

Wirtschaftlichkeitsanalyse von 3D-Druck-Verfahren in der Bauindustrie anhand eines Einfamilienhauses

Masterthese zur Erlangung des akademischen Grades
“Master of Science”

eingereicht bei
Arch. DI Dr. techn. Wolf-Michael Oliver Tschuppik

Clemens Stangelberger, MA

01349367

Eidesstattliche Erklärung

Ich, **CLEMENS STANGELBERGER, MA**, versichere hiermit

1. dass ich die vorliegende Masterthese, "WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE VON 3D-DRUCK-VERFAHREN IN DER BAUINDUSTRIE ANHAND EINES EINFAMILIENHAUSES", 92 Seiten, gebunden, selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfen bedient habe, und
2. dass ich das Thema dieser Arbeit oder Teile davon bisher weder im In- noch Ausland zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 06.04.2022

Unterschrift

Kurzfassung

Im Hinblick auf eine ökonomische Betrachtung zeigt sich, dass die Produktivität in der Bauindustrie seit Jahrzehnten stagniert oder gar rückläufig ist. Weltweit betrug das Wachstum der Produktivität im Baugewerbe in den letzten zwei Jahrzehnten im Durchschnitt nur 1 % pro Jahr, verglichen mit einem Wachstum von 2,8 % der gesamten Weltwirtschaft. Eine Wende in der Steigerung und Ausschöpfung von Produktivitätspotentialen könnten dabei additive 3D-Druck-Verfahren bilden, die als Druckmaterial ein Betongemisch verwenden. Um festzustellen, ob diese Verfahren auch ökonomische Vorteile gegenüber herkömmlichen Bauverfahren bieten, wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse im Vergleich zur Massivbauweise durchgeführt. Für diese Analyse wird dabei der Rohbau eines Referenz-Einfamilienhauses mit vordefinierten Parametern herangezogen. Diese umfassen dabei unter anderem den geografischen Fokus auf Österreich, eine Nettogeschoßfläche von 140 m² und eine Deckenhöhe von 2,70 m. Nach einer Betrachtung der unterschiedlichen 3D-Druck-Verfahren, wird der Schwerpunkt auf das sogenannte Extrusionsverfahren gelegt, da dieses am geeignetsten erscheint die Anforderungen der Bauindustrie zu erfüllen. Die anschließende Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgt dabei auf Basis einer inhaltlichen Auseinandersetzung mit der bestehenden Fachliteratur sowie der Untersuchung einer Einzelfallstudie. Die möglichen Kostenvorteile werden auf Basis von den drei Kostenkategorien Personalkosten, Materialkosten und Herstellungskosten analysiert.

Bei den Personalkosten zeigt sich ein Kostenvorteil gegenüber der Massivbauweise aufgrund der kürzeren Bauzeit unter Verwendung von 3D-Druckern. Bei den Materialkosten besteht ein (teilweise markanter) Preisunterschied, der aktuell weniger Anreiz schafft den 3D-Druck bei der Herstellung des Rohbaus eines Einfamilienhauses in Erwägung zu ziehen. Zusammenfassend ist kein klarer Preisvorteil gegenüber einem herkömmlichen Beton zu erkennen. Bei der Untersuchung der Herstellungskosten zeigen sich aus wissenschaftlicher Sicht Kosteneinsparungen in Höhe von 28% bis hin zu 82%, die durch die Einzelfallstudie jedoch nicht bestätigt werden können. Es ist hervorzuheben, dass bei einer zunehmenden Komplexität und Formfreiheit, die den 3D-Druck als Bauverfahren besonders attraktiv macht, mit verhältnismäßig hohen Kosten für die Wärmedämmung zu rechnen ist. Kann hier in absehbarer Zeit kein kostengünstigerer Ersatz für den Wärmeschutz gefunden werden, bleibt der Einsatz von 3D-Druck-Verfahren aus wirtschaftlicher Sicht eher unattraktiv.

Vorwort

Die Themenfindung für die vorliegende Masterarbeit entstand wie vielerorts durch einen Zufall. Beim sonntäglichen Lesen meines Lieblingsimmobilienmagazins stieß ich auf einen kurzen Artikel über das Drucken von Gebäuden unter Anwendung eines 3D-Druckers. Ich las gespannt Zeile für Zeile und machte mir dabei erste Gedanken. Das besagte Magazin ließ mich im Anschluss jedoch mit mehr offenen Fragen zurück als mir lieb war. Da ich den 3D-Druck inhaltlich bisher nur sehr oberflächlich kannte, wusste ich sofort, dass ich darüber mehr erfahren musste. Nicht losgelassen hat mich insbesondere die Frage, wo denn überhaupt das ideale Einsatzgebiet für 3D-gedruckte Gebäude sein könnte. In Krisengebieten, wo das rasche Errichten von Gebäuden ein großer Vorteil wäre oder doch erst auf dem Mond? Viele Fragen die ihre Antworten suchten. Einige wenige sollen im Rahmen dieser Masterarbeit geklärt werden.

