

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen .....</b>	<b>XV</b>
<b>Verzeichnis der griechischen Formelzeichen .....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Aufbau dieses Kapitels.....	5
2.2 Additive Fertigung .....	5
2.2.1 Grundprinzip additiver Fertigungsverfahren .....	5
2.2.2 Verfahrensvarianten und technologische Prinzipien .....	8
2.2.3 Anwendungsfelder .....	10
2.3 3-D-Druck .....	11
2.3.1 Verfahrensprinzip des 3-D-Drucks .....	11
2.3.2 Prozesskette für den 3-D-Druck.....	13
2.3.3 Wirkprinzipien bei der Verfestigung .....	14
2.3.4 Betrachtete Materialsysteme .....	15
2.3.5 Besonderheiten und Abgrenzung .....	16
2.4 Gestaltabweichungen und Toleranzen .....	17
2.4.1 Gestaltabweichungen .....	17
2.4.2 Maßtoleranzen.....	18
2.4.3 Form- und Lagetoleranzen .....	19
2.4.4 Geometrische Oberflächenbeschaffenheit .....	19

<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>21</b>
3.1	Aufbau dieses Kapitels .....	21
3.2	Aktuelle Entwicklungen für den 3-D-Druck .....	21
3.3	Materialien für den 3-D-Druck.....	22
3.4	Grenzen der Herstellbarkeit und erzielbare Maßhaltigkeit.....	24
3.5	Schwindung während eines additiven Fertigungsprozesses .....	26
3.6	Verzug und Formabweichungen.....	27
3.7	Methoden zur Schwindungs- und Verzugskompensation .....	30
3.8	Simulation der Verformungen während des Fertigungsprozesses .....	31
3.9	Zusammenfassung und Handlungsbedarf.....	33
<b>4</b>	<b>Untersuchung der Schwindung.....</b>	<b>35</b>
4.1	Aufbau dieses Kapitels .....	35
4.2	Theoretische Beschreibung.....	35
4.2.1	Verfestigungsreaktion.....	35
4.2.2	Kapillareffekt und Flüssigkeitsbrücken.....	37
4.2.3	Löseprozess.....	41
4.2.4	Verdunstung.....	42
4.2.5	Polymerisation .....	44
4.3	Einflussfaktoren auf die Schwindung.....	45
4.3.1	Voruntersuchung zur Stärke der Schwindung .....	46
4.3.2	Einfluss des Bindereintrags und der Bauteildicke .....	47
4.3.3	Binderausbreitung durch kapillaren Transport .....	49
4.3.4	Zeitlicher Verlauf der Schwindung .....	51
4.3.5	Reflexion der Ergebnisse .....	52
4.4	Zusammenfassung .....	55

<b>5</b>	<b>Beschreibung schwindungsbedingter Verzugsformen .....</b>	<b>57</b>
5.1	Aufbau dieses Kapitels.....	57
5.2	Wirkprinzipien und resultierende Verzugseffekte .....	57
5.2.1	Zeitversetzte Schwindung .....	57
5.2.2	Schnellere Aushärtung in Randbereichen .....	60
5.2.3	Interaktion mit eingeschlossenem Pulver .....	61
5.3	Mathematische Beschreibung der Fehlerbilder .....	62
5.3.1	Erklärung der Funktionen .....	63
5.3.2	Curling.....	63
5.3.3	Trapezförmiger Verzug .....	64
5.3.4	Einfallstellen .....	65
5.3.5	Gehemmte Schwindung durch eingeschlossenes Pulver .....	66
5.4	Beschreibung von Einflussgrößen .....	67
5.4.1	Versuchsbedingungen .....	68
5.4.2	Orientierung im Bauraum .....	71
5.4.3	Größe eines Objekts .....	74
5.4.4	Bindereintrag.....	79
5.4.5	Materialsysteme .....	82
5.5	Zusammenfassung.....	85
<b>6</b>	<b>Prozessmodelle .....</b>	<b>87</b>
6.1	Aufbau dieses Kapitels.....	87
6.2	Schichtmodell.....	87
6.2.1	Rahmenbedingungen und Anforderungen .....	88
6.2.2	Modellierung des Materials .....	89
6.2.3	Entwicklung eines physikalischen Ersatzmodells .....	94
6.2.4	Ablauf und Umsetzung der Simulation.....	97
6.2.5	Bewertung und Interpretation der Ergebnisse.....	99

6.3 FE-Simulation.....	103
6.3.1 Rahmenbedingungen und Anforderungen .....	103
6.3.2 Modellaufbau .....	105
6.3.3 Implementierung der zeitversetzten Schwindung.....	107
6.3.4 Implementierung der schnelleren Aushärtung von Randschichten .....	111
6.3.5 Implementierung der Interaktion mit eingeschlossenem Pulver 113	
6.3.6 Implementierung der Spannungsrelaxation .....	115
6.3.7 Bewertung der Ergebnisse .....	117
6.4 Zusammenfassung .....	119
<b>7 Kompensation mittels Vordeformation .....</b>	<b>121</b>
7.1 Aufbau dieses Kapitels .....	121
7.2 Erläuterung der Methoden .....	121
7.2.1 Methode zur Vordeformation .....	121
7.2.2 Methoden der Kompensation.....	123
7.3 Entwicklung einer Wissensbasis für eine erfahrungsbasierte Kompensation .....	127
7.3.1 Rahmenbedingungen für den Aufbau einer Wissensbasis ....	127
7.3.2 Kompensation des Curlings .....	129
7.3.3 Kompensation der Einfallstellen.....	133
7.3.4 Kompensation der durch eingeschlossenes Pulver gehemmten Schwindung .....	135
7.4 Anwendungsbeispiele für eine erfahrungsbasierte Kompensation...	139
7.4.1 Anwendungsbeispiel 1: „Gestell“ .....	140
7.4.2 Anwendungsbeispiel 2: „Befestigungselement“ .....	143
7.4.3 Anwendungsbeispiel 3: „Gehäuse“ .....	150
7.5 Zusammenfassung .....	158

<b>8</b>	<b>Potenzialanalyse und Vergleich .....</b>	<b>161</b>
8.1	Aufbau dieses Kapitels.....	161
8.2	Technologianalyse.....	161
8.3	Applikationsanalyse .....	163
8.4	Potenzialermittlung .....	164
<b>9</b>	<b>Schlussbetrachtung .....</b>	<b>167</b>
9.1	Zusammenfassung.....	167
9.2	Ausblick .....	169
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>173</b>
<b>11</b>	<b>Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten .....</b>	<b>191</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>195</b>
12.1	Ergänzende Diagramme zu Abschnitt 5.4 .....	195
12.1.1	Diagramme zu Abschnitt 5.4.3 .....	195
12.1.2	Diagramme zu Abschnitt 5.4.5 .....	197
12.2	Modelle .....	198
12.2.1	Programmcode der Simulation mit MATLAB .....	198
12.2.2	Eingabedaten der FE-Simulation .....	202
12.3	Kompensationsparameter.....	205
12.3.1	Curling.....	205
12.3.2	Einfallstellen .....	205
12.3.3	Gehemmte Schwindung durch eingeschlossenes Pulver .....	206
12.3.4	Anwendungsbeispiel 2: „Befestigungselement“ .....	206
12.3.5	Anwendungsbeispiel 3: „Gehäuse“ .....	208