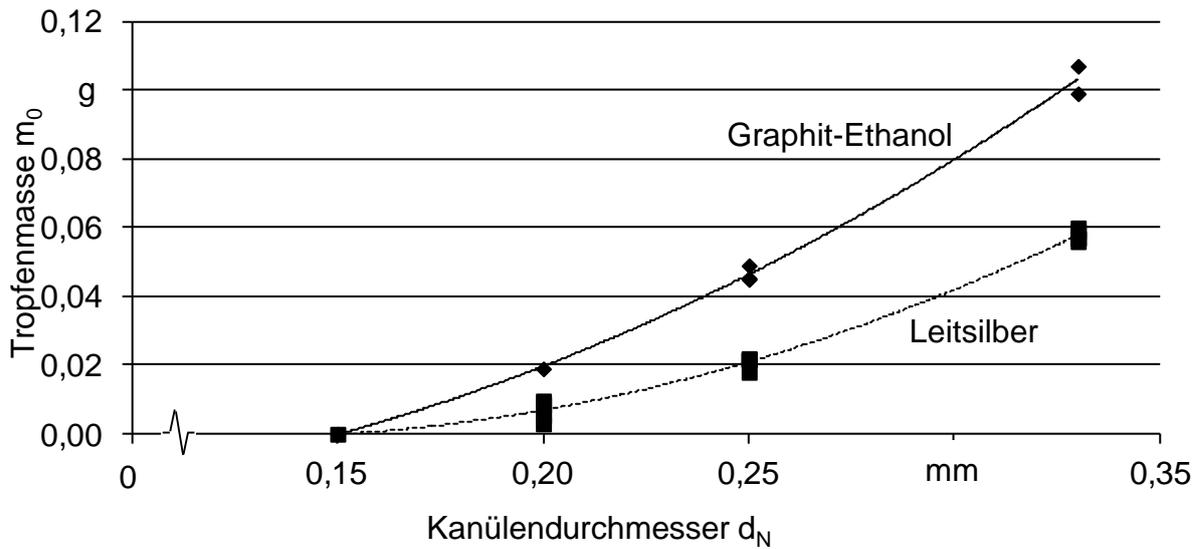


Abbildung 6.13: Einfluss des Kanüledurchmessers  $d_N$  auf die Tropfenmasse  $m_{t2}$  bei  $p_S = 4$  bar,  $t_S = 5$  ms und  $n_R = 1000 \frac{1}{\text{min}}$ ; Leitsilber mit 1-Ethoxypropan-2-ol, Ethanol, Aceton und Ethylacetat; Graphit-Ethanol im Verhältnis ein Teil fest zu einem Teil flüssig

Weitere Parameter sind weitestgehend unabhängig vom Material. Der Parameter Dauer des Rührvorgangs  $t_R$  hat ab  $t_R \geq 2$  s keinen Einfluss. Der Abstand zwischen Pulverschicht und Kanüle  $a_{PN}$  sollte etwa 0 mm betragen, während die Länge der Kanüle  $l_N$  mit 2,54 cm konstant gehalten wurde.

Der Einfluss des Druckstoßes wurde bezüglich Dauer und Stärke bewertet, wobei die besten Ergebnisse bei  $t_S = 5$  ms und  $p_S = 4$  bar erzielt wurden. Steigender Druck und längere Zeitintervalle führten zu größeren und damit nicht erwünschten Tropfenmassen, während geringere Werte als nicht prozesssicher ermittelt werden konnten. Der Einfluss der Druckstoßdauer ist jedoch geringer als der der Druckstoßstärke. Die erzeugten Tropfen haben eine Masse von 0,01 g bei Leitsilber, 0,04 g bei Graphit-Ethanol (bei denen je ein Teil Pulverpartikel zu zwei Teilen Fluid im Verhältnis stand) und 0,03 g bei Graphit-Benzylalkohol (im gleichen Verhältnis 1:2).

Die Rührgeschwindigkeit hatte keinen Einfluss auf die ausgegebenen Tropfengröße. Um jedoch eine konstante Leitfähigkeit zu erzeugen, war die Durchmischung der Suspension wichtig. Bei einer Spannung von  $n_R = 1000 \frac{1}{\text{min}}$  (bei  $U_R = 7,5$  V) konnte diese erreicht werden. Das beste Mischungsverhältnis für die Leitfähigkeit des Graphits mit Benzylalkohol oder Ethanol wurde mit 1:2 (fest:flüssig) ermittelt. Da mit Leitsilber kleinere Strukturen erzeugt werden können, ist dieses das am besten geeignete Suspensionsmedium.

### 6.4.3 Eigenschaften

Im Fokus dieser Arbeit steht die Verbesserung der mechanischen Festigkeit. Die Zielgröße für das Monomaterialsystem liegt bei  $E_t > 400$  MPa, was dem E-Modul von PolyPor entspricht. Für das Multimaterialsystem gelten die gleichen Bedingungen. Es soll zusätzlich keine Verminderung der Festigkeit durch die Leiterbahnen gegenüber polymerem Grundmaterial vorliegen. Zudem soll eine spezifische Leitfähigkeit von mindestens  $10 \text{ m}\Omega^{-1}\text{mm}^{-1}$  (HOFMANN ET AL. 2007) und eine Breite der Leiterbahn von höchstens 2 mm erreicht werden.

Der lineare Zusammenhang zwischen Tropfenmasse und Breite der Leiterbahn steht jedoch in Abhängigkeit zum Suspensionsmedium. Bei Leitsilber betrug der Durchmesser der aufgetragenen Tropfen, und damit die Breite der Leiterbahn, bei  $m_{t2} = 0,01$  g 2,4 mm, bei Graphit-Ethanol im Verhältnis 1:2 (fest:flüssig) und  $m_{t2} = 0,04$  g 7,5 mm, bei Graphit-Benzylalkohol (ebenfalls Verhältnis ein Teil fest zu zwei Teilen flüssig) mit  $m_{t2} = 0,03$  g 5,3 mm. Die geringste und damit beste Auflösung in der x-y-Ebene wurde mit Leitsilber erreicht. Die Auflösung in z-Richtung betrug in beiden Fällen minimal 150  $\mu\text{m}$ .

Die spezifische Leitfähigkeit  $\kappa$  wurde für alle Suspensionen bestimmt. Bei Leitsilber lag sie mit  $47,5 \pm 1 \text{ m}\Omega^{-1}\text{mm}^{-1}$  von allen untersuchten Medien am höchsten. Die Graphit-Suspensionen zeigten die beste Leitfähigkeit jeweils bei einem Verhältnis von 1:2 (fest:flüssig). Bei diesem Verhältnis betrug  $\kappa$  für Graphit-Ethanol  $4,05 \pm 0,08 \text{ m}\Omega^{-1}\text{mm}^{-1}$  und  $4,89 \pm 0,10 \text{ m}\Omega^{-1}\text{mm}^{-1}$  für Graphit-Benzylalkohol. Im Vergleich dazu liegt konventionell hergestelltes Silber bei  $62 \text{ m}\Omega^{-1}\text{mm}^{-1}$  und Graphit bei  $3 \text{ m}\Omega^{-1}\text{mm}^{-1}$ . Beide Werkstoffe erreichen damit nahezu die Werte konventioneller Herstellung.

Um den Einfluss der Materialkomponente Leiterbahn auf die Festigkeit abschätzen zu können, wurden Zugversuche an Multimaterialproben durchgeführt. Dabei wurden drei Formen (vgl. Abbildung 6.14) gewählt, die die Struktur der Zugproben bei geringer Festigkeit der Leiterbahn erheblich schwächen. Probenform A weist einen Leiter in Zugrichtung, Variante B einen solchen quer dazu, auf. Die größte Schwächung wurde in Probenform C erwartet, bei der eine ganze Ebene quer zur Zugrichtung in Leiterbahn-Material ausgeführt war.

Als Grundmaterial wurde bei den Proben zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften DikaPor verwendet, so dass sich die Ergebnisse mit den Zugversuchen aus Abschnitt 6.2.3 vergleichen lassen. Die geringste Verminderung der Zugfestigkeit trat bei allen untersuchten Medien bei Probenform A in Erscheinung. Bei Probenform A liegt die geringste Fläche des Leitmediums im Spannungsquerschnitt des Zugstabs. Dabei gilt der formelle Zusammenhang der Flächen im Spannungsquerschnitt nach Gleichung 6.2.  $A_{spg}$  entspricht der Gesamtfläche im Spannungsquerschnitt,  $A_{MM}$  steht für den Anteil der Leiterbahn, also des Multimaterialanteils, und  $A_{DikaPor}$  für den des polymeren Grundmaterials DikaPor.

$$A_{spg} = A_{MM} + A_{DikaPor} \quad (6.2)$$

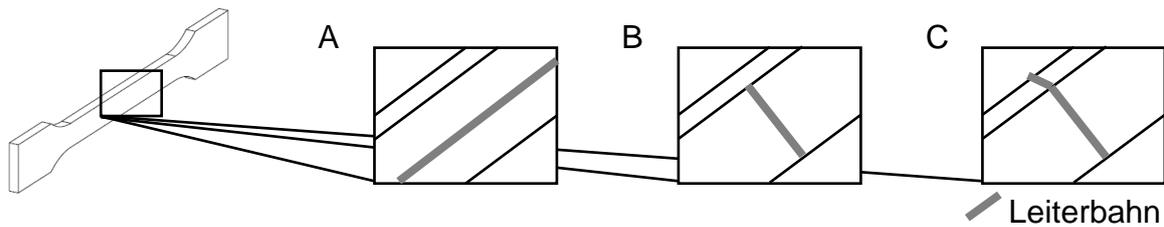


Abbildung 6.14: Gewählte Probenformen A, B und C für die Bewertung des Einflusses der Leiterbahnen auf die Festigkeit

Daraus ergibt sich für Probenform A  $A_{MM} = \frac{1}{9}A_{DikaPor}$  und für Probenform B  $A_{MM} = \frac{1}{4}A_{DikaPor}$ . Im Fall C resultiert  $A_{MM} = A_{spg}$ . Die Abbildungen 6.15 bis 6.17 zeigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Multimaterialproben bei Verwendung von Leitsilber, Graphit-Ethanol- bzw. Graphit-Benzylalkohol-Suspension in den Probenformen A, B und C und den Vergleich zu DikaPor und DikaPor<sub>mod</sub>. Bei Monomaterial wurde eine Zugfestigkeit  $\sigma_m < 3,7$  MPa bzw.  $\sigma_m < 7$  MPa gemessen. Im Gegensatz dazu steht die wesentlich geringere Festigkeit von 1,1 bis 1,7 MPa bei Integration von Leiterbahnen aller untersuchten Proben.

Probenform A wies bei Multimaterialproben unter Verwendung von Leitsilber als Leiterbahnmaterial immer noch eine Zugfestigkeit  $\sigma_m$  von bis zu 2,5 MPa auf. Variante B und C zeigten nur 1,5 MPa beziehungsweise bis 1,7 MPa (Abbildung 6.15).

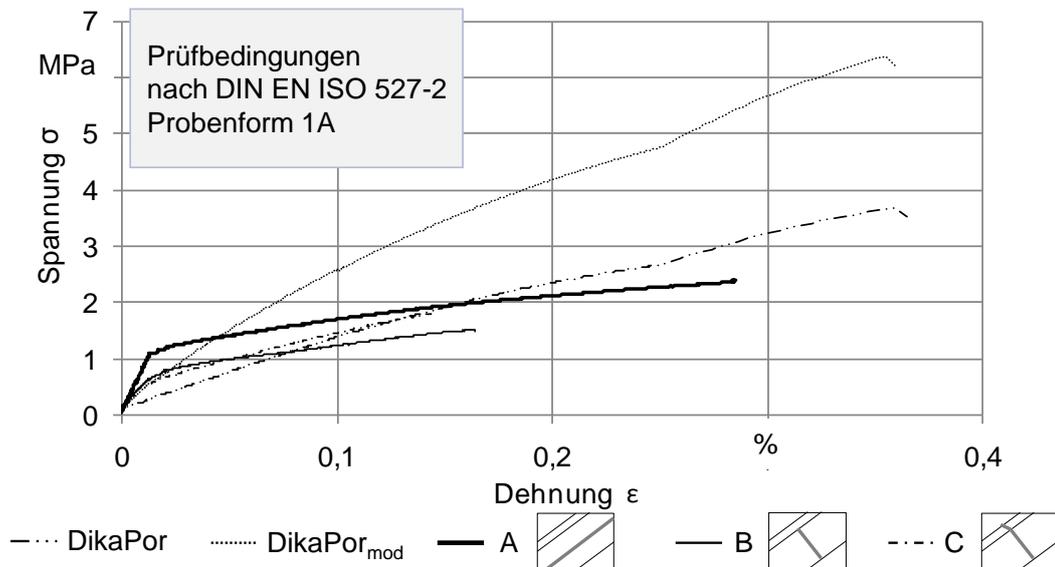


Abbildung 6.15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Multimaterialproben mit Leitsilber als Leiterbahn in Grundmaterial DikaPor (Probenformen A, B und C) im Vergleich zu reinem Werkstoff (DikaPor bzw. DikaPor<sub>mod</sub>)