Mein Dank richtet sich an alle Personen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Neben meinem Betreuer, vielen interessierten Kollegen aus dem Berufsalltag oder meinen Mitstudenten, haben mich zwei Menschen besonders bestärkt dieses Thema in Zuge meiner Masterarbeit zu behandeln. Ich vermeide eine namentliche Erwähnung, hoffe jedoch, dass sie auch in Zukunft immer für einen offenen und kritischen Austausch zur Verfügung stehen werden.

Aus privater Sicht danke ich auch all den besonderen Menschen in meinem Leben, die während des Studiums immer an meiner Seite waren und sichergestellt haben, dass ich mein Privatleben, meinen Beruf und alle sonstigen Herausforderungen des Lebens so gut meistern konnte.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Problemdefinition.....	1
1.2. Abriss der zentralen Forschungsfrage	6
1.3. Ziele und Struktur der Masterthese.....	7
2. Begriffsdefinitionen und Hintergrundinformationen	8
2.1. Massivbauweise	8
2.1.1. Definition / Ursprung / historische Entwicklung	8
2.1.2. Arten von Bauweisen.....	9
2.1.3. Anwendungsgebiete in der Bauindustrie: Das Einfamilienhaus.....	11
2.2. Additive Fertigung und Verfahrensmethoden.....	13
2.2.1. Definition / Ursprung / historische Entwicklung	13
2.2.2. Verfahrensmethoden	16
2.3. Einschätzung der additiven Verfahren für den 3D-Druck von Einfamilienhäusern	31
2.4. Anwendungsgebiete des Extrusionsverfahrens in der Bauindustrie.....	34
2.4.1. Druckertypen des Extrusionsverfahrens	34
2.4.2. Ausgewählte Druckertypen des Extrusionsverfahrens	37
3. Beschreibung der methodischen Vorgangsweise und des Forschungsansatzes.....	41
3.1. Literatur- bzw. Desk-Research-Vergleich	41
3.2. Einzelfallstudie	42
3.3. Forschungsansatz und Erhebungstechnik.....	44
4. Wirtschaftlichkeitsanalyse zwischen der additiven Fertigung und der Massivbauweise	46
4.1. Betrachtung anhand bestehender Literatur.....	46
4.1.1. Materialkosten	47
4.1.2. Personalkosten.....	48
4.1.3. Sonstige Kosten	49
4.1.4. Gerätekosten.....	50
4.1.5. Herstellungskosten.....	53
4.2. Betrachtung anhand einer Einzelfallstudie.....	57
4.2.1. Projektübersicht.....	57
4.2.2. Grundrissplan und Schnittdarstellung	60
4.2.3. Wandschnitt.....	62
4.2.4. Betongemisch.....	63

4.2.5. Personalkosten.....	63
4.2.6. Materialkosten	64
4.2.7. Herstellungskosten	65
5. Darstellung der Ergebnisse der Arbeit	66
5.1. Auswertung	66
5.1.1. Personalkosten.....	66
5.1.2. Materialkosten	68
5.1.3. Herstellungskosten	69
5.2. Interpretation	73
6. Schlussfolgerungen.....	76
 Verzeichnisse:	
Literaturverzeichnis.....	78
Abbildungsverzeichnis.....	84
Tabellenverzeichnis.....	86

1. Einleitung

Der 3D-Druck in der Bauindustrie trifft aus Sicht des Verfassers den Zeitgeist. Die Bauwirtschaft kämpft mit steigenden Kosten (nicht zuletzt aufgrund der unterbrochenen Lieferketten durch die Coronakrise), einer stagnierenden Produktivität und einem Fachkräftemangel. Die Zukunft sieht also alles andere als rosig aus. Zudem müssen neu errichtete Gebäude auch immer umweltfreundlicher werden und dürfen am besten überhaupt kein CO₂ verursachen. Viele dieser Probleme soll der 3D-Druck mit Beton zu lösen im Stande sein. Überspitzt formuliert könnte man gar vom heiligen Gral der Bauindustrie sprechen. Wie so oft im Leben, setzen sich Technologien nicht aufgrund ihres ökologischen Fußabdruckes auf breiter Ebene durch, sondern in letzter Konsequenz entscheidet für die Massentauglichkeit zumeist der Preis oder besser formuliert der ökonomische Vorteil. Ob die Errichtung von 3D-gedruckten Gebäuden wirtschaftlich sinnvoll ist, soll im Zuge dieser Masterarbeit erforscht werden.

