

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Ziele und Abgrenzung der Arbeit	4
1.4	Aufbau der Arbeit	5
2	Grundlagen der additiven Fertigung	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

3 Additive Fertigungsverfahren im Bauwesen	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 Fachkräfterrückgangs 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
4 Digitale Prozesskette beim Beton-3D-Druck	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
5	Verfahrensspezifische Randbedingungen und geeignete Lösungsstrategien für den vollwandigen Beton-3D-Druck	101
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
6	Druckpfadoptimierung nach Methoden des Operations Research	145
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
7	Simulationsstudie zur Analyse druckzeitbeeinflussender Prozessparameter	175
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	Simulationaufgaben	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
8	Schlussbetrachtung	233
8.1	Zusammenfassung	233
8.2	Ergebnisse der Arbeit	235
8.3	Ausblick	238
	Anlagenverzeichnis	241
	Literaturverzeichnis	301