

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Einführung .....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Ziele und Abgrenzung der Arbeit .....	4
1.4 Aufbau der Arbeit .....	5
<b>2 Grundlagen der additiven Fertigung</b> .....	7
2.1 Begriffe und Einordnung als Fertigungsverfahren .....	7
2.2 Additive Fertigungsverfahren .....	11
2.2.1 Historischer Ursprung .....	11
2.2.2 Verfahrenstechnische Hauptgruppen additiver Fertigung .....	11
2.2.3 Additive Verfahrensvielfalt .....	13
2.2.4 Schmelzschichtverfahren .....	14
2.3 Anwendungspotenziale in ausgewählten Branchen der stationären Industrie .....	16
2.3.1 Medizintechnik .....	16
2.3.2 Luft- und Raumfahrt .....	18
2.3.3 Automobilindustrie .....	18
2.4 Grundprinzipien additiver Fertigung .....	20
2.4.1 Schichtenweiser Aufbau .....	20
2.4.2 Digitale Prozessabläufe .....	20
2.4.3 Aufwändige Qualitätsprüfung .....	24
2.4.4 Maximaler Automatisierungsgrad .....	24
2.4.5 Wirtschaftliche Individualfertigung .....	25

<b>3 Additive Fertigungsverfahren im Bauwesen</b>	29
3.1 Überblick	29
3.2 Potenziale	31
3.2.1 Automatisierte Fertigung und Building Information Modeling	31
3.2.2 Wirtschaftliche Einsparpotenziale	32
3.2.3 Neue architektonische Gestaltungsmöglichkeiten	35
3.2.4 Erhöhung der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit	36
3.2.5 Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes auf Baustellen	38
3.2.6 Kompensation des Fachkräftetückgangs im Bauwesen	40
3.2.7 Bauen in „menschenfeindlichen“ Umgebungen	41
3.3 Additive Technologien mit mineralischen Baustoffen	42
3.3.1 Überblick	42
3.3.2 Indirekte additive Bauverfahren	43
3.3.3 Sintern	46
3.3.4 Selektive Bindung	46
3.3.5 Extrusion	50
3.4 Extrusionsbasierte Druckverfahren mit Beton	52
3.4.1 Forschung und Entwicklung (FuE) weltweit	52
3.4.2 Merkmalspezifische Unterscheidung der Forschungsansätze	53
3.4.3 Contour Crafting	54
3.4.4 Concrete Printing	60
3.4.5 Sonstige Strangdruckverfahren	62
3.4.6 Vollwanddruck	67
3.4.7 Exkurs Bewehrungsintegration	69
3.5 CONPrint3D® – Concrete ON-site 3D-Printing	72
3.5.1 Entwicklungskonzept	72
3.5.2 Grundprinzipien und Alleinstellungsmerkmale	74
3.5.3 Stand der Forschungsaktivitäten und Ausblick	76
<b>4 Digitale Prozesskette beim Beton-3D-Druck</b>	81
4.1 Überblick zur bestehenden digitalen Prozesskette	81
4.2 BIM als Basis für den digitalen Datenfluss	83
4.3 BIM-Exportdateiformate für den Beton-3D-Druck	84
4.3.1 STL als Standarddateiformat im 3D-Druck	84

4.3.2	Neuentwickelte Dateiformate für den 3D-Druck .....	86
4.3.3	IFC-Datenexport .....	88
4.3.4	Mögliche Exportdateiformate etablierter BIM-Software .....	91
4.4	Slicing .....	92
4.4.1	Überblick .....	92
4.4.2	Slicer-Software .....	93
4.5	Modifizierung der digitalen Prozesskette für den vollwandigen Beton-3D-Druck .....	96
<b>5</b>	<b>Verfahrensspezifische Randbedingungen und geeignete         Lösungsstrategien für den vollwandigen Beton-3D-Druck .....</b>	<b>101</b>
5.1	Überblick .....	101
5.2	Baukonstruktion .....	103
5.2.1	Geometrische Abgrenzung .....	103
5.2.2	Ausführungstoleranzen .....	104
5.2.3	Kraftschlüssige Wandverbindungen .....	107
5.2.4	Wandöffnungen .....	110
5.2.4.1	Ansätze zur Integration von Wandöffnungen .....	110
5.2.4.2	Individuelle Anpassung der Schichthöhen .....	114
5.2.4.3	Exkurs: Produktion der Stürze .....	116
5.3	Baumaschinentechnik .....	117
5.3.1	Entwicklungskonzepte des Druckkopfes .....	117
5.3.2	Ausführung von Ecken .....	118
5.3.3	Ausführung von T-Verbindungen .....	120
5.3.4	Ausführung von Kreuzungen .....	121
5.3.5	Störstellen mit Stillstandzeiten .....	124
5.3.6	Zusammenfassung .....	124
5.4	Betontechnologie .....	125
5.4.1	Erhärtungszeiten .....	125
5.5	Bauverfahrenstechnik .....	127
5.5.1	Baustelleneinrichtung .....	127
5.5.2	Auswahl des Druckstartpunktes .....	129
5.5.3	Druckabschnittsplanung .....	130
5.5.3.1	Horizontale Druckabschnitte .....	130
5.5.3.2	Vertikale Druckabschnitte .....	130
5.5.3.3	Bildung von Druckabschnitten .....	133
5.6	Umweltbedingungen .....	136