1.1. Problemdefinition

Jedes Jahr werden weltweit etwa 10 Billionen US-Dollar für Bauausgaben aufgewendet. Diese Ausgaben entsprechen 13 % des globalen BIPs und zeigen, dass die Bauwirtschaft zu einer der größten Sektoren der Weltwirtschaft zählt. Die Branche beschäftigt 7 % der erwerbstätigen Weltbevölkerung und hat einen essenziellen Anteil an jenem Aufbau von Strukturen, in denen wir leben und arbeiten, die unsere Energie, Materialien und Güter erzeugen und auf denen wir reisen.¹ Die Anforderungen an die zukünftige Bauindustrie sind umso vielschichtiger. Die Urbanisierung und der Mangel an bezahlbarem Wohnraum, höhere Anforderungen an Flexibilität, Sicherheit und Komfort sowie die fortschreitende Digitalisierung und Gebäudeautomatisierung bewirken eine zunehmende Komplexität, die vielfach nur fachübergreifend gelöst werden kann. Die Fähigkeit zur Integration von Wissen aus anderen Sektoren wird daher in den nächsten Jahren im Bauwesen ein ebenso wettbewerbsentscheidender Faktor sein, wie die Bereitschaft zur Anwendung neuer Technologien und Prozesse.²

Gleichzeitig unterstreicht der steigende Bedarf nach immer knapper werdenden Ressourcen die Notwendigkeit, vermehrt mit Baustoffen zu arbeiten, die

¹ Vgl. McKinsey & Company, 2017, S. 1.

² Vgl. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2021, S. 2.

wiederverwertbar und klimaneutral sind. Im Jahr 2014 wurde bereits in einem Bericht des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) auf die zunehmende Knappheit von Sand hingewiesen, der mitunter für die Herstellung von Zement im Bauprozess benötigt wird. Der zunehmende Anstieg der weltweiten Bautätigkeit aufgrund des Bevölkerungswachstums und der wirtschaftlichen Entwicklung in den Schwellenländern führt dazu, dass Sand aufgrund der gigantischen Nachfrage schwindet.³ Diese schwindende Verfügbarkeit von Sand sei hier nur als ein Beispiel angeführt. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt ist bekannt, dass weitere konventionelle Ressourcen wie Kupfer, seltene Erden, Zinn oder Zink in den nächsten Jahrzehnten zur Neige gehen. Für einen ressourcenschonenden Einsatz von Baustoffen muss das technische Niveau im Bau in Zukunft durch Innovationen verbessert werden.⁴

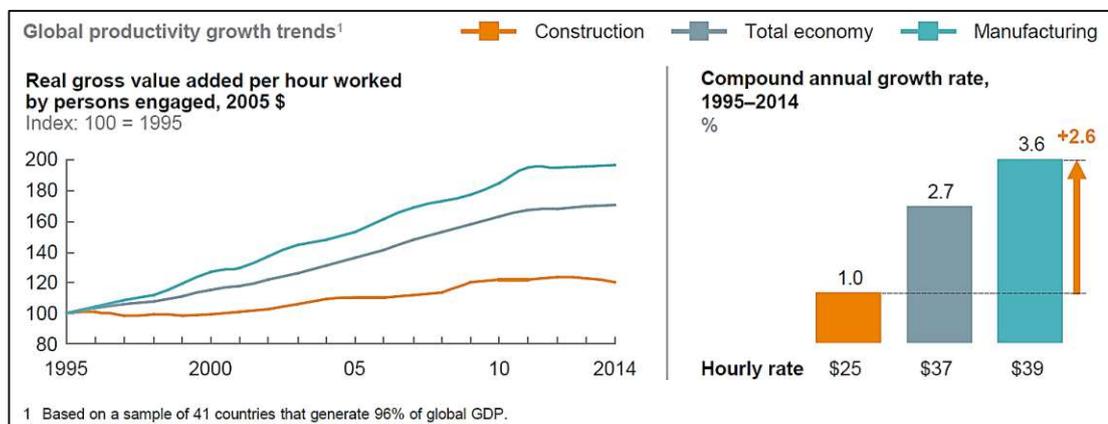


Abbildung 1: Trends im globalen Produktivitätswachstum

Im Hinblick auf eine ökonomische Betrachtung zeigt sich, dass die Produktivität in der Bauindustrie seit Jahrzehnten stagniert oder gar rückläufig ist. Weltweit betrug das Wachstum der Produktivität im Baugewerbe in den letzten zwei Jahrzehnten im Durchschnitt nur 1 % pro Jahr, verglichen mit einem Wachstum von 2,8 % der gesamten Weltwirtschaft und 3,6 % in der verarbeitenden Industrie.⁵ Die Gründe dafür sind vielschichtig und umfassen Faktoren wie den Widerstand gegenüber Veränderungen im stark traditionell geprägten Bausektor, die geringe Industrialisierung von Bauprozessen, die schlechte Vernetzung von Daten bzw. Dateninteroperabilität oder die hohe Fluktuation von Arbeitskräften, die die Implementierung neuer Methoden erschwert. Generell investiert die traditionelle Bauwirtschaft nur geringe finanzielle Mittel in Forschung und Entwicklung, ebenso

³ Vgl. United Nations Environment Programme, 2014, S. 11.

⁴ Vgl. Deutsches Umweltbundesamt, 2019, S. 14 ff.

⁵ Vgl. McKinsey & Company, 2017, S. 2.

auch in Ländern mit sehr guter Wirtschaftsentwicklung. Dies wird hauptsächlich mit niedrigen Gewinnmargen für Bauunternehmen begründet. Als Resultat dieser Entwicklungen blieben die Bauprozesse bis zuletzt gänzlich unverändert.⁶

In einer Stichprobe aus analysierten Ländern, die 96 % des globalen BIP abdecken, haben in den letzten zehn Jahren weniger als ein Viertel der Bauunternehmen das Produktivitätswachstum der jeweiligen Gesamtwirtschaften erreicht. Vor allem aber gibt es eine große Anzahl von kleineren Akteuren mit sehr geringer Produktivität. In Summe leiden viele Bauprojekte unter Kosten- und Zeitüberschreitungen.⁷

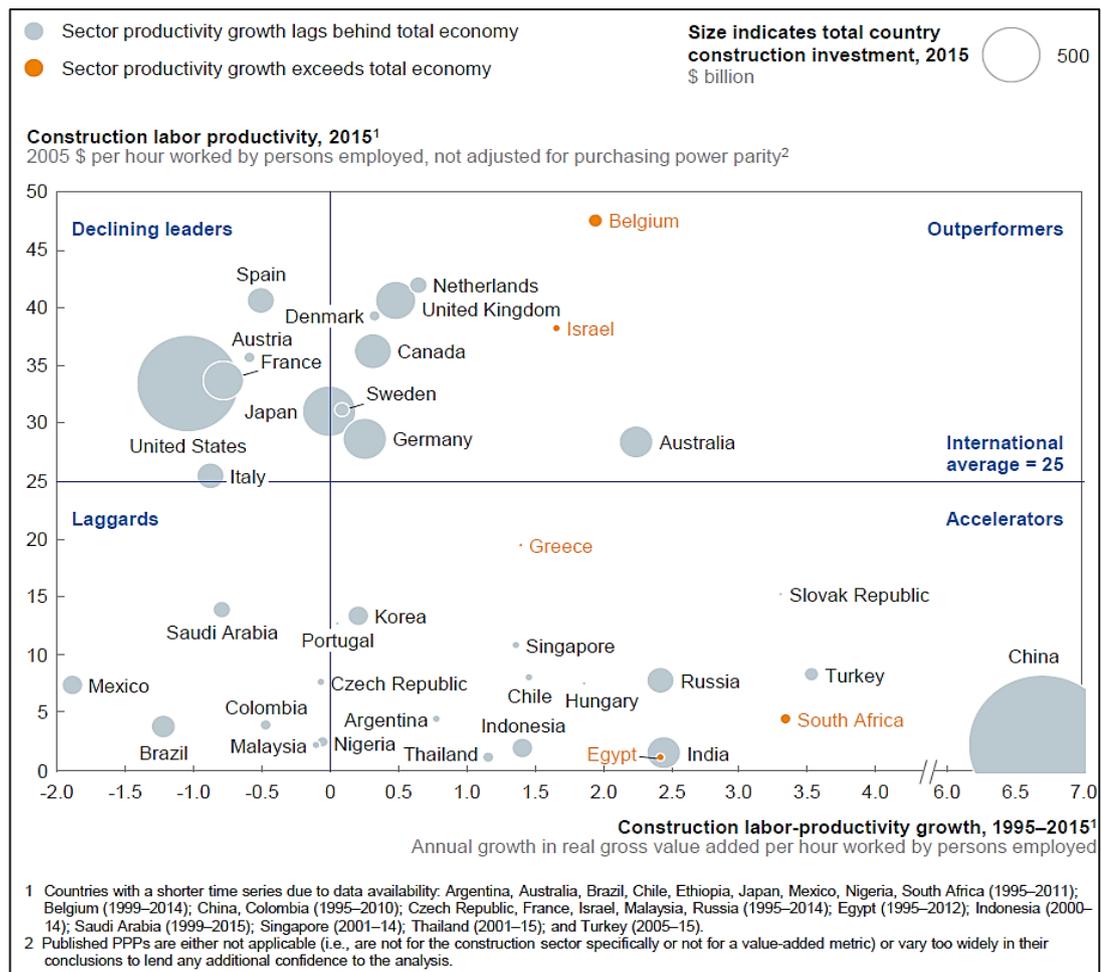


Abbildung 2: Arbeitsproduktivität in der Bauwirtschaft

Wie in der Abbildung 2 ersichtlich, ist die Produktivität der Bausektoren auf der ganzen Welt unterschiedlich. Es gibt große regionale Unterschiede sowie vereinzelte Leistungsträger, die aus der Masse hervorstechen. In den Vereinigten Staaten von Amerika beispielsweise ist die Produktivität des Sektors heute niedriger als im Jahr

⁶ Vgl. De Schutter, et al., 2018, S. 30.

⁷ Vgl. McKinsey & Company, 2017, S. 2.

1968. China und Südafrika haben ihre Produktivität rasant gesteigert, wenn auch von einem niedrigen Niveau aus. Gleichzeitig fallen andere Länder weiter zurück, wie etwas Brasilien und Saudi-Arabien. Einigen kleineren Ländern – insbesondere Australien, Belgien und Israel – gelingt es, hohe Produktivitätsniveaus mit vergleichsweise schnellem Wachstum zu kombinieren.⁸ Europas Produktivität stagniert weitgehend bis auf wenige positive Ausnahmen. Österreich befindet sich in der Kategorie „declining leaders“ und zeigt eine absinkende Produktivität.

Im gleichen Zeitraum sind Baukosten und Baupreise in vielen Ländern gestiegen. Anhand des Beispiels Österreich zeigt sich folgendes Bild: Laut Statistik Austria ist der Baupreisindex für den Hoch- und Tiefbau seit 2010 um insgesamt +23.2 % gestiegen. Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Steigerungsrate von +2.1 %. Die gestiegenen Baupreise in Kombination mit einer stärkeren Nachfrage nach Wohnraum führten im Vergleichszeitraum zu höheren Immobilienpreisen, gemessen anhand des Häuserpreisindex, um jährlich durchschnittlich +5.9 %.⁹ In Bezug auf die Leistbarkeit von Wohnraum ist zusätzlich zu erwähnen, dass die Immobilienpreise zuletzt auch stärker gestiegen sind als die Einkommen der österreichischen Bevölkerung. Leistbaren Wohnraum zu finden oder zu schaffen, wird damit immer schwieriger und führt auch zu einer immer stärkeren finanziellen Belastung der Haushalte. Laut einer im Jahr 2019 veröffentlichten Studie „empfinden rund 53 % der Österreicher Wohnen mittlerweile als nicht mehr leistbar.“¹⁰ Seither sind die Immobilienpreise, vor allem aufgrund der Coronakrise, weiter angestiegen wodurch sich die Situation zunehmend verschärft hat.

McKinsey hat insgesamt sieben Maßnahmen identifiziert, die bei einer Umsetzung die Produktivität des Bausektors um 48 bis 60 % erhöhen können (siehe Tabelle 1). Würde die Bauindustrie gar vollständig von projektbasierten Ansätzen abweichen und konsequenter eine Standardisierung bzw. Massenproduktion vorantreiben, könnte laut dieser Studie der Produktivitätsschub gar um das Fünf- bis Zehnfache größer sein.¹¹

⁸ Vgl. McKinsey & Company, 2017, S. 3.

⁹ Vgl. Statistik Austria, 2021, online.

¹⁰ DerStandard, 2019, online.

¹¹ Vgl. McKinsey & Company, 2017, S. 3.

Maßnahme	Detail	Potential die globale Produktivität zu verbessern	Potential an Kosteneinsparungen
1. Regulierung	Regulierung neugestalten und Transparenz erhöhen	Voraussetzung, n/a	n/a
2. Zusammenarbeit und Verträge	Den vertraglichen Rahmen erneuern	8-9%	6-7%
3. Design und Konstruktion	Design- und Konstruktionsprozesse überdenken	8-10%	7-10%
4. Einkauf und Lieferketten	Verbesserung des Beschaffungs- und Lieferkettenmanagements	7-8%	3-5%
5. Vor-Ort Ausführung	Verbesserung der Ausführung vor Ort	6-10%	4-5%
6. Technologie	Einführung von Digitaltechnik, neuer Materialien und erweiterter Automatisierung	14-15%	4-6%
7. Arbeitskräfte	Neuqualifizierung / Umschulung von Arbeitskräften	5-7%	3-5%
Kumuliertes Verbesserungspotential		48-60%	

Tabelle 1: Maßnahmen zur Steigerung in der Produktivität des Bausektors

Es zeigt sich welche großen Potentiale die Bauindustrie birgt, um zu einer Steigerung der Produktivität beizutragen. Könnte durch die Umsetzung all dieser Maßnahmen oder auch nur einem Teil davon an die Entwicklung der Gesamtwirtschaft angeschlossen werden, würde dies die Wertschöpfung der Bauindustrie um 1,6 Billionen US-Dollar pro Jahr steigern.¹² Dem Technologiebereich wird dabei mit 14-15% Steigerung das größte Potential zugeschrieben, weshalb der Fokus darauf besonders interessant erscheint.

Ein Zahnrad in der Ausschöpfung von Produktivitätspotentialen könnten daher additive Verfahren, auch bekannt als 3D-Druck-Verfahren, bilden. Bei dieser Art der Fertigung handelt es sich, verglichen mit anderen bestehenden Produktionsverfahren, um ein ressourcenschonendes Verfahren, bei dem im besten

¹² Vgl. Ebd.

Fall keine Lagerhaltung, kein Verschnitt und wenig Abfall entstehen. Im Hinblick auf den ökologischen Fußabdruck dieser Technologie zeigt sich das enorme Potenzial dieses Verfahrens. Baukonzerne haben die Einsatzmöglichkeiten der additiven Fertigung und deren Potentiale für die Zukunft bereits erkannt, weshalb auch immer mehr Unternehmen in das Geschäft des schnellen Häuserbauens einsteigen. Beispielsweise konnte die Bauzeit eines einstöckigen Hauses durch 3D-Betondruck von durchschnittlich 3-4 Wochen auf 24 Stunden verkürzt werden. Auch die Herausforderungen in Bezug auf die Leistbarkeit von Wohnraum könnten mithilfe der additiven Fertigung gelöst werden.¹³ Valide Zahlen sind aufgrund des frühen Stadiums der Technologie nur eingeschränkt verfügbar, jedoch gibt es einige Schätzungen bezüglich der tatsächlichen Baukosten. Das US-amerikanische Unternehmen Apis Cor geht in diesem Zusammenhang von einer Reduktion der Baukosten um bis zu 40% gegenüber herkömmlichen Bauweisen aus.¹⁴

Eine noch ambitioniertere Herangehensweise verfolgen die Unternehmen ICON oder Winsun, die schlüsselfertige (Klein-)häuser um \$10.000 oder weniger bauen möchten.¹⁵ Nicht ganz so optimistisch beziffert das deutsche Unternehmen PERI die Kosten für die additive Fertigung nach der Fertigstellung von Referenzprojekten. Demnach kostet ein Einfamilienhaus im 3D-Betondruck noch etwa gleich so viel wie jenes in herkömmlicher Massivbauweise. Je häufiger die Technologie jedoch eingesetzt wird, desto günstiger werden die Entwicklungskosten aufgrund von Skaleneffekten.¹⁶ So könnte ein weiteres Potenzial dieser Technologie hinsichtlich den Einsparungen bei den Herstellungskosten von Gebäuden bestehen. Vor allem sollen die möglichen Kostenvorteile der additive Fertigung im Rahmen dieser Masterthese empirisch analysiert werden.

1.2. Abriss der zentralen Forschungsfrage

Nach erfolgter Auseinandersetzung mit der Problemstellung bzw. der Forschungslücke, lässt sich die Forschungsfrage wie folgt definieren: „**Welche Kostenunterschiede können zwischen dem Verfahren der additiven Betonfertigung und der traditionellen Massivbauweise anhand des Beispiels eines Einfamilienhauses in Österreich festgestellt werden?**“

¹³ Vgl. 3d Natives, 2018, online.

¹⁴ Vgl. 3d Natives, 2017, online.

¹⁵ Vgl. All3dP, 2021, online.

¹⁶ Vgl. Süddeutsche Zeitung, 2021, online.

Dazu soll eine Vergleichsanalyse zwischen der Massivbauweise, und der Technologie der additiven Fertigung anhand der Herstellung eines Referenz-Einfamilienhauses durchgeführt werden. Im Rahmen dieser empirischen Analyse sollen Vor- und Nachteile hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit identifiziert und beschrieben werden.

1.3. Ziele und Struktur der Masterthese

Kapitel 1. beinhaltet eine Einleitung, die Motivation zur Masterarbeit und erläutert die Problemdefinition.

In Kapitel 2. werden Definitionen angeführt und Begriffe erklärt. Das Unterkapitel 2.1. widmet sich etwa der Kategorisierung von Bauweisen oder des Bauablaufs eines Einfamilienhauses. Die additive Fertigung und die dazu gehörenden Verfahren werden in Kapitel 2.2. näher dargelegt. Nach einer detaillierten Beschreibung der jeweiligen Vor- und Nachteile, wird evaluiert welche dieser Verfahrensmethoden am geeignetsten für den 3D-Druck von Einfamilienhäusern ist (Kapitel 2.3.) und welche Druckertypen am Markt verfügbar sind bzw. welche Projekte in der jüngsten Vergangenheit umgesetzt wurden (Kapitel 2.4.).

Kapitel 3. beschreibt die methodische Vorgangsweise und den konkreten Forschungsansatz. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einem Literatur- bzw. Desk-Research-Vergleich sowie einer Einzelfallstudie.

In Kapitel 4. wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zwischen der additiven Fertigung und der Massivbauweise durchgeführt. Dabei wird untersucht ob und in welcher Form Kostenvorteile gegenüber der herkömmlichen Massivbauweise bestehen.

Kapitel 5. stellt die Ergebnisse der Vergleichsanalyse dar. Die Auswertung erfolgt dabei auf Basis der Personalkosten, Materialkosten und Herstellungskosten. Im Anschluss daran wird eine Interpretation der gewonnen Erkenntnisse dargelegt.

Die jeweiligen Schlussfolgerungen werden schließlich in Kapitel 6. gezogen.

2. Begriffsdefinitionen und Hintergrundinformationen

Dieses Kapitel widmet sich der Erklärung von jene Begriffen, die häufig im Rahmen der Massivbauweise und der additiven Fertigungsverfahren verwendet werden. Ziel ist es, diese möglichst verständlich zu definieren, um ein fundiertes Basiswissen zu vermitteln. Zunächst wird auf die Massivbauweise eingegangen und die historischen Entwicklungen näher betrachtet. Nach den Erläuterungen zum Bauablauf eines Einfamilienhauses, werden additive Fertigungsverfahren allgemein sowie die vier bekanntesten Verfahrensmethoden im Detail beschrieben.

2.1. Massivbauweise

2.1.1. Definition / Ursprung / historische Entwicklung

Bevor die Massivbauweise im Detail behandelt wird, ist es zunächst wichtig einzelne Begriffe zu beschreiben und Grundlagen zu definieren.

„Für menschliche Bedürfnisse gebrauchstaugliche Behausungen wurden selbst in vorgeschichtlichen Zeiten nur sehr selten in der natürlichen Umgebung vorgefunden, sondern mussten zumeist in einem mehr oder weniger komplexen technischen Herstellungsprozess gefertigt werden. Zu diesem Zweck musste man geeignete Baumaterialien gewinnen, bearbeiten sowie daraus hergestellte Teile zu einem Gesamtgefüge zusammenbauen. Heutige Bauwerke werden – insbesondere angesichts der hohen Anforderungen, die gegenwärtig mit der Gebrauchstauglichkeit verknüpft werden – ohne Ausnahmen technisch hergestellt.“¹⁷

Im Allgemeinen können Bauwerke auf unterschiedliche Art und Weise, sogenannte Bauweisen, errichtet werden. Dabei ist zu beachten, dass sämtliche in den Bauprozess involvierte Personen (d.h. Bauherr, Bauingenieur, Architekt oder Jurist) den Begriff „Bauweise“ in unterschiedlichen Zusammenhängen verwenden oder gar unterschiedlich interpretieren.¹⁸ Laut den Ausführungen von Moro beschreibt der Begriff „Bauweise“ die „ausgewählten Eigenschaften [eines] Produkts, um sie gegenüber den übrigen Objekteigenschaften hervorzuheben. Bauweisen stellen anerkannte Optima für bestimmte Produktarten dar und repräsentieren den Stand der Technik in bestimmten Branchen.“¹⁹ Um diese anerkannten Optima zu erreichen, haben sich Bauweisen, vor allem die historischen und traditionellen, über sehr lange Zeiträume hinweg entwickelt. Es lässt sich daher schlussfolgern, dass Bauweisen

¹⁷ Moro, 2019, S. 2.