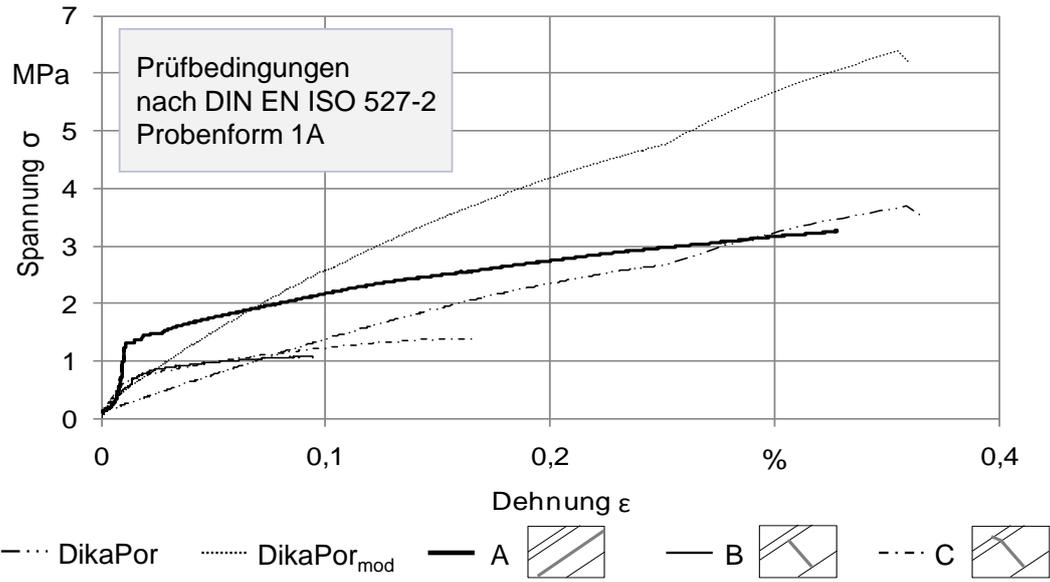


Abbildung 6.16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Multimaterialproben mit Graphit-Ethanol-Suspension als Leiterbahn in Grundmaterial DikaPor (Probenformen A, B und C) im Vergleich zu reinem Werkstoff (DikaPor bzw. DikaPor<sub>mod</sub>)

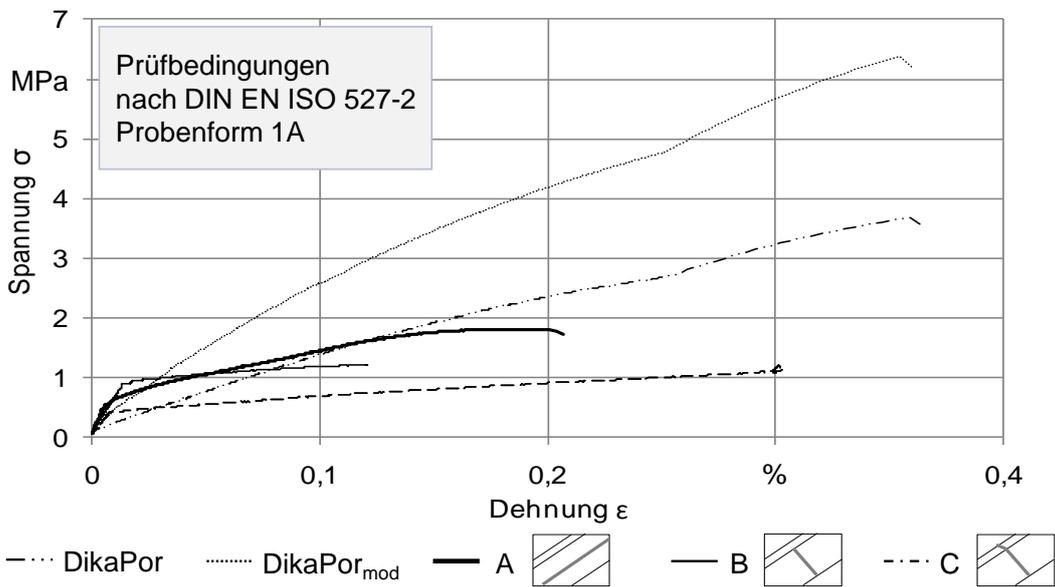


Abbildung 6.17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Multimaterialproben mit Graphit-Benzylalkohol-Suspension als Leiterbahn in Grundmaterial DikaPor (Probenformen A, B und C) im Vergleich zu reinem Werkstoff (DikaPor bzw. DikaPor<sub>mod</sub>)

Die Verwendung von Graphit in Suspension mit Ethanol oder Benzylalkohol führte zu einer ähnlichen Schwächung des Bauteils. Probenform A wies bei beiden Graphitsuspensionen eine Zugfestigkeit von 2 bis 3 MPa auf, bei B und C war  $\sigma_m$  1,1 bis 1,4 MPa (vgl. Abbildung 6.16 und 6.17). Gravierender war die Erhöhung der Sprödigkeit bei der Probenform B und C, verursacht durch die Kerbwirkung des zweiten Materials (Silber oder Graphit). Es kam schon bei äußerst geringen Dehnungen zum Bruch der Proben. Die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  von 0,46 % bei DikaPor zeigte auch die Probenform A, während die anderen bei allen drei Suspensionen eine Bruchdehnung  $\epsilon_B$  von 0,1 bis 0,2 % aufwiesen. Bei Positionierung der Proben im Bauraum ist somit auf eine Ausrichtung der Leiterbahn in Richtung der höchsten Beanspruchung des späteren Bauteils zu achten, um den schwächenden Einfluss des zweiten Materials zu minimieren.

#### 6.4.4 Fazit

Die Ergebnisse lassen auf ein großes Potential des 3D-Kunststoffdrucks zur Herstellung von Bauteilen schließen, wenn eine Angleichung an die mechanischen Eigenschaften von reinem DikaPor bzw. DikaPor<sub>mod</sub> möglich wird. Insbesondere die Integration von Zusatzfunktionen in das Bauteil, wie z. B. Leiterbahnen, erwies sich in der prozesstechnischen Umsetzung als lösbare Aufgabenstellung. Der Kunststoff selbst, welcher schon heute in 3D-Druckern verarbeitet werden kann, fand Anwendung als Isolator. Elektrische Leitfähigkeit konnte unter Applikation geeigneter Medien (Suspensionen mit Silber- oder Graphitpartikeln) in das Bauteil eingebracht werden. Die grundsätzliche Machbarkeit solcher Prozessänderungen wurde an dem in Kapitel 4 beschriebenen Prototyp umgesetzt, eine Übertragbarkeit auf die Serienfertigung konnte in weitergehenden Untersuchungen verifiziert werden. In einer Serienanlage (VX500) wurde ein Multimaterialmodul gebaut und es wurden Bauteile aus mehreren Werkstoffen produziert.

Insbesondere die Auftragsgenauigkeit wurde durch automatisierte Bereitstellung des zweiten Materials gegenüber dem manuellen Suspensionsauftrag verbessert. Abbildung 6.18 belegt, dass die Auflösung sowohl bei Graphit als auch bei Silber von 10 auf  $2 \pm 0,1$  mm verbessert werden konnte.

Abbildung 6.19 stellt ein Bauteil mit integrierten Leiterbahnen aus Silber und Graphit dar, welche durch 3D-Drucken hergestellt wurden. Der rechte Bildteil zeigt eine vergrößerte Aufnahme mit einer Leiterbahn aus Silber.

Die leitfähigen Partikel (länglich, Mitte) sind klar von den isolierenden Polymeren (rund, außen) abgesetzt. Die Schichthöhe von etwa 0,15 mm ist deutlich zu erkennen. Sie entspricht der aktuell bestmöglichen Auflösung in z-Richtung. Damit konnte die Umsetzung eines Multimaterialbauteils mit zwei verschiedenen Leitmedien dargelegt werden. Eine die elektrische Leitfähigkeit der Proben beeinträchtigende Oxidation der Silberpartikel trat im zeitlichen Rahmen der Versuchsreihen kaum auf. Somit konnte der Prozess umgesetzt werden

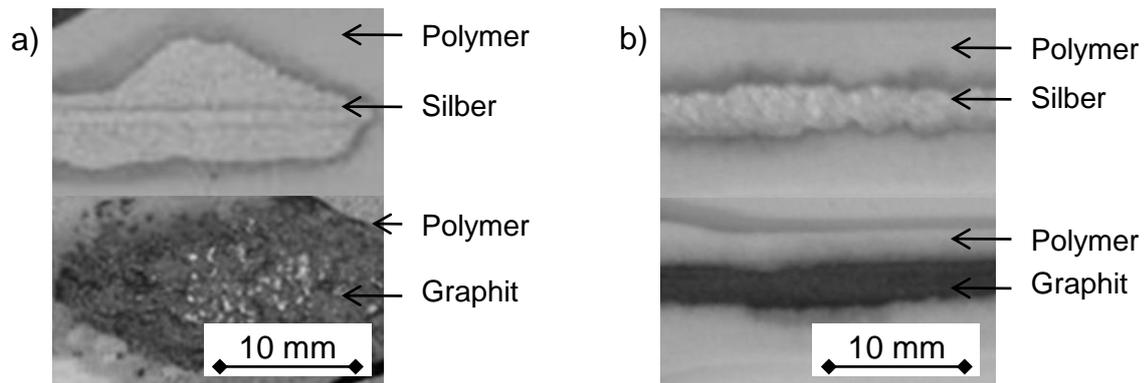


Abbildung 6.18: Auftragsgenauigkeit bei automatisierter Zuführung der Silber- und Graphitsuspension auf ein Polymer (DikaPor);

a) Manueller Auftrag

b) Automatisierter Auftrag

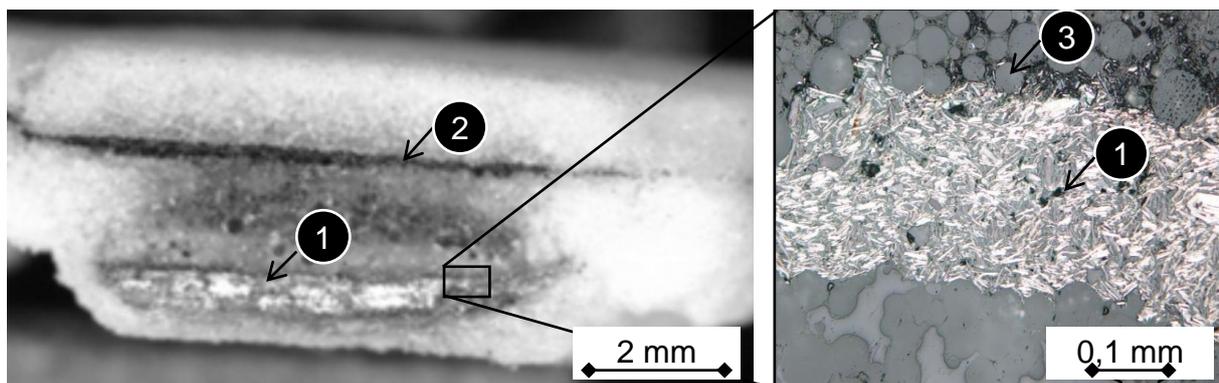


Abbildung 6.19: Multimaterialbauteil mit integrierten Leiterbahnen aus Silber und Graphit;  
1: Leiterbahn aus Silber 2: Leiterbahn aus Graphit 3: DikaPor (Polymer)

und es war eine automatisierte Herstellung solcher Produkte im 3D-Druck-Demonstrator (vgl. Kapitel 4) möglich.

Das Multimaterialmodul wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Herstellung funktionsintelligenter Produkte mit Leiterbahnen verwendet. Eine Übertragbarkeit auf andere Materialien als leitfähige Suspension ist denkbar. Beispielsweise könnte Transparenz durch modifiziertes PMMA oder hohe Elastizität durch Auftrag eines Silikons mit dem gleichen Modul erreicht werden.

## 6.5 Zusammenfassung

In Rahmen dieses Kapitels wurde das 3D-Drucken zur Erstellung von Mono- und Multimaterialbauteilen vorgestellt. Mit Hilfe der entwickelten Materialsysteme und der so erreichten Eigenschaften ist es zukünftig möglich, nicht nur Modelle und Prototypen mit Hilfe dieser Technologie zu produzieren, sondern auch direkt Produkte zu fertigen. Die Klassifizierung in 1D-, 2D- und 3D-Materialien gab den Rahmen vor. Dabei eröffnet insbesondere die Funktionsintegration bei Anwendung der 3D-Multimaterialien neue Möglichkeiten, um zukünftigen Herausforderungen hinsichtlich verschärften Produktanforderungen zu begegnen.

Das Monomaterial PolyPor wurde analysiert und als Vergleichssystem angewendet. Auf Basis des Universal-Pulver-Binder-Systems, bei dem Diamin und Diketon zu Polyimin reagieren, können höherwertige Bauteile hergestellt werden. Der E-Modul konnte gegenüber PolyPor um 250 bis 600 % gesteigert werden.

Parallel dazu wurde das 3D-Multimaterialsystem entwickelt, bei dem ein zweites, leitfähiges Material auf den polymeren Grundkörper aufgebracht wird. Mit Hilfe dieses Ansatzes können Multimaterialbauteile mit Leiterbahnen aus Silber und Graphit hergestellt werden. Die Auflösung in der x-y-Ebene betrug dabei  $1 \pm 0,05$  mm, in der z-Richtung waren es 0,15 mm. Die erzeugten Leitfähigkeiten lagen bei  $\kappa = 47,5 \pm 1 \Omega^{-1}mm^{-1}$  (Silber) beziehungsweise  $\kappa = 4,05 \pm 0,08 \Omega^{-1}mm^{-1}$  (Graphit). Die Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie bei konventionell hergestellten Silber- und Graphitwerkstoffe.

Die Ergebnisse des Abschnitts 6.2 zu den Monomaterialien stehen in engem Zusammenhang mit den in Kapitel 5 erarbeiteten Simulationsmodellen. Die Resultate der Materialentwicklungen flossen in großem Maße in die Modellierung ein.



# 7 Nutzwertanalyse

## 7.1 Vorgehen im Kapitel

Zur Darstellung der Wirtschaftlichkeit des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten pulverbettbasierten 3D-Druckverfahrens wird eine Nutzwertanalyse (NWA) durchgeführt. Die Untersuchung wird anhand eines Bauteils für die Fertigungsverfahren Zerspanung, Spritzgießen und 3D-Drucken vorgenommen. Betrachtet wurden dabei jeweils unterschiedliche Stückzahlen.