---

5.6.1	Überblick .....	136
5.7	Druckzeitminimierung .....	139
5.7.1	Überblick .....	139
5.7.2	Vergleichbare Forschungsarbeiten zur Druckpfadoptimierung .....	140
<b>6</b>	<b>Druckpfadoptimierung nach Methoden des Operations Research .....</b>	<b>145</b>
6.1	Überblick .....	145
6.2	Grundlagen zur Druckpfadoptimierung .....	146
6.2.1	Begriffe der Graphentheorie .....	146
6.2.2	Bezug zu bekannten Optimierungsproblemen .....	149
6.3	Wegoptimierte Druckpfadplanung für den vollwandigen Beton-3D-Druck .....	151
6.3.1	Grundlagen und allgemeine Vorgehensweise .....	151
6.3.2	Geeignete Eröffnungsheuristik .....	157
6.3.3	Geeignete Verbesserungsheuristik .....	159
6.3.4	Lösung für das Routingproblem .....	161
6.4	IT-Software zur Ermittlung wegoptimierter Druckpfade .....	163
6.4.1	Überblick .....	163
6.4.2	Programmaufbau .....	164
6.4.3	Softwareanwendung und -funktionalität .....	164
6.5	Zusammenfassung und Verallgemeinerbarkeit .....	171
<b>7</b>	<b>Simulationsstudie zur Analyse druckzeitbeeinflussender Prozessparameter .....</b>	<b>175</b>
7.1	Einführung .....	175
7.1.1	Problemstellung und Zielsetzung .....	175
7.1.2	Vorgehensweise und Methodik .....	176
7.1.3	Geometrische Abgrenzung der Untersuchung .....	178
7.2	Simulationsmodell .....	179
7.2.1	Beispielprojekt .....	179
7.2.2	Zeitliches Berechnungsmodell .....	181
7.3	Eingangsdaten für das zeitliche Berechnungsmodell .....	184
7.3.1	Druckobjekt und Schichthöhe .....	184
7.3.2	Bewegungsgrößen .....	185
7.3.3	Zeitaufwand an Störstellen .....	185
7.4	Simulationsaufgaben .....	191
7.4.1	Überblick .....	191

7.4.2 Aufgabe 1) Gleichbleibender oder bereichsweise angepasster Druckpfad .....	191
7.4.3 Aufgabe 2) Teilung des Grundrisses in zwei Druckabschnitte .....	197
7.4.4 Aufgabe 3) Sensitivitätsanalyse der maßgebenden Prozessparameter .....	201
7.4.4.1 Überblick .....	201
7.4.4.2 Ergebnisse der Variation von a) Druckgeschwindigkeit $v_D$ .....	203
7.4.4.3 Ergebnisse der Variation von b) Fluggeschwindigkeit $v_F$ .....	205
7.4.4.4 Ergebnisse von c) der Variation der Zeit für die Störstellen $t_{ST}$ .....	207
7.4.4.5 Ergebnisse von d) der Variation der Schichthöhe $h_S$ .....	208
7.4.4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse .....	211
7.4.5 Aufgabe 4) Relation zwischen Druckgeschwindigkeit und Schichthöhe .....	212
7.4.5.1 Einfluss auf die Gesamtdruckzeit .....	212
7.4.5.2 Modellbasierte Zeit-Aufwandswerte .....	215
7.4.6 Aufgabe 5) Auswirkung verschiedener Grundrisse auf die Gesamtdruckzeit .....	218
7.4.6.1 Verzweigung des Grundrisses .....	218
7.4.6.2 Zeitliche Auswirkung von Öffnungen .....	222
7.4.7 Exkurs: Vereinfachte Berechnung der Gesamtdruckzeit .....	225
7.5 Ergebnisse der Simulationsstudie .....	228
<b>8 Schlussbetrachtung .....</b>	<b>233</b>
8.1 Zusammenfassung .....	233
8.2 Ergebnisse der Arbeit .....	235
8.3 Ausblick .....	238
<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>241</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>301</b>