

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VII
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	XIII
Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen	XV
Verzeichnis der griechischen Formelzeichen	XIX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 Grundlagen	5
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

3	Stand der Wissenschaft und Technik.....	21
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
4	Untersuchung der Schwindung.....	35
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

5 Beschreibung schwindungsbedingter Verzugsformen	57
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
6 Prozessmodelle	87
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 eingeslossenem Pulver 113	
6.3.6 Implementierung der Spannungsrelaxation	115
6.3.7 Bewertung der Ergebnisse	117
6.4 Zusammenfassung	119
7 Kompensation mittels Vordeformation	121
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

8	Potenzialanalyse und Vergleich	161
8.1	Aufbau dieses Kapitels.....	161
8.2	Technologieanalyse.....	161
8.3	Applikationsanalyse	163
8.4	Potenzialermittlung	164
9	Schlussbetrachtung	167
9.1	Zusammenfassung.....	167
9.2	Ausblick	169
10	Literaturverzeichnis.....	173
11	Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten	191
12	Anhang	195
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