Als Anwendungsbeispiel wird das Multimaterialmodul zur Prozessierung eines zweiten, leitfähigen Mediums, welches in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wurde, umgesetzt. Wurde das zu betrachtende Produkt ursprünglich konventionell durch Fräsen gefertigt und anschließend eloxiert, wird es für die NWA als 3D-gedruckt angenommen. Dafür wird das Bauteil umkonstruiert, so dass es die an das Modul gestellten Anforderungen besser umsetzt. Zudem wird eine Funktionsintegration angestrebt, um Montageschritte nach der Fertigung zu vermeiden. Auf diese Weise kann das Multimaterialmodul im Drucker produziert und anschließend direkt in eine VX500-Anlage eingebaut werden.

## 7.2 3D-Druck-gerechte Konstruktion

Die Fertigung des Auftragsmoduls durch das 3D-Drucken bot sich wegen der Möglichkeit zur Funktionsintegration zur Minimierung von Montageschritten und im Hinblick auf die wirtschaftliche Fertigung in Stückzahl 1 an. Insbesondere Letzteres spielt eine große Rolle, da Investitionsgüter wie 3D-Druck-Anlagen aktuell in geringer Stückzahl gefertigt werden.

Das als Referenzbauteil gewählte Auftragsmodul (vergleiche Abbildung 4.4 in Abschnitt 4.3.2), welches 3D-gedruckt wurde, besteht aus einer Kartusche mit wechselbaren Kanülen unterschiedlicher Durchmesser zur Dosierung und einem elektrisch angetriebenen integrierten Propeller zur Durchmischung der Suspension. Über die Kupplung können sowohl Materialzufuhrsysteme als auch die Druckluft zugeschaltet werden. Durch 3D-Drucken wurden die Teile gefertigt, welche nicht kommerziell erhältlich sind. Dies gilt nicht für den Mischmechanismus und die Spritze. Relevant für den 3D-Druck sind somit die Kupplung und der Mechanismus zur Regulierung der Höhe über dem Pulverbett sowie alle Halterungen, welche je nach Anlage unterschiedlich ausfallen können. Das entwickelte Modul wurde in den in Kapitel 4 beschriebenen Teststand eingebaut.

Die überarbeitete Konstruktion zeichnet sich durch ein hohes Maß an Funktionsintegration aus und ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Der Bereich der Kartusche und des

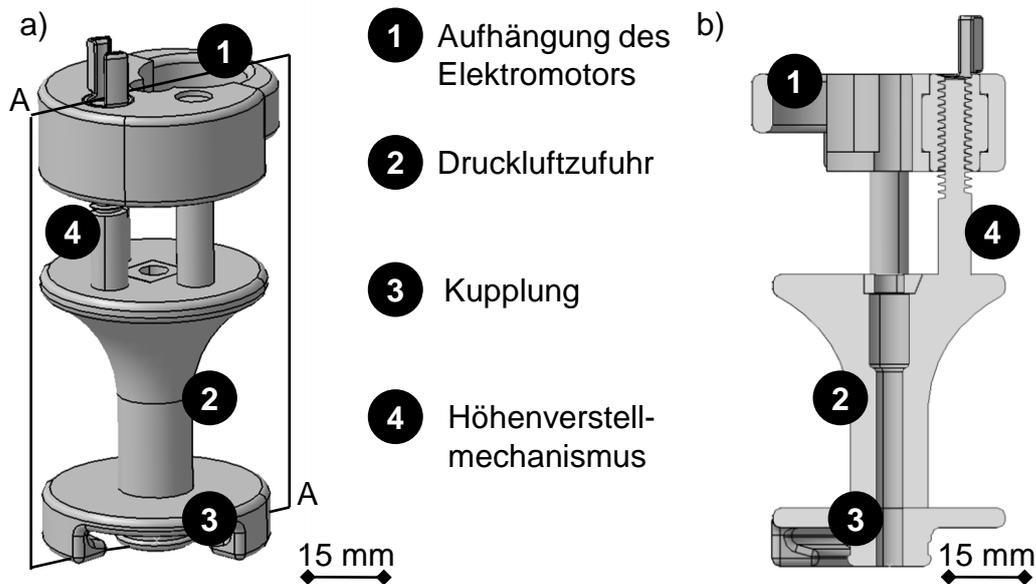


Abbildung 7.1: 3D-Druck-gerechte Konstruktion des Auftragsmoduls;  
 a) Gesamtdarstellung  
 b) Schnitt A-A

Rührmechanismus blieb unberührt, da es sich bei diesen um Serienteile handelt, welche über das 3D-Drucken nur schwer wirtschaftlich herzustellen sind. Das komplette Kuppelungssystem sowie die verbindenden Elemente zur y-Achse des 3D-Druckers wurden für die Fertigung mit generativen Verfahren ausgearbeitet und die Funktionalität des Elements in den Vordergrund gestellt. Diese integrale Bauweise minimiert die Montagekosten, da das zuvor aus sieben Teilen bestehende Multimaterialmodul in ein einziges funktionsintegriertes Bauteil umgewandelt werden konnte. Gleichzeitig wurden die Schrauben, welche in der ursprünglichen Variante als verbindende Elemente eingesetzt wurden, eliminiert und stattdessen Schnappverbindungen entwickelt. So konnten weitere sechs, und damit insgesamt 13 Bauteile, durch eines ersetzt werden. Die bewegte Masse wurde somit ebenfalls verringert.

### 7.3 Wettbewerbsfaktoren

Die Nutzwertanalyse gehört zu den quantitativen nicht-monetären Analysemethoden der Entscheidungstheorie (RINZA & SCHMITZ 1992). Es liegen sogenannte weiche Kriterien (z. B. Qualität) vor, welche schwer als Geldwert darzustellen sind. Es handelt sich um ein sehr flexibles System, mit welchem auch komplexe Alternativen bewertet werden können. Nachteil ist die zum Teil subjektive Einschätzung bei der Gewichtung (HANUSCH 2011, RINZA & SCHMITZ 1992).

Die Bewertung fand unter Beachtung von Zeit, Qualität und Kosten statt. Diese drei Wettbewerbsfaktoren stehen in wechselseitiger Beeinflussung. Eine Verbesserung eines

Faktors schlägt sich meist negativ auf mindestens einen der anderen beiden aus. Abbildung 7.2 zeigt dieses Spannungsfeld in klassischer Dreiecksdarstellung.

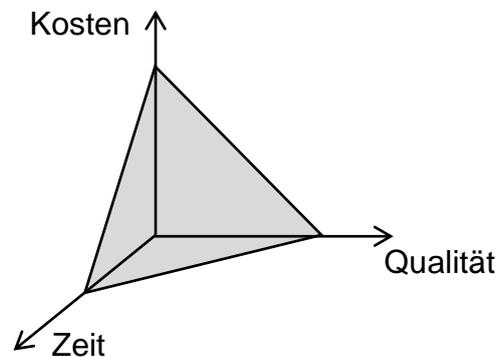


Abbildung 7.2: Spannungsfeld von Zeit, Qualität und Kosten

Für jeden der Wettbewerbsfaktoren wurde eine Nutzwertanalyse, für die Faktoren Zeit und Kosten auch für unterschiedliche Stückzahlen, umgesetzt. Dabei wurden für jeden Faktor Kriterien definiert (vgl. Tabelle 10.5 bis 10.11 im Anhang) und diese evaluiert. Diese Kriterien unterscheiden sich für die unterschiedlichen Wettbewerbsfaktoren. Die betrachteten Stückzahlen waren 5 (Einzelfertigung), 500 (Kleinserie) und 50.000 (Großserie). Im Fokus der Untersuchung standen die Fertigungsverfahren

- 3D-Drucken,
- Spritzgießen und
- Zerspanung.

Der Nutzwert ergibt sich dann nach Formel 7.1 als Summe der Teilnutzwerte (RINZA & SCHMITZ 1992).  $N(s_j)$  entspricht dabei dem Nutzwert einer Alternative  $s_j$ , während  $n_{ij}$  der zugehörige Teilnutzwert ist. Der Gewichtungsfaktor des Teilnutzens wird mit  $g_i$  bezeichnet.

$$N(s_j) = \sum n_{ij}g_i \quad (7.1)$$

Die vielen Teilnutzwerte  $n_{ij}$  für die drei Wettbewerbsfaktoren werden den Ebenen Pre- und Post-Processing sowie dem Prozess selbst zugeordnet, wie in Abbildung 7.3 dargestellt. Dabei wird der Teilnutzwert jeweils für ein Kriterium berechnet. Die Gewichtung findet durch paarweisen Vergleich statt. Die Kriterien für die Teilnutzwerte werden für jeden Wettbewerbsfaktor im Folgenden erläutert.

Für den Faktor *Zeit* ergeben sich damit die Kriterien Pre-Processing, Prozess, Bauteilnachbearbeitung und nachgelagerte Montage, die nach Tabelle 10.5 bis 10.7 im Anhang gewichtet werden. Das Pre-Processing beinhaltet dabei den Zeitaufwand zur Konstruktion



Abbildung 7.3: Teilnutzen fließen getrennt nach Pre- und Post-Processing sowie Prozess in den Gesamtnutzwert der jeweiligen Wettbewerbsfaktoren ein

des Bauteils sowie zur Datenvorbereitung. Bei Letzterer spielt bei der Zerspanung das CNC-Programmieren, beim Spritzgießen die Erstellung des Werkzeugs und beim 3D-Drucken die Erzeugung der Schichtdaten eine entscheidende Rolle.

Der Faktor *Qualität* wird Stückzahl-unabhängig bewertet. Die Kriterien für die Teilnutzwerte sind Zuverlässigkeit des Verfahrens, minimale und maximale Abmaße, Komplexität der zu fertigenden Teile, die Möglichkeit der Funktionsintegration sowie kurzfristiger Bauteiländerungen und die Oberflächenqualität. Tabelle 10.8 im Anhang gibt dabei den Überblick über die Gewichtung.

Der Faktor *Kosten* wird analog zur Zeit Stückzahl-abhängig bewertet. Die Kriterien für die Teilnutzwerte sind die Kosten für Pre-Processing, Lohn, Materialbereitstellung, Recycling-Fähigkeit, Maschinen, Hilfsstoffe, Bauteilnachbearbeitung und nachgelagerte Montage. Deren Gewichtung ist für die unterschiedlichen Stückzahlen in den Tabellen 10.9 bis 10.11 im Anhang zusammengefasst.

## 7.4 Auf die Wettbewerbsfaktoren bezogener Nutzwert

Nach Durchführung der Nutzwertanalyse ergeben sich die gewichteten Nutzwerte für die Verfahren 3D-Drucken, Zerspanung und Spritzgießen der Wettbewerbsfaktoren Zeit, Qualität und Kosten. Für den Wettbewerbsfaktor Zeit ist der Einfluss der Losgrößen in Abbildung 7.4 deutlich erkennbar, wobei insbesondere das Pre-Processing eine Rolle spielt, welcher die Zeit bei niedrigen und mittleren Stückzahlen dominiert. Wie zu erwarten, nimmt auch bei einem derart komplexen Produkt der Nutzwert für das Spritzgießen mit steigender Stückzahl zu, während die Stärke des 3D-Druckens im Bereich kleiner Stückzahlen liegt. Das Zerspanen ist nahezu unabhängig von der Stückzahl. Die Analyse ergab, dass es sinnvoll ist, bis zu Stückzahlen von 500 das 3D-Drucken einzusetzen. Im Bereich zwischen 500 und 50.000, also beim Übergang von der Klein- zur Großserie, liegt der Break-Even-Point zur Anwendung des Spritzgießens. Zwar ist die Zykluszeit  $t_Z$  beim Spritzgießen sehr niedrig, wegen der langen Vorbereitungszeiten für Werkzeuge lohnt sich dieses Verfahren jedoch

erst ab dieser relativ hohen Stückzahl.

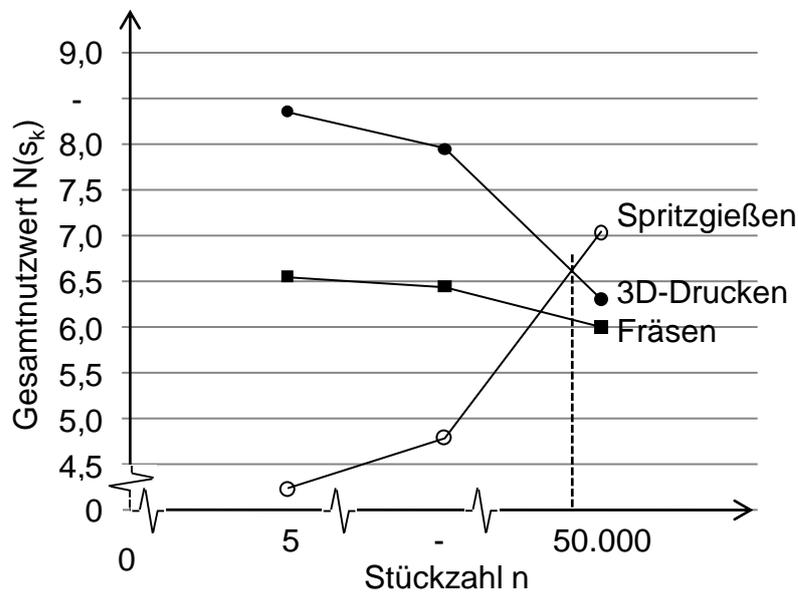


Abbildung 7.4: Nutzwert der Verfahren 3D-Drucken, Zerspanung und Spritzgießen für den Wettbewerbsfaktor Zeit bei Fertigung unterschiedlicher Stückzahl

Der hohe Nutzwert des 3D-Druckens mit 8,4 für den Wettbewerbsfaktor Qualität ist auf die Möglichkeiten der Funktionsintegration zurückzuführen (vgl. Abbildung 7.5). Demgegenüber stehen die Werte 5,9 für das Zerspanen und 5,8 für das Spritzgießen. In der durchgeführten Nutzwertanalyse wird explizit die Möglichkeit, äußerst komplexe Produkte fertigen zu können, bewertet und in Hinsicht auf das zu fertigende Bauteil hoch gewichtet. Durch 3D-Drucken entstehende schlechte Eigenschaften können so in Grenzen egalisiert werden. Die Stückzahl-Unabhängigkeit des Wettbewerbsfaktors Zeit gilt für das Zerspanen und Spritzgießen nur in Grenzen, da bei den angewendeten Werkzeugen Verschleiß auftritt. Dies führt zu einer sinkenden Qualität bei großen Stückzahlen mit dem gleichen Werkzeug.

Die Stückzahl-Abhängigkeit ist auch bei der Bewertung der Verfahren für den Wettbewerbsfaktor Kosten deutlich zu erkennen (Abbildung 7.6). Der Einfluss der Stückzahl auf die Kosten nimmt jedoch schneller ab als der der Zeit, weshalb sich der Einsatz des Spritzgießens erst etwas später, aber noch immer im Bereich zwischen 500 und 50.000 rentiert, obwohl auch hier die Kosten für das Pre-Processing dominieren.

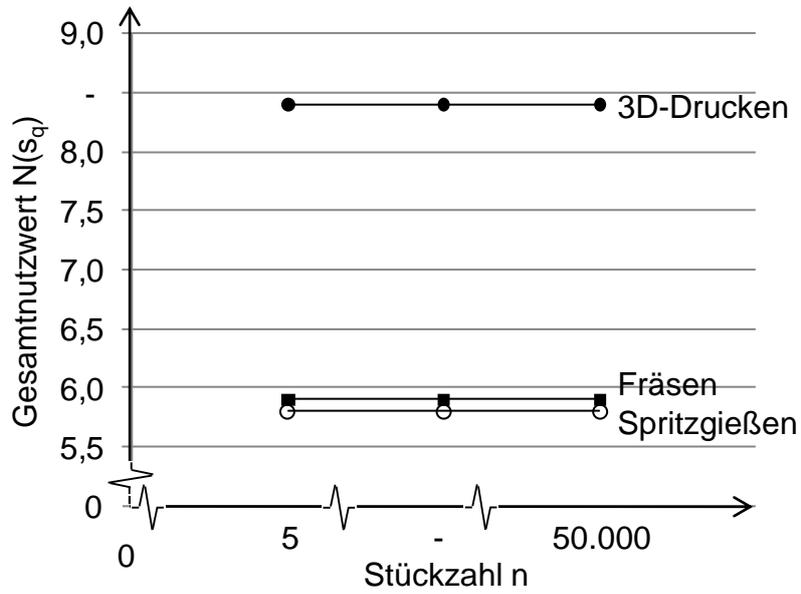


Abbildung 7.5: Nutzwert der Verfahren 3D-Drucken, Zerspanung und Spritzgießen für den Wettbewerbsfaktor Qualität bei Fertigung unterschiedlicher Stückzahl

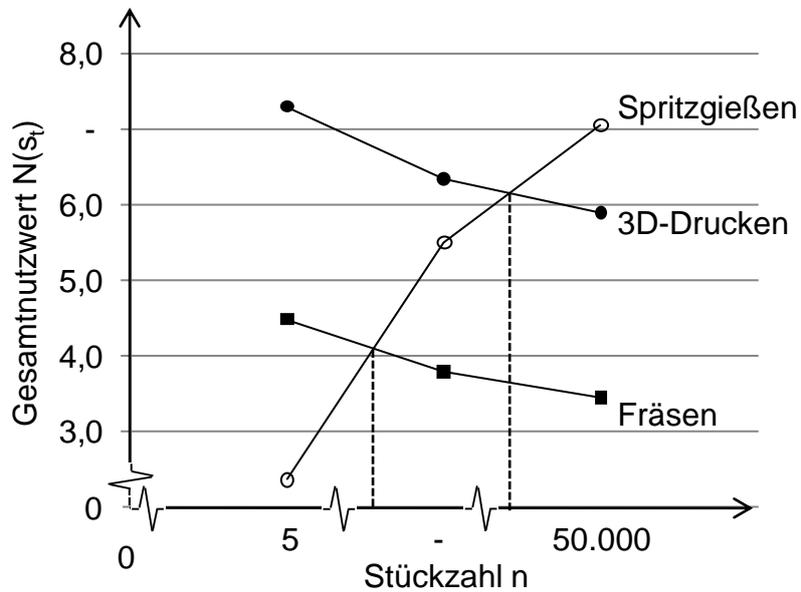


Abbildung 7.6: Nutzwert der Verfahren 3D-Drucken, Zerspanung und Spritzgießen für den Wettbewerbsfaktor Kosten bei Fertigung unterschiedlicher Stückzahl

## 7.5 Zusammenfassung

Die Vorteile des 3D-Druckens konnten im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufgezeigt werden. Von besonderer Relevanz waren dabei

- Keine Notwendigkeit für Werkzeuge, Formen und Spannmittel
- Hohe Geometriekomplexität und Funktionsintegration zur Minimierung von Montageschritten
- Fertigung von Stückzahl 1 und somit kundenindividueller Produkte ohne Mehraufwand

Mit Hilfe der Nutzwertanalyse wurde dargelegt, dass das 3D-Drucken insbesondere bezüglich der Time-To-Market wesentliche Vorteile gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren Zerspanung und Spritzgießen hat. Des Weiteren eignet sich das Verfahren zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Stückzahlen ( $< 500$ ), während das Spritzgießverfahren den Markt über 50.000 Stück besser bedient. Die Herstellung hochkomplexer Bauteile mit integrierten Funktionen ist dann jedoch nicht mehr möglich.

Die im Rahmen dieses Kapitels getroffenen Annahmen basieren auf der Tatsache, dass mit den in Kapitel 6 beschriebenen Materialien Bauteile, und nicht nur Prototypen und Modelle, durch das 3D-Drucken hergestellt werden können. Der gezeigte Effekt im Bereich der Funktionsintegration wird sich durch die Möglichkeit, weitere Materialien über Silber, Graphit und Kunststoff hinaus verarbeiten zu können, verstärken.



# 8 Schlussbetrachtung

## 8.1 Zusammenfassung der Arbeit

Das pulverbettbasierte 3D-Drucken von Kunststoffbauteilen verfügt über großes Potential zur Herstellung komplexer und kundenindividueller Produkte in geringer Stückzahl. Die Herausforderung lag bisher jedoch in der geringen Festigkeit und hohen Porosität der Bauteile sowie der Tatsache, dass lediglich ein Material pro Prozess verarbeitet werden konnte. Die Qualifizierung neuer Materialien stellte sich unter anderem wegen fehlender Unterstützung durch Simulation als äußerst aufwändig dar. Um Endprodukte herstellen zu können („Rapid Manufacturing“), war somit eine erhebliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe für das pulverbettbasierte 3D-Drucken notwendig. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit durch eine verstärkte Entwicklung neuer Materialien sowie die Realisierung von Anlagen zur Herstellung von Multimaterialbauteilen erreicht.

Als Basis wurden zunächst im Kapitel 2 die Grundlagen der generativen Fertigungsverfahren und dazugehörige Simulationen erläutert sowie die physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen und die Vorgänge der Polymerisation dargelegt. Aufbauend auf den Bausteinen Prozess, Material und Simulation wurden im Kapitel 3 aktuelle Forschungsarbeiten aufgezeigt und der Handlungsbedarf für die Weiterentwicklung des 3D-Druckprozesses abgeleitet. Identifiziert wurde die Notwendigkeit einer verstärkten Entwicklung neuer Materialsysteme für das 3D-Drucken, insbesondere im Bereich der Kunststoffe. Deren Qualifikation wurde durch eine Simulation unterstützt. Zur Umsetzung der Ziele war die Konzipierung einer Anlage zur Verarbeitung unterschiedlicher Materialien zur Herstellung funktionsintegrierter Bauteile in einem Bauraum notwendig.

Aufbauend auf diese Erkenntnisse wurde im Kapitel 4 eine Methode zur Materialqualifizierung vorgestellt, welche aus drei Modulen mit je zwei Submodulen besteht. Es wurden die Module **Prozess**, **Simulation** und **Material** und deren Submodule (*Anlagentechnik*, *Parameter*, *Prozess-* und *Materialsimulation*, *Mono-* sowie *Multimaterial*) und Interaktionen beschrieben. Des Weiteren wurden der 3D-Druckprozess als System und die notwendige Anlagentechnik erläutert. Dargelegt wurden der Aufbau eines 3D-Druck-Demonstrators mit einem Bauraum von  $x = 250$  mm,  $y = 110$  mm und  $z = 95$  mm sowie das zusätzliche Multimaterialmodul mit den Prozessparametern mit Wertebereichen und aus Experimenten resultierenden Fehlerbildern. Defizite, welche durch eine Änderung der Anlagentechnik zu beheben sind, wurden beschrieben und Lösungen aufgezeigt. Zusätzlich wurden die angewendete Steuerungstechnik sowie notwendige Erweiterungen zur Prozessbefähigung für die Multimaterialverarbeitung erläutert.

Kapitel 5 befasste sich mit der Modellierung des 3D-Druckprozesses, wobei eine Material-

und eine Prozesssimulation durchgeführt wurden. Erstere bildet Werkstoffe auf verschiedenen Skalen ab, um alle Materialeigenschaften zu ermitteln und anschließend das Werkstoffverhalten einzustellen. Dafür wurde ein Modell der geometrischen Materialstruktur erstellt und der Einfluss variierender Parameter auf das Materialverhalten untersucht, um daraus Rückschlüsse auf das Materialverhalten zu ziehen. Im Rahmen dieser Simulation konnten der Einfluss der Mikrostruktur sowie der Korngrößen und des Bindereintrags im pulverbettbasierten 3D-Drucken von Kunststoffen auf die Festigkeit des Endmaterials beschrieben werden. Es wurden Modellreihen mit fünf unterschiedlichen Korngrößen und je einem Bindereintrag von 5 %, 10 % und 15 % aufgebaut und mit diesen Simulationen durchgeführt. So konnte der Verlauf von Spannungen und Dehnungen sowie der daraus resultierenden Verformung abgeschätzt werden. Ein für geringe auftretende Spannungen und Dehnungen optimaler Bindereintrag sollte unter 10 % liegen, was im Gegensatz zu der Aussage steht, das Material komplett mit Binder zu füllen, um ein dichtes Bauteil und auf diese Weise eine hohe Festigkeit zu erhalten. Eine Korngrößenverteilung zwischen 10 und 200  $\mu$  wurde als geeignet identifiziert. Im Rahmen einer weiteren Simulation zum schichtweisen Schwind- und Verformungsverhalten konnten die geometrischen Auswirkungen der Phänomene der Polymerisation untersucht werden und Vorschläge für ein optimales Prozessverhalten eines neuen Materialsystems abgeleitet werden. Ein gleichmäßiges Verfestigen des Binders im Pulverbett hat dabei die geringsten Verformungen zur Folge und ist somit anzustreben. Der Bindereintrag sollte zudem auf der bedruckten Fläche an jedem Punkt gleich sein.

In Kapitel 6 wurde ein neues Kunststoffmaterialsystem für das 3D-Drucken vorgestellt und die Herstellung von 3D-Multimaterialbauteilen aus den neuartigen Werkstoffen erläutert. Zukünftig können Bauteile durch 3D-Drucken gefertigt werden („Rapid Manufacturing“). Die Unterscheidung der Materialverarbeitung in Mono- und Multimaterialverarbeitung gibt den Rahmen vor. Dabei eröffnet insbesondere die Funktionsintegration bei Anwendung des 3D-Multimaterialansatzes neue Möglichkeiten, um zukünftigen Problemstellungen hinsichtlich höherer Produktanforderungen zu begegnen. Als Monomaterial wurde ein Universal-Pulver-Binder-System entwickelt, bei dem Diamin und Diketon zu Polyimin reagieren. Dieses wurde für die Werkstoffe Polyamid (DikaDens) und Polymethylmethacrylat (DikaPor, DikaPor<sub>mod</sub>) qualifiziert und patentiert. Die Qualifizierung umfasste insbesondere die Ermittlung eines geeigneten Prozessparameterfensters. Der E-Modul des Polymermaterials konnte gegenüber dem bisherigen Serienwerkstoff um 250 bis 600 % gesteigert werden. Parallel dazu wurde ein 3D-Multimaterialsystem entwickelt, bei dem ein zweites leitfähiges Material auf den polymeren Grundkörper aufgebracht werden kann. Mit Hilfe dieses Ansatzes konnten Multimaterialbauteile mit Leiterbahnen aus Silber und Graphit hergestellt werden. Die Auflösung in der x-y-Ebene betrug dabei  $1 \pm 0,05$  mm, in der z-Richtung waren 0,15 mm möglich. Die erzeugten Leitfähigkeiten ohne anschließendes Sintern lagen bei  $\kappa = 47,5 \pm 1 \Omega^{-1}mm^{-1}$  (Silber) beziehungsweise  $\kappa = 4,05 \pm 0,08 \Omega^{-1}mm^{-1}$  (Graphit). Die Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie bei konventionell hergestellten Silber- und Graphitwerkstoffen. Zusätzlich wurden Konzepte zur Minimierung der Werkstoff- oder Prozessfehler für Mono- und 3D-Multimaterialien dargelegt.

Abschließend wurde im Kapitel 7 die Wirtschaftlichkeit des 3D-Druckprozesses vor dem Hintergrund bewertet, Bauteile herstellen zu können. Hierzu wurde eine Nutzwertanalyse unter Beachtung der Wettbewerbsfaktoren Zeit, Qualität und Kosten für die Prozesse Zerspanung, Spritzgießen und 3D-Drucken durchgeführt. Das 3D-Drucken bietet insbesondere im Bereich der Zeit stückzahlbezogen wesentliche Vorteile gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren Zerspanung und Spritzgießen. Insbesondere eignet sich das Verfahren zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Stückzahlen ( $< 500$ ), während das Spritzgießverfahren den Markt über 50.000 Stück besser bedient. Die Herstellung hochkomplexer Bauteile mit integrierten Funktionen ist dann jedoch nicht möglich.

## 8.2 Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der pulverbettbasierte 3D-Druckprozess weitreichend betrachtet. Die Machbarkeit neuer Anlagenkonzepte und innovativer Werkstoffe sowie Möglichkeiten der Verarbeitung von Multimaterialsystemen wurden dargelegt. Zukünftige Arbeiten sollten auf dieser Basis einzelne Felder tiefer gehend beleuchten. Hier sind insbesondere die Umsetzung weiterer Werkstoffe im Mono- und Multimaterialbereich sowie die Weiterentwicklung der Prozesssimulation zu nennen.

Der Fokus neuartiger Monomaterialien soll in der Entwicklung von Bauteilen mit geringer Porosität auch auf PMMA-Basis liegen. Hier kann die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Multiskalensimulation unterstützen, um Füllgrade sowie günstige Anteile an Partikeln, Binder und Füller zu ermitteln. Angestrebt werden sollte ein vollständig gefülltes Material mit gleichzeitig hoher Maßhaltigkeit. Nur bei ausreichender Genauigkeit gefüllter Teile kann der Einsatz des 3D-Druckprozesses zukünftig neben den konkurrierenden Verfahren Spritzgießen, Zerspanung und Lasersintern bestehen.

Zur Sicherstellung der genannten Qualitäten ist eine Weiterentwicklung der Prozesssimulation unumgänglich. Der chemische Prozess bedingt immer eine Verfestigung, welche eine Geometrieänderung verursacht. Wenn es möglich ist, diesen Schwund und daraus resultierenden Verzug zukünftig vor dem Prozess bauteilgerecht zu berechnen, ist es denkbar, die Soll-Geometrie vor Druckbeginn gezielt verformen zu können. Eine solche Freiformdeformation stellt große Anforderungen an die Kenntnis des Schwundes in Abhängigkeit von der Geometrie sowie an die Baujob-vorbereitende Software. Auf Basis der Erfahrungen dieser Arbeit kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich der Schwund mathematisch beschreiben lässt und eine Deformation somit algorithmisch minimiert werden kann.

Die Weiterentwicklung neuer Multimaterialsysteme stellt ein weiteres Forschungsgebiet dar. Hier sind insbesondere Werkstoffe mit anderen Eigenschaften, z. B. hoher Elastizität oder Transparenz, für den 3D-Druckprozess zu qualifizieren, um beispielsweise lokal definiert Elastizität oder Transparenz einzubringen. Dies kann theoretisch unter Anwendung von Silikon oder modifiziertem PMMA-Pulver mit dem Multimaterialmodul oder einer Weiterentwicklung dessen umgesetzt werden. Zusätzlich ist die Produktion von elektrischen

oder elektronischen Komponenten auf Basis des pulverbettbasierten 3D-Druckprozesses anzustreben. Eine Vorstufe kann hier das integrierte Einlegen von Komponenten in ein Bauteil im 3D-Druck mit einer Kontaktierung durch das Multimaterialmodul während des Prozesses statt anschließendem Lötvorgang sein.

Durch die vorliegende Arbeit wurde der pulverbettbasierte 3D-Druckprozess umfassend analysiert, beschrieben und weiterentwickelt. Insbesondere die Entwicklung neuer Werkstoffsysteme und die hinreichend genaue Modellierung sind als Grundlage für weiterführende Arbeiten zum 3D-Druckprozess zu sehen, welche einzelne Problemfelder zukünftig detailliert betrachten sollten.

## 9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011.

ALSCHER 2000

Alscher, G.: Das Verhalten teilkristalliner Thermoplaste beim Lasersintern: Diss. Universität Essen. Berichte aus der Kunststofftechnik. Aachen: Shaker 2000.

BACKER ET AL. 2011

Backer, A.; Lehmann, M.; Tremel, M.: Ein Compounder auf Abwegen. Kunststoffe 101 (2011) 5, S. 78–79.

BAUR ET AL. 2007

Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T.; Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 30. Auflage. München: Carl Hanser 2007.

BEHANECK 2010

Behaneck, M.: Vom CAD zum Modell. Rechnergestützter Architekturmodellbau. Computer Spezial (2010) 1, S. 11–15.

BERGMANN 2008

Bergmann, W.: Werkstofftechnik 1: Grundlagen und Anwendung. 6. Auflage. München: Carl Hanser 2008.

BRAESS 2007

Braess, D.: Finite Elemente: Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie. 4. Auflage. Berlin: Springer 2007.

BRAMBLE ET AL. 2003

Bramble, J.; Cohen, A.; Dahmen, W.; Canuto, C.: Multiscale Problems and Methods in Numerical Simulations, Lecture notes in mathematics Subseries, Band 1825. Berlin: Springer 2003.

BRANNER 2011

Branner, G.: Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren: Diss. Technische Universität München. Forschungsberichte iw. München: Utz 2011.

CANNY ET AL. 2004

Canny, J.; Risner, J.; Subramanian, V.: Flexonics. STAR: Springer Tracts in Advanced Robotics (2004) 7, S. 203–219.

CHILDS ET AL. 2000

Childs, T. H. C.; Hauser, C.; Taylor, C. M.; Tontowi, A. E.: Simulation and Experimental Verification of Crystalline Polymer and Direct Metal Selective Laser Sintering. In: Proceedings, 11<sup>th</sup> Solid Freedom Fabrication Symposium, 08.-10.08.2000. Austin: The University of Texas at Austin 2000.

COHEN ET AL. 2009

Cohen, D.; Lipton, J.; Cutler, M.; Coulter, D.; Vesco, A.; Lipson, H.: Hydrocolloid Printing: A Novel Platform for Customized Food Production. In: Proceedings, 20<sup>th</sup> Solid Freedom Fabrication Symposium, 02.-04.08.2010. Austin: The University of Texas at Austin 2009.

COSTA ET AL. 2005

Costa, L.; Vilar, R.; Reti, T.; Deus, A. M.: Rapid Tooling by Laser Powder Deposition: Process Simulation using Finite Element Analysis. *Acta Materialia* 53 (2005) 14, S. 3987–3999.

CZYZEWSKI ET AL. 2009

Czyzewski, J.; Burzynski, P.; Gawel, K.; Meisner, J.: Rapid Prototyping of Electrically Conductive Components using 3D-printing Technology. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 5, S. 5281–5285.

DANJOU & KÖHLER 2010

Danjou, S.; Köhler, P.: Improving part quality and process efficiency in layered manufacturing by adaptive slicing. *The Virtual & Physical Prototyping Journal* 5 (2010) 4, S. 183–188.

DIMITROV ET AL. 2006

Dimitrov, S.; Schreve, K.; de Beer, N.: Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives. *Rapid Prototyping Journal* 12 (2006) 3, S. 136–147.

DIN 55667 2009

DIN 55667: Beschichtungsstoffe: Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit und des spezifischen elektrischen Widerstandes, 2009.

DIN 8580 2003

DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilungen, 2003.

DIN EN ISO 527 1996

DIN EN ISO 527: Bestimmung der Zugeigenschaften, 1996.

DIN IEC 468 1981

DIN IEC 468: Verfahren zur Messung des spezifischen (elektrischen) Widerstandes metallischer Werkstoffe, 1981.

DOMININGHAUS ET AL. 2005

Dominghaus, H.; Eyerer, P.; Elsner, P.; Hirth, T.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. VDI Buch, 6. Auflage. Berlin: Springer 2005.

DOURANDISH ET AL. 2007

Dourandish, M.; Godlinski, D.; Simchi, A.: 3D Printing of Biocompatible PM-Materials. Materials Science Forum (2007), S. 453–456.

DROSSE 2008

Drosse, I. K.: Zellbesiedelte Gewebekonstrukte für den Knochenersatz – Untersuchung der Knochenregeneration in einem neu etablierten orthotopen Defektmodell: Diss. Ludwig-Maximilians-Universität München, 2008.

EBERHARDSTEINER ET AL. 2009

Eberhardsteiner, J.; Hofstetter, K.; Pichler, B.; Aigner, E.: Mehrskalmodellierung von Baustoffen (Holz, Spritzbeton und Asphalt). In: Proceedings of the ANSYS Conference & 27. CADFEM Users' Meeting 2009 (ACUM), 18.-20.11.2009. Grafing: CADFEM GmbH 2009.

EBERHARDSTEINER ET AL. 2010

Eberhardsteiner, J.; Stürzenbecher, R.; Hofstetter, K.; Schickhofer, G.: Development of High-Performance Strand Boards: Multiscale Modeling of Anisotropic Elasticity. Wood Science and Technology 44 (2010) 1, S. 13–29.

EDERER 1999

Ederer, I.: Berechnung und Anwendung eines Piezo-Biegeumwandlers zur Flüssigkeitszerstäubung: Diss. Technische Universität München. Düsseldorf: VDI 1999.

EDERER 2007

Ederer, I.: Kleinserien-Produktion mittels 3D-Druck. RTeJournal 4 (2007), S. 1.

EDERER 2008

Ederer, I.: Oberflächenverbesserung im 3D-Druck mittels höherer Auflösung. RTeJournal 5 (2008), S. 1.

EDERER 2011

Ederer, I.: Ein neuer Goliath. Economic Engineering (2011) 3, S. 44.

EICHMANN 2009

Eichmann, M.: Von der Idee bis zum fertigen Produkt - 3D-Drucken mit der PolyJet™-Technologie von OBJECT. RTeJournal 6 (2009), S. 1.

ELSNER 2009

Elsner, P. C.: 3D-Drucktechnologie: Grundlagen zur Herstellung polymerer Bauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften: Diss. Technische Universität Berlin, 2009.

EMMELMANN ET AL. 2005

Emmelmann, C.; Rehme, O.; Lorenz, A.: Schicht für Schicht. Lasergenerieren und Laserabtragen bieten Chancen zur Verkürzung der Durchlaufzeiten und der Kosten. MM Maschinenmarkt 23 (2005) 6, S. 26–28.

ESCALES 1911

Escales, R.: Kunststoffe. Kunststoffe 1 (1911) 1, S. 1.

FISCHER & LINSE 2009

Fischer, R.; Linse, H.: Elektrotechnik für Maschinenbauer. 13. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009.

FRANCK 2000

Franck, A.: Kunststoff-Kompodium. Würzburg: Vogel und Druck GmbH & Co. KG 2000.

FRANKE ET AL. 2010

Franke, J.; Fischer, C.; Goth, C.: Rechnergestützte Entwicklung von 3D-MID mit einem integrierten CAD-System. PLUS. Produktion von Leiterplatten und Systemen 12 (2010) 9, S. 2117–2124.

FRÖHLICH 2005

Fröhlich, P.: FEM-Anwendungspraxis: Einstieg in die Finite Elemente Analyse ; zweisprachige Ausgabe Deutsch/Englisch. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg 2005.

GAUSEMEIER & BERGER 2004

Gausemeier, J.; Berger, T.: Produktentwicklung für die Märkte von morgen. VDMA Nachrichten (2004) 12, S. 43–186.

GEBHARDT 2007

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. 3. Auflage. München: Carl Hanser 2007.

GIBSON ET AL. 2010

Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer 2010.

GLÄSER 2010

Gläser, T.: Untersuchungen zum Lasersintern von Wolframkarbid-Kobalt: Diss. RWTH Aachen. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Aachen: Apprimus 2010.

GODLINSKI 2002

Godlinski, D.: Herstellung und Eigenschaften feinstkörniger und defektarmer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik: Diss. Universität Bremen, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 5, Grund- und Werkstoffe, Kunststoffe, Band 667. Düsseldorf: VDI 2002.

## GODLINSKI &amp; MORVAN 2005

Godlinski, D.; Morvan, S.: Steel Parts with Tailored Material Gradients by 3D-printing using nano-particulate Ink. *Materials Science Forum* 492/493 (2005), S. 679–684.

## GODLINSKI ET AL. 2009

Godlinski, D.; Sturm, H.; Sosna, C.; Buchner, R.; Werner, C.; Zollmer, V.; Busse, M.; Lang, W.: New Electrical Connection Technology for Microsystems using INKtelligent Printing® and Functional Nanoscaled INKS. *IEEE Electron Devices Society* (2009), S. 1702–1705.

## GOTH &amp; FRANKE 2010

Goth, C.; Franke, J.: Zukunftstechnologien für mechatronische Produkte. Dreidimensionale Baugruppen. *Kunststoffe* 100 (2010) 4, S. 68–72.

## GRELLMANN &amp; SEIDLER 2005

Grellmann, W.; Seidler, S.: *Kunststoffprüfung*. München: Carl Hanser 2005.

## GROTH &amp; MÜLLER 2001

Groth, C.; Müller, G.: *FEM für Praktiker - Band 3: Temperaturfelder, Band 45*. 4. Auflage. Renningen: expert 2001.

## GÜNTHER 2007

Günther, D.: *Bimorph-Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden für die Mikrofluidik*: Diss. Technische Universität München, 2007.

## HÄNEL 2009

Hänel, T.: *Technologieentwicklung für die Herstellung patientenindividueller Knochenaufbauimplantate aus [beta]-Tricalciumphosphat durch 3D-Printing*: Diss. Technische Universität Chemnitz. Berlin: Mensch und Buch 2009.

## HANUSCH 2011

Hanusch, H.: *Nutzen-Kosten-Analyse*. Vahlens-Kurzlehrbücher, 3. Auflage. München: Vahlens 2011.

## HAYNES &amp; LIDE 2010

Haynes, W.; Lide, D.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics: A ready-reference Book of Chemical and Physical Data*. Boca Raton: CRC Press 2010, 91. Auflage.

## HEINE 1998

Heine, B.: *Einführung in die Polymertechnik: Leitfaden für Studium und Praxis*. Renningen-Malmsheim: expert 1998.

## HILLER &amp; LIPSON 2009

Hiller, J. D.; Lipson, H.: STL 2.0: a Proposal for a Universal Multi-Meter Additive Manufacturing File Format. In: *Proceedings, 20<sup>th</sup> Solid Freedom Fabrication Symposium*, 03.-05.08.2009. Austin: The University of Texas at Austin 2009.

HOFMANN ET AL. 2007

Hofmann, H.; Spindler, J.; Fischer, H.: Werkstoffe in der Elektrotechnik. Lernbücher der Technik, 6. Auflage. München: Carl Hanser 2007.

HORNBOGEN & WARLIMONT 2006

Hornbogen, E.; Warlimont, H.: Metalle: Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen. 5. Auflage. Berlin: Springer 2006.

IBRAHIM 2006

Ibrahim, D.: Análise dimensional dos biomodelos de sinterização seletiva a laser, impressão tridimensional e polyjet, na reprodução da anatomia mandibular: Diss. Pontificia Universidade Catolica Rio Grande Do Sul Porto Alegre, 2006.

IVERS-TIFFÉE & VON MÜNCH 2007

Ivers-Tiffée, E.; von Münch, W.: Werkstoffe der Elektrotechnik. Lehrbuch Elektrotechnik, 10. Auflage. Wiesbaden: Teubner 2007.

JARDINI ET AL. 2007

Jardini, A. L.; Costa, M. C. B.; Rezende, R. A.; Andrade, S. R.; Maciel, F. R.: Modeling and Simulation to Materials Development for Rapid Prototyping Process. In: Pierucci, S. (Hrsg.): 8<sup>th</sup> International Conference on Chemical and Process Engineering, 10.-13.05.2009. Milano: AIDIC 2007, Chemical Engineering Transactions, Band 11. S. 297–302.

JEE & SACHS 2000

Jee, H. J.; Sachs, E.: A Visual Simulation Technique for 3D-printing. Advances in Engineering Software 31 (2000) 2, S. 97–106.

KADDAR & WITT 2010

Kaddar, W.; Witt, G.: Die Festigkeit in Abhängigkeit von Scanstrategien & -optionen beim Lasersintern vom Kunststoff. RTeJournal 7 (2010), S. 1.

KAISER 2007

Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung. 2. Auflage. München: Carl Hanser 2007.

KARAPATIS 2002

Karapatis, P.: A Sub-Process Approach Of Selective Laser Sintering: Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2002.

KAWAMOTO 2007

Kawamoto, H.: Electronic Circuit Printing, 3D-printing and Film Formation utilizing eElectrostatic Inkjet Technology. Digital Fabrication 23 (2007), S. 961–964.

KELLNER 2009

Kellner, I. N.: Aktivierte Polymerisation im 3D-Kunststoff-Druckprozess. iwb Newsletter (2009) 1, S. 7.

KELLNER & ZÄH 2010

Kellner, I. N.; Zäh, M. F.: Simulation Models for 3D Inkjet Printing – Material and Process Design. In: Proceedings of the 21<sup>st</sup> Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin 2010, S. 1–10.

KELLNER & ZÄH 2011

Kellner, I. N.; Zäh, M. F.: Models for 3D Inkjet Printing - Simulation and Multimaterial. In: Spath, D.; Ilg, R.; Krause, T. (Hrsg.): 21st International Conference on Production Research, 31.07.-04.08.2011, Stuttgart 2011. S. 1–6.

KESSLING 2010

Kießling, O.: Ein Rapid-Manufacturing-Verfahren für die Flip-Chip-Montage: Diss. Technische Universität München, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 9, Elektronik/Mikro- und Nanotechnik, Band 387. Düsseldorf: VDI 2010.

KLARNER 2009

Klarner, M.: 3D-Pulverdruck von Calciumphosphat-Keramiken mit polymeren und anorganischen Bindersystemen: Diss. Universität Würzburg, 2009.

KLEIN 2010

Klein, B.: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 8. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010.

KLOCKE ET AL. 2005

Klocke, F.; Arntz, K.; Fuchs, E.: Maßgeschneiderte Formeinsätze. 5. Internationales Kolloquium Werkzeugbau mit Zukunft, 29.11.2005 (2005), S. 1–18.

KOLOSISOV ET AL. 2004

Kolossov, S.; Boillat, E.; Glardon, R.; Fischer, P.; Locher, M.: 3D FE Simulation for Temperature Evolution in the Selective Laser Sintering Process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 44 (2004) 2-3, S. 117–123.

KOTELYANSKII 2004

Kotelyanskii, M.: Simulation Methods for Polymers. New York: Dekker 2004.

KRUTH ET AL. 2003

Kruth, J.; Vaerenbergh, J. V.; Mercelis, P.; Savalani, M.; Lauwers, B.; Naert, I.: Selective Laser Sintering of Dental Protheses. In: Euro-u Rapid, International User's Conference on Rapid Prototyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing, 01.-02.12.2003, Berlin 2003. S. 1–7.

### KRUTH ET AL. 2007

Kruth, J. P.; Duflou, J.; Mercelis, P.; Vaerenbergh, J. V.; Craeghs, T.; Keuster, J. d.: On-line Monitoring and Process Control in Selective Laser Melting and Laser Cutting. In: LANE 2007, 5th Laser Assisted Net Shape Engineering, 25.-28.09.2007, München 2007. S. 23–37.

### KRUTH ET AL. 2008

Kruth, J.-P.; Levy, G.; Schindel, R.; Craeghs, T.; Yasa, E.: Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering. In: PMI International Conference, 17.-19.09.2008, Leuven 2008. S. 15–30.

### KUSHNARENKO 2009

Kushnarenko, O.: Entscheidungsmethodik zur Anwendung generativer Verfahren für die Herstellung metallischer Endprodukte: Diss. Universität Magdeburg, Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Magdeburg, Band 14. Aachen: Shaker 2009.

### LANDERS 2004

Landers, R.: Materialdesign und bioaktive Formgebung für Anwendungen in der regenerativen Medizin: Diss. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 2004.

### LEUTE 2004

Leute, U.: Physik und ihre Anwendungen in Technik und Umwelt. 2. Auflage. München: Carl Hanser 2004.

### LEVERKÖHNE 2001

Leverköhne, M.: Fabrication and characterization of multifunctional metal-ceramic composites: Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 5, Grund- und Werkstoffe, Kunststoffe, Band 637. Düsseldorf: VDI 2001.

### LEWIS 2008

Lewis, C.: Rapid Systems at Home: Now All Spare Parts can be printed at Home, right? In: Euro-u Rapid, 9th International User's Conference & Exhibition on Rapid Prototyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing, 23.-24.09.2008, Berlin 2008. S. 41–47.

### LIYOU 2008

Liou, F. W.: Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development. 1. Auflage. Boca Raton: CRC Press 2008.

### LOWMUNKONG ET AL. 2009

Lowmunkong, R.; Sohmura, T.; Suzuki, Y.; Matsuya, S.; Ishikawa, K.: Fabrication of Freeform Bone-Filling Calcium Phosphate Ceramics by Gypsum 3D Printing Method. Journal of Biomedical Materials Research 89A (2009) 2, S. 531–539.

### LUTZMANN 2011

Lutzmann, S.: Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens: Diss. Technische Universität München. Forschungsberichte iw. München: Utz 2011.

### MA & HONGZAN 2007

Ma, L.; Hongzan, B.: Temperature and Stress Analysis and Simulation in Fractal Scanning-based Laser Sintering. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 34 (2007) 9, S. 898–903.

### MANAGEMENT 2005

Management, F.: Klicken, Drucken, Gießen. Foundry Management & Technology 133 (2005) 4, S. 25.

### MARTHA & KÖHLER 2011

Martha, A.; Köhler, P.: Ansätze zur Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit bei generativen Verfahren durch Optimierung des Pre-Processes. RTeJournal 9 (2011), S. 1.

### MAUCH 2003

Mauch, S.: Efficient Algorithms for Solving Static Hamilton-Jacobi Equations: Diss. California Institute of Technology, Pasadena. 2003.

### MEINDL 2005

Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing: Diss. Technische Universität München, Forschungsberichte iw, Band 187. München: Utz 2005.

### MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe: Diss. RWTH Aachen. Berichte aus der Lasertechnik. Aachen: Shaker 1999.

### MEINERS & WISSENBACH 2007

Meiners, W.; Wissenbach, K.: Patent: Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines Bauteils basierend auf dreidimensionalen Daten des Bauteils, Nr. DE 10 2007 029 052 A1 2009.01.02, 2007.

### METHNER 2007

Methner, M.: e-Manufacturing in der Dentaltechnik. SMM Schweizer Maschinenmarkt 108 (2007) 5, S. 30–33.

### MEYER 2007

Meyer, R.: Werkzeugloses Fertigen als Konstruktionstrick. Industrieanzeiger 20 (2007), S. 22–25.

### MIDDLETON 2010

Middleton, A.: An objet perspective: on the 3D-printing landscape. *The tct magazine* 18 (2010) 6, S. 9.

### MÖGELE & KELLNER 2010

Mögele, F.; Kellner, I. N.: Patent: Verfahren zum schichtweisen Aufbau von Modellen, Nr. DE 10 2010 056 346.3, 2010.

### MÖHLER ET AL. 1999

Möhler, H.; Baur, W.; Kalle, T.: FEM-Analyse der Kautschukvulkanisation unter Einbeziehung einer Wärmeentwicklungskinetik. *Kautschuk, Gummi, Kunststoffe* 99 (1999) 12, S. 825–829.

### MONTGOMERY 2006

Montgomery, E.: Rapid Tooling mit Stereolithographie: Ein wichtiger Schritt in Richtung Rapid Manufacturing. *RTeJournal* 3 (2006), S. 1.

### MORI 2001

Mori, K.: *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications: Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes - NUMIFORM 2001*, Toyohashi, Japan, 18 - 20 June 2001. Lisse: Balkema 2001.

### MORI 1986

Mori, M.: *The Finite Element Method and its Applications*. New York: Macmillan 1986.

### MÜLLER & GROTH 2002

Müller, G.; Groth, C.: *FEM für Praktiker – Band 1: Grundlagen*, Edition expertsoft, Band 23. 7. Auflage. Renningen: expert 2002.

### NÖKEN 1997

Nöken, S.: *Technologie des Selektiven Lasersinterns von Thermoplasten: Diss. RWTH Aachen*, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 8. Aachen: Shaker 1997.

### PELZER 2005

Pelzer, R.: *Auslegung von besiedelbaren Knochenimplantaten und deren Herstellung mittels 3D-Druckverfahren: Diss. Technische Universität München*, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 17, Biotechnik, Medizintechnik, Band 255. Düsseldorf: VDI 2005.

### PFEIFER 2006

Pfeifer, R.: *Entwicklung von Rapid Prototyping Verfahren zur Herstellung verloreener Modelle für den Feinguss: Diss. Universität Stuttgart*, 2006.

### PFISTER 2005

Pfister, A.: *Neue Materialsysteme für das Dreidimensionale Drucken und das Selektive Lasersintern: Diss. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.*, 2005.

## POHL ET AL. 2001

Pohl, H.; Petzoldt, F.; Gosger, P.: New Features in Three Dimensional Printing of Metal Powders. In: Proceedings. Shrewsbury: European Powder Metallurgy Association 2001. S. 309–314.

## POWELL ET AL. 2002

Powell, C.; Savage, M.; Guthrie, J.: Computational Simulation of the Printing of a Newtonian Liquid from a Trapezoidal Cavity. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Flow* 12 (2002) 4, S. 338–355.

## REPORT 1997

Report, R. P.: Development News. *Rapid Prototyping Report* 7 (1997) 5, S. 4.

## RETSCH 2009

Retsch, M.: *Complex Materials via Colloidal Crystallization*: Diss. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2009.

## REYNOLDS 1968

Reynolds, W. N.: *Physical Properties of Graphite*. 1. Auflage. London: Elsevier Pub. Co. 1968.

## RIETZEL ET AL. 2009

Rietzel, D.; Kühnlein, F.; Drummer, D.: Selektives Lasersintern von teilkristallinen Thermoplasten. In: Drummer, D.; Kühnlein, F.; Rietzel, D. (Hrsg.): *Additive Fertigung – vom Prototyp zur Serie*. Erlangen: Lehrstuhl für Kunststofftechnik Univ. Erlangen-Nürnberg 2009, Technisch-wissenschaftlicher Bericht, Band 59. S. 57–71.

## RINZA &amp; SCHMITZ 1992

Rinza, P.; Schmitz, H.: *Nutzwert-Kosten-Analyse: Eine Entscheidungshilfe*. Betriebswirtschaft und Betriebspraxis, 2. Auflage. Düsseldorf: VDI 1992.

## SACHS 1993

Sachs, E.: Patent: Three-dimensional Printing Techniques, Nr. 5204055 U.S. CLASS: 419/2, 1993.

## SACHS &amp; VEZZETTI 2005

Sachs, E.; Vezzetti, E.: Numerical Simulation of Deposition Process for a new 3DP Printhead Design. *Journal of Materials Processing Technology* 161 (2005) 3, S. 509–515.

## SCHATT ET AL. 2007

Schatt, W.; Kieback, B.; Wieters, K. P.: *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. VDI-Buch, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2007.

## SCHMIDT ET AL. 2007

Schmidt, M.; Pohle, D.; Rechtenwald, T.: Selective Laser Sintering of PEEK. *CIRP Annals* 56 (2007), S. 205–208.

SEEFRIED 2005

Seefried, M.: Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern: Diss. Technische Universität München. Forschungsberichte iw. München: Utz 2005.

SEHNERT 2008

Sehnert, J.: Materialdesign durch Simulation. CADFEM Infoplaner (2008) 2, S. 28–29.

SEHRT 2010

Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren: Diss. Universität Duisburg-Essen. Berichte aus der Fertigungstechnik. Aachen: Shaker 2010.

SEITZ 2002

Seitz, H.: Modellierung und numerische Simulation des Übersprechverhaltens in einem Tropfenerzeuger mit Piezo-Biegeumwandleraktoren: Diss. Technische Universität München, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Band 360. Düsseldorf: VDI 2002.

SEITZ 2008

Seitz, H.: Dreidimensionales Drucken von patientenindividuellem Knochenersatz. RTe-Journal 5 (2008), S. 1.

STRASSER & SELBERHERR 1995

Strasser, E.; Selberherr, S.: Algorithms and Models for Cellular based Topography Simulation. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems 14 (1995) 9, S. 1104–1114.

SUEMATSU 1985

Suematsu, K.: Kinetic studies of polyimine formation. Macromolecules 18 (1985), S. 2083–2086.

SUWANPRATEEB 2007

Suwanprateeb, J.: Comparative Study of 3DP Material sSystems for Moisture Resistance Applications. Rapid Prototyping Journal 13 (2007) 1, S. 48–52.

SWAINSON 1977

Swainson, W. K.: Patent: Method, Medium and Apparatus for Producing Three-dimensional Figure Products, Nr. 365/119; 345/139; 348/164; 358/302, 1977.

TAMAS 2008

Tamas, D. S.: Production of Hard Tissue Scaffolds Using Three-Dimensional Printing Method: Diss. Dublin City University, 2008.

TIAN & LI 2010

Tian, X.; Li, D.: Rapid Manufacture of net-shape SiC Components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46 (2010), S. 579–587.

UHLMANN & ELSNER 2006

Uhlmann, E.; Elsner, P.: Gradiententechnologie - Die Zukunft der Fertigungstechnik. In: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum Innovation im Werkzeug- und Formenbau, 17.-18.05.2006. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin 2006. S. 243–250.

VAN DER EIJK ET AL. 2005

van der Eijk, C.; Åsebø, O.; Kolnes, Ø.; Mugaas, T.; Karlsen, R.; Skjefeld R.; Boivie, K.: Metal Printing Process: A Rapid Manufacturing Process Based on Xerography using Metal Powders. *Proceedings of Materials Science & Technology* (2005) September 25-28, Pittsburgh, USA.

VDI 3404: 2009

VDI 3404:: Generative Fertigungsverfahren - Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) - Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen, 2009.

VDI 3405 B: 2011

VDI 3405 B:: Generative Fertigung (Additive Manufacturing) metallischer Bauteile durch Strahlschmelzen - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung, 2011.

WANG ET AL. 2002

Wang, X.-C.; Laoui, T.; Bonse, J.; Kruth, J. P.; Lauwers, B.; Froyen, L.: Direct Selective Laser Sintering of Hard Metal Powders: Experimental Study and Simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 19 (2002), S. 351–357.

WEGNER & WITT 2010

Wegner, A.; Witt, G.: Additive Manufacturing of Parts with Integrated Functions. In: Katalinic, B. (Hrsg.): *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of 21st DAAAM International World Symposium*, 22.-23.10.2010, Zadar 2010.

WIRTH 2004

Wirth, S.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*, Band 1. Berlin: Springer 2004.

WIRTZ 2000

Wirtz, H. M.: Selektives Lasersintern von Keramikformschalen für Gießenanwendungen: Diss. RWTH Aachen, *Berichte aus der Produktionstechnik*, Band 2000, 14. Aachen: Shaker 2000.

WITS & SRIDHAR 2010

Wits, W.; Sridhar, A.: Inkjet Printing of 3D Metallic Silver Complex Microstructures. In: Dimitrov, S. (Hrsg.): COMA International Conference on Competitive Engineering, 01.-04.02.2010. Stellenbosch 2010.

WITT & DÜRR 2006

Witt, G.; Dürr, H.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. Leipzig: Carl Hanser 2006.

WITT ET AL. 2010

Witt, G.; Derrer, J.-P.; Wegner, A.; Blattmeier, M.: Rapid Manufacturing durch Lasersintern: Anforderungen und erzielbare Endeneigenschaften. In: Drummer, D.; Rietzel, D.; Kühnlein, F. (Hrsg.): Fachtagung Additive Fertigung vom Prototyp zur Serie, Fürth 2010.

WOHLERS 2007

Wohlers, T.: Wohlers Report 2007: State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins: Wohlers Associates, Inc. 2007.

WOHLERS 2009

Wohlers, T.: Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Additive Manufacturing. Fort Collins: Wohlers Associates, Inc. 2009.

WOHLERS 2010

Wohlers, T.: Wohlers Report 2010: Additive Manufacturing - State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins: Wohlers Associates, Inc. 2010.

WONG 2009

Wong, W. S.: Flexible electronics: Materials and applications, Electronic materials, Band 11. New York: Springer 2009.

WU & CIMA 1999

Wu, B.; Cima, M.: Effect on Solvent-Particle Interaction Kinetics on Microstructure Formation During Three-Dimensional Printing. *Polymer Engineering and Science* 39 (1999) 2, S. 249–260.

WU ET AL. 2009

Wu, H.; Li, D.; Tang, Y.; Sun, B.; Xu, D.: Rapid Fabrication of Alumina-based Ceramic Cores for Gas Turbine Blades. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), S. 5886–5891.

YADROITSEV 2009

Yadroitsev, I.: Selective Laser Melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders: Diss. Universität des Saarlandes. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing 2009.

YASA & KRUTH 2009

Yasa, E.; Kruth, J.-P.: Microstructure Evolution of Selective Laser Molten 316L stainless Steel parts with Laser re-melting. In: LANE 2007, 5th Laser Assisted Net Shape Engineering, 25.-28.09.2007, München 2009. S. 181–188.

ZÄH 2006

Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. Kostengünstig produzieren. München: Carl Hanser 2006.

ZÄH & KELLNER 2010

Zäh, M. F.; Kellner, I. N.: Material- und Prozesssimulation für das 3D-Drucken. In: Proceedings of the ANSYS Conference & 28. CADFEM Users' Meeting 2010 (ACUM), 03.-05.11.2010. Grafing bei München: CADFEM GmbH 2010, S. 1.

ZÄH & OTT 2009

Zäh, M. F.; Ott, M.: Schicht für Schicht. Special tooling (2009) 3, S. 40–41.

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M. F.; Branner, G.; Hagemann, F.: Chancen und Risiken des Werkzeug- und Formenbaus im globalen Wettbewerb. In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum Innovation im Werkzeug- und Formenbau, 30.-31.05.2007. München: Utz 2007. S. S1–1–S1–17.

ZÄH ET AL. 2010

Zäh, M. F.; Kellner, I. N.; Moegele, F.: Multi-Material 3D Inkjet Printing - Conductive Paths in Polymer Parts. In: University of Stellenbosch, S. A. (Hrsg.): COMA International Conference on Competitive Engineering, 01.-04.02.2010. Stellenbosch, Südafrika 2010, S. 51–56.

ZÄH ET AL. 2011

Zäh, M. F.; Eschey, C.; Kellner, I. N.; Kief, H. B.; Krauss, H.; Krol, T. A.; Ott, M.; Schilp, J.; Teufelhart, S.; Westhäuser, S.: Generative Fertigungsverfahren. In: Kief, H. B.; Roschiwal, H. A. (Hrsg.): CNC-Handbuch 2011/2012. München: Carl Hanser 2011, S. 253–268.

ZAOUI 2002

Zaoui, A.: Continuum micromechanics. Journal of Engineering Mechanics 128 (2002) 8, S. 808–816.

ZEILHOFER 1998

Zeilhofer, H. F.: Innovative dreidimensionale Techniken: Habil.-Schr. Technische Universität München, 1998.

ZHANG 2004

Zhang, D.: Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) für Aluminiumwerkstoffe: Diss. RWTH Aachen. Berichte aus der Lasertechnik. Aachen: Shaker 2004.

ZHANG ET AL. 2010

Zhang, L.; Zhang, C.; Shi T.: Numerical Simulation of Multi-Component Powder in Selective Laser Sintering. *Advanced Materials Research* 139-141 (2010), S. 630–633.

ZHOU ET AL. 2010

Zhou, W.; Li, D.; Wang, H.: A Novel Aqueous Ceramic Suspension for Ceramic Stereolithography. *Rapid Prototyping Journal* 16 (2010) 1, S. 29–35.

# 10 Anhang

## 10.1 Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München (*iwb*) in den Jahren 2009 bis 2011 unter wesentlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die in Tabelle 10.1 aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zum 3D-Drucken untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Die Autorin dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

| Studierende(r)           | Studienarbeit   |
|--------------------------|---|
| <b>Altmannshofer, H.</b> | <b>FEM-Simulation der Verformungen beim 3D-Kunststoffdruck unter Berücksichtigung des Verzugs durch Schwund</b><br>Semesterarbeit an der Technischen Universität München, abgegeben am 01.07.2011<br>Ergebnisse in Teilen eingeflossen in Abschnitt 5.3 sowie in die Abbildungen 5.19 bis 5.20.           |
| <b>Birk, M.</b>          | <b>Multiskalensimulation des 3D-Kunststoffdrucks unter Berücksichtigung der Korngrößenfraktionierung</b><br>Semesterarbeit an der Technischen Universität München, abgegeben am 02.05.2011<br>Ergebnisse in Teilen eingeflossen in Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4 sowie in die Abbildungen 5.8, 5.10 bis 5.15. |
| <b>Eichhorn, A.</b>      | <b>Nutzwertanalyse des Pulverbett-basierten 3D-Druckens mit Tintenstrahldruckköpfen</b><br>Bachelorarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg, abgegeben am 30.11.2011<br>Ergebnisse in Teilen eingeflossen in Kapitel 7 sowie in die Abbildungen 7.1 bis 7.6.                       |

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Tuch, M.</b>        | <b>Optimierung der Prozessparameter beim 3D-Drucken</b><br>Diplomarbeit an der Technischen Universität München, abgegeben am 14.12.2010<br>Ergebnisse in Teilen eingeflossen in Abschnitt 6.2.2 sowie in die Abbildungen 6.4 und 6.7 bis 6.10.  |
| <b>Tuch, R.</b>        | <b>Methode zur Herstellung von Multimaterial-Bauteilen durch den 3D-Kunststoffdruck</b><br>Diplomarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München, abgegeben am 24.06.2011<br>Ergebnisse in Teilen eingeflossen in Abschnitt 4.3 und 6.4 sowie in die Abbildungen 6.13, 6.15 bis 6.17.          |
| <b>Mohammad, H.</b>    | <b>Simulation der Verfestigung beim 3D-Kunststoffdruck unter Berücksichtigung des Verzugs durch Schwund</b><br>Diplomarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg, abgegeben am 18.06.2010<br>Ergebnisse in Teilen eingeflossen in Abschnitt 5.3 sowie in die Abbildungen 5.17 bis 5.18.   |
| <b>Unterberger, E.</b> | <b>Konstruktion eines Auftragsmechanismus zur Herstellung funktionsintegrierter Bauteile durch den 3D-Kunststoffdruck</b><br>Semesterarbeit an der Technischen Universität München, abgegeben am 21.10.2010<br>Ergebnisse in Teilen eingeflossen in Abschnitt 4.3 und 6.4 sowie in die Abbildung 6.19 rechts. |

*Tabelle 10.1: Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten*

## 10.2 Materialdaten zur Simulation

Im Rahmen der Materialsimulation in Abschnitt 5.2 angewendete Werkstoffparameter sind in der folgenden Tabelle 10.2 zusammengefasst.

| Parameter                       | Abk.       | Einheit                  | PMMA | Binder | PolyPor | Diamant           |
|---------------------------------|------------|--------------------------|------|--------|---------|-------------------|
| E-Modul                         | $E_t$      | MPa                      | 3200 | 18     | 400     | $1030 \cdot 10^3$ |
| Poissonzahl                     | $\nu$      | -                        | 0,3  | 0,3    | 0,3     | 0,1               |
| Dichte                          | $\rho_1$   | $\frac{g}{cm^3}$         | 1,19 | 0,95   | 0,77    | 3,00              |
| Linearer Ausdehnungskoeffizient | $\alpha_W$ | $\frac{1}{K \cdot 10^6}$ | 0,70 | 0,85   | 1       | 1,30              |
| Zugfestigkeit                   | $\sigma_m$ | MPa                      | 70   | 0,55   | 3,2     | 750               |
| Quelle                          | -          | -                        | 1)   | 2)     | 3)      | 4)                |

Tabelle 10.2: Angewendete Werkstoffparameter für die Materialsimulation;

- 1) nach DOMININGHAUS ET AL. (2005)
- 2) Simulation mit Digimat MF
- 3) Eigene Werkstoffuntersuchungen
- 4) nach LEUTE (2004)

## 10.3 Angewendete Softwaresysteme

| Software | Hersteller               | Vertrieb in Deutschland |
|----------|--------------------------|-------------------------|
| Digimat  | e-Xstream engineering SA | CADFEM GmbH             |
| ANSYS    | ANSYS Inc.               | CADFEM GmbH             |
| Rapix3D  | FORWISS Passau           | FORWISS Passau          |

Tabelle 10.3: Angewendete Softwaresysteme, deren Hersteller und Vertrieb in Deutschland

## 10.4 Daten zur Nutzwertanalyse

Die Ordinalierungstabelle 10.4 wird zur Umrechnung der Bewertung in Zahlenwerte für die Nutzwertanalyse in Kapitel 7 genutzt. Die eruierten Teilnutzwerte  $n_{ij}$ , deren Gewichtungen  $g_i$  und die daraus resultierenden gewichteten Gesamtnutzwerte  $N(s_t)$  (Zeit),  $N(s_q)$  (Qualität) und  $N(s_k)$  (Kosten) sind in den folgenden Tabellen 10.5 bis 10.11 dargestellt.

| Bewertung | Bedeutung     | Teilnutzwert $n_{ij}$ |
|-----------|---------------|-----------------------|
| ++        | sehr gut      | 10                    |
| +         | gut           | 7                     |
| o         | mittelmäßig   | 5                     |
| -         | schlecht      | 3                     |
| –         | sehr schlecht | 0                     |

*Tabelle 10.4: Ordinalisierungstabelle zur Nutzwertanalyse*

| Kriterium  | Bewertung  |              |     | Teilnutzwert |                          |     | Gewichtung<br>$g_i$<br>% | Gew. Nutzwert |                                    |            |
|--|------------|--------------|-----|--------------|--------------------------|-----|--------------------------|---------------|------------------------------------|------------|
|  | Zerspanung | Spritzgießen | 3DP | Zerspanung   | Spritzgießen<br>$n_{ij}$ | 3DP |                          | Zerspanung    | Spritzgießen<br>$n_{ij} \cdot g_i$ | 3DP        |
| Pre-Processing   | +          | -/-          | ++  | 7            | 2                        | 10  | 60                       | 4,2           | 1,2                                | 6,0        |
| Prozess  | o          | ++           | o   | 5            | 10                       | 5   | 16                       | 0,8           | 1,6                                | 0,8        |
| Bauteilbearbeitung*  | ++         | +            | -   | 10           | 7                        | 3   | 12                       | 1,2           | 0,8                                | 0,4        |
| Nachgelagerte Montage*                                     | -          | o            | ++  | 3            | 5                        | 10  | 12                       | 0,4           | 0,6                                | 1,2        |
| <b>Gesamtnutzen Zeit <math>N(s_t)</math> (Stückzahl 5)</b> |            |              |     |              |                          |     |                          | <b>6,6</b>    | <b>4,2</b>                         | <b>8,4</b> |

Tabelle 10.5: Bewertungsmatrix Zeit bei Stückzahl 5 zur Nutzwertanalyse;  
3DP: 3D-Drucken, \*Post-Processing

| Kriterium  | Bewertung  |              |     | Teilnutzwert |                          |     | Gewichtung<br>$g_i$<br>% | Gew. Nutzwert |                                    |            |
|--|------------|--------------|-----|--------------|--------------------------|-----|--------------------------|---------------|------------------------------------|------------|
|  | Zerspanung | Spritzgießen | 3DP | Zerspanung   | Spritzgießen<br>$n_{ij}$ | 3DP |                          | Zerspanung    | Spritzgießen<br>$n_{ij} \cdot g_i$ | 3DP        |
| Pre-Processing   | +          | -/-          | ++  | 7            | 2                        | 10  | 50                       | 3,5           | 1,0                                | 5          |
| Prozess  | o          | ++           | o   | 5            | 10                       | 5   | 20                       | 1,0           | 2,0                                | 1,0        |
| Bauteilbearbeitung*  | ++         | +            | -   | 10           | 7                        | 3   | 15                       | 1,5           | 1,0                                | 0,5        |
| Nachgelagerte Montage*                                       | -          | o            | ++  | 3            | 5                        | 10  | 15                       | 0,5           | 0,7                                | 1,5        |
| <b>Gesamtnutzen Zeit <math>N(s_t)</math> (Stückzahl 500)</b> |            |              |     |              |                          |     |                          | <b>6,5</b>    | <b>4,7</b>                         | <b>8,0</b> |

Tabelle 10.6: Bewertungsmatrix Zeit bei Stückzahl 500 zur Nutzwertanalyse;  
3DP: 3D-Drucken, \*Post-Processing

| Kriterium   | Bewertung  |              |     | Teilnutzwert |                          |     | Gewichtung<br>$g_i$<br>% | Gew. Nutzwert |                                    |            |
|---|------------|--------------|-----|--------------|--------------------------|-----|--------------------------|---------------|------------------------------------|------------|
|   | Zerspanung | Spritzgießen | 3DP | Zerspanung   | Spritzgießen<br>$n_{ij}$ | 3DP |                          | Zerspanung    | Spritzgießen<br>$n_{ij} \cdot g_i$ | 3DP        |
| Pre-Processing  | +          | -/-          | ++  | 7            | 2                        | 10  | 10                       | 0,7           | 0,2                                | 1,0        |
| Prozess   | o          | ++           | o   | 5            | 10                       | 5   | 36                       | 1,8           | 3,6                                | 1,8        |
| Bauteilbearbeitung*   | ++         | +            | -   | 10           | 7                        | 3   | 27                       | 2,7           | 1,9                                | 0,8        |
| Nachgelagerte Montage*  | -          | o            | ++  | 3            | 5                        | 10  | 27                       | 0,8           | 1,4                                | 2,7        |
| <b>Gesamtnutzen Zeit <math>N(s_t)</math> (Stückzahl 50.000)</b> |            |              |     |              |                          |     |                          | <b>6,0</b>    | <b>6,9</b>                         | <b>6,3</b> |

Tabelle 10.7: Bewertungsmatrix Zeit bei Stückzahl 50.000 zur Nutzwertanalyse;  
3DP: 3D-Drucken, \*Post-Processing

| Kriterium  | Bewertung  |              |     | Teilnutzwert |                          |     | Gewichtung<br>$g_i$<br>% | Gew. Nutzwert |                                    |            |
|--|------------|--------------|-----|--------------|--------------------------|-----|--------------------------|---------------|------------------------------------|------------|
|  | Zerspanung | Spritzgießen | 3DP | Zerspanung   | Spritzgießen<br>$n_{ij}$ | 3DP |                          | Zerspanung    | Spritzgießen<br>$n_{ij} \cdot g_i$ | 3DP        |
| Zuverlässigkeit                                  | ++         | +            | +   | 10           | 7                        | 7   | 10                       | 1,0           | 0,7                                | 0,7        |
| Abm. min.*                                       | ++         | o            | +/+ | 10           | 5                        | 7   | 10                       | 1,0           | 0,5                                | 0,7        |
| Abm. max.*                                       | ++         | +/+          | +   | 10           | 7                        | 5   | 10                       | 1,0           | 0,7                                | 0,5        |
| Komplexität*                                     | -          | o            | ++  | 3            | 5                        | 10  | 20                       | 0,6           | 1,0                                | 2,0        |
| Funktionsintegration*                            | -          | o            | ++  | 0            | 7                        | 10  | 20                       | 0,0           | 1,4                                | 2,0        |
| Bauteiländerungen                                | +          | -            | ++  | 7            | 0                        | 10  | 10                       | 0,7           | 0,0                                | 1,0        |
| Oberflächenqualität                              | ++         | +/+          | o   | 10           | 8                        | 5   | 10                       | 1,0           | 0,8                                | 0,5        |
| <b>Gesamtnutzen Qualität <math>N(s_q)</math></b> |            |              |     |              |                          |     |                          | <b>5,3</b>    | <b>5,1</b>                         | <b>7,4</b> |

Tabelle 10.8: Bewertungsmatrix Qualität zur Nutzwertanalyse;  
3DP: 3D-Drucken, Abm.: Abmessung, \*Bauteilgeometrie

| Kriterium  | Bewertung  |              |      | Teilnutzwert |                          |     | Gewichtung<br>$g_i$<br>% | Gew. Nutzwert |                                    |            |
|--|------------|--------------|------|--------------|--------------------------|-----|--------------------------|---------------|------------------------------------|------------|
|  | Zerspanung | Spritzgießen | 3DP  | Zerspanung   | Spritzgießen<br>$n_{ij}$ | 3DP |                          | Zerspanung    | Spritzgießen<br>$n_{ij} \cdot g_i$ | 3DP        |
| Pre-Processing   | o          | -            | +/++ | 5            | 0                        | 8   | 70                       | 3,5           | 0                                  | 5,6        |
| Lohnkosten $k_{LK}$<br>pro Bauteil*                          | -          | ++           | -    | 3            | 10                       | 3   | 6                        | 0,2           | 0,6                                | 0,2        |
| Bereitstellung<br>Mat.*                                      | +          | o            | o/+  | 7            | 5                        | 6   | 2                        | 0,1           | 0,1                                | 0,1        |
| Recycling Mat.*  | o          | o            | ++   | 5            | 5                        | 10  | 1                        | 0,1           | 0,1                                | 0,1        |
| Maschinenkosten<br>$k_{MSK}$<br>pro Bauteil*                 | -          | ++           | -    | 3            | 10                       | 3   | 5                        | 0,1           | 0,5                                | 0,1        |
| Hilfsstoffe  | o/-        | o            | +    | 4            | 5                        | 7   | 1                        | 0,1           | 0,1                                | 0,1        |
| Bauteil-<br>bearbeitung**                                    | +          | +            | -    | 7            | 7                        | 3   | 6                        | 0,4           | 0,4                                | 0,2        |
| Nachgelagerte<br>Montage**                                   | -          | +            | ++   | 0            | 7                        | 10  | 0                        | 0             | 0                                  | 0          |
| <b>Gesamtnutzen Kosten <math>N(s_k)</math> (Stückzahl 5)</b> |            |              |      |              |                          |     |                          | <b>4,5</b>    | <b>1,8</b>                         | <b>6,4</b> |

Tabelle 10.9: Bewertungsmatrix Kosten bei Stückzahl 5 zur Nutzwertanalyse;  
3DP: 3D-Drucken, Mat.: Material, \*Prozess, \*\*Post-Processing

| Kriterium  | Bewertung  |              |      | Teilnutzwert |                          |     | Gewichtung<br>$g_i$<br>% | Gew. Nutzwert |                                    |            |
|--|------------|--------------|------|--------------|--------------------------|-----|--------------------------|---------------|------------------------------------|------------|
|  | Zerspanung | Spritzgießen | 3DP  | Zerspanung   | Spritzgießen<br>$n_{ij}$ | 3DP |                          | Zerspanung    | Spritzgießen<br>$n_{ij} \cdot g_i$ | 3DP        |
| Pre-Processing   | o          | -            | +/++ | 5            | 0                        | 8   | 30                       | 1,5           | 0                                  | 2,4        |
| Lohnkosten $k_{LK}$<br>pro Bauteil*                            | -          | ++           | -    | 3            | 10                       | 3   | 14                       | 0,4           | 1,4                                | 0,4        |
| Bereitstellung<br>Mat.*  | +          | o            | o/+  | 7            | 5                        | 6   | 5                        | 0,4           | 0,2                                | 0,3        |
| Recycling Mat.*  | o          | o            | ++   | 5            | 5                        | 10  | 2                        | 0,1           | 0,1                                | 0,2        |
| Maschinenkosten<br>$k_{MSK}$<br>pro Bauteil*                   | -          | ++           | -    | 3            | 10                       | 3   | 12                       | 0,4           | 1,2                                | 0,4        |
| Hilfsstoffe  | o/-        | o            | +    | 4            | 5                        | 7   | 2                        | 0,1           | 0,1                                | 0,1        |
| Bauteil-<br>bearbeitung**                                      | +          | +            | -    | 7            | 7                        | 3   | 14                       | 1,0           | 1,0                                | 0,4        |
| Nachgelagerte<br>Montage**                                     | -          | +            | ++   | 0            | 7                        | 10  | 21                       | 0             | 1,5                                | 2,1        |
| <b>Gesamtnutzen Kosten <math>N(s_k)</math> (Stückzahl 500)</b> |            |              |      |              |                          |     |                          | <b>3,9</b>    | <b>5,5</b>                         | <b>6,3</b> |

Tabelle 10.10: Bewertungsmatrix Kosten bei Stückzahl 500 zur Nutzwertanalyse;  
3DP: 3D-Drucken, Mat.: Material, \*Prozess, \*\*Post-Processing

| Kriterium   | Bewertung  |              |      | Teilnutzwert |                          |     | Gewichtung<br>$g_i$<br>% | Gew. Nutzwert |                                    |            |
|---|------------|--------------|------|--------------|--------------------------|-----|--------------------------|---------------|------------------------------------|------------|
|   | Zerspanung | Spritzgießen | 3DP  | Zerspanung   | Spritzgießen<br>$n_{ij}$ | 3DP |                          | Zerspanung    | Spritzgießen<br>$n_{ij} \cdot g_i$ | 3DP        |
| Pre-Processing  | o          | -            | +/++ | 5            | 0                        | 8   | 10                       | 0,5           | 0                                  | 0,8        |
| Lohnkosten $k_{LK}$<br>pro Bauteil*                               | -          | ++           | -    | 3            | 10                       | 3   | 18                       | 0,5           | 1,8                                | 0,5        |
| Bereitstellung<br>Mat.*   | +          | o            | o/+  | 7            | 5                        | 6   | 6                        | 0,4           | 0,3                                | 0,4        |
| Recycling Mat.*   | o          | o            | ++   | 5            | 5                        | 10  | 3                        | 0,2           | 0,2                                | 0,3        |
| Maschinenkosten<br>$k_{MSK}$<br>pro Bauteil*                      | -          | ++           | -    | 3            | 10                       | 3   | 15                       | 0,5           | 1,5                                | 0,5        |
| Hilfsstoffe   | o/-        | o            | +    | 4            | 5                        | 7   | 3                        | 0,1           | 0,2                                | 0,2        |
| Bauteil-<br>bearbeitung**   | +          | +            | -    | 7            | 7                        | 3   | 18                       | 1,3           | 1,3                                | 0,5        |
| Nachgelagerte<br>Montage**  | -          | +            | ++   | 0            | 7                        | 10  | 27                       | 0             | 1,9                                | 2,7        |
| <b>Gesamtnutzen Kosten <math>N(s_k)</math> (Stückzahl 50.000)</b> |            |              |      |              |                          |     |                          | <b>3,5</b>    | <b>7,2</b>                         | <b>5,9</b> |

Tabelle 10.11: Bewertungsmatrix Kosten bei Stückzahl 500 zur Nutzwertanalyse;  
3DP: 3D-Drucken, Mat.: Material, \*Prozess, \*\*Post-Processing