¹⁸ Vgl. Pech, Kolbitsch, & Zach, 2018, S. 123.

¹⁹ Vgl. Moro, 2019, S. 12.

einen langen Optimierungsprozess durchlaufen haben und im technischen, funktionalen und ästhetischen Sinne ideal auf die jeweils vorherrschenden Rahmenbedingungen zugeschnitten waren. Diese eben erwähnten Rahmenbedingungen umfassten:²⁰

- verfügbare Bautechniken
- verfügbare Produktionsmethoden
- verfügbare Materialien (oft lokal sehr unterschiedlich)
- vorhandene theoretische Kenntnisse (u.a. Erfahrungswerte, statistische Modelle oder Berechnungsmethoden)
- lokale Witterungseinflüsse
- kulturelle und gesellschaftliche Gegebenheiten, die Nutzung und Ausdruck des Bauwerks beeinflussen
- ästhetischer Gestaltungskodex

Traditionelle und historische Bauweisen hatten demnach über viele Jahrhunderte Zeit sich im Bewusstsein und in der Wahrnehmung der Menschen festzusetzen. Mit dem Aufkommen des industriellen Bauens haben sich zeitgemäße Bauweisen entwickelt, die zumindest aus technischer Sicht das heutige Baugeschehen dominieren. Im Speziellen haben hier die letzten 150 Jahre zu vielfältigen technischen Möglichkeiten und einem sprunghaften Anstieg der Anforderungen an Bauwerke geführt. Diese Anforderungen beziehen sich gleichsam auf Leistungswerte heutiger Baustrukturen, technische Komplexitätsgrade oder auch Ressourceneffizienz und Umweltverträglichkeit.²¹

2.1.2. Arten von Bauweisen

Dieses Kapitel soll die unterschiedlichen Arten von Bauweisen näher betrachten. Studiert man die jüngste Fachliteratur, ist festzustellen, dass die jeweiligen Autoren unterschiedliche oder abweichende Einteilungen hinsichtlich der Bauweisen wählen und keine durchgängig Konsistenz vorherrscht ist. So lassen sich Bauweisen etwa nach unterschiedlichen Kategorien (u.a. Material, Konstruktionsprinzip, Nutzungsarten) oder Eigenschaften (u.a. Gewicht, Fähigkeit der Lastenabtragung) unterscheiden. Da der Umfang dieser Masterarbeit begrenzt ist, wird auf weitere Details, die auf eine Einteilung von Bauweisen eingehen, verzichtet.

²⁰ Vgl. Moro, 2019, S. 12-13.

²¹ Ebd.

Zur Vereinfachung wird im Rahmen dieser Masterarbeit jene Einteilung gewählt, die in weiterer Folge geeignet erscheint. Gemäß Deplazes kann zwischen den beiden architekturtheoretischen Begriffen [1] Stereotomie (Massivbau) und [2] Tektonik (Filigranbau) unterschieden werden:²²

1. Der **Stereotomie** gehören alle Bautechniken des massiven Mauerbaus an, wie etwa der Lehm- oder Ziegel- und Steinmauerwerk, und die stereofonischen Formen wie Mauerscheibe, Bogen, Gewölbe und Kuppel. Ein Hauptmerkmal des Massivbaus ist, wie das Wort vermuten lässt, das Schwere und Kompakte dieser gegenüber dem Filigranbau so unterschiedlichen Bauweise. Das zentrale Element bildet hier ein massiver, dreidimensionaler Mauerkörper, der [a] durch das Aufschichten von Steinen, [b] vorgefertigten modularen Materialien oder [c] nach dem Gießen eines beim Trocknen verfestigenden Materials in einer Schalung entsteht. Das allgemeine Prinzip des Massivbaus kann dabei mit den beiden Techniken „Gießen“ und „Aufschichten“ umschrieben werden. Vielmehr zeigt sich, dass Massivbauten lediglich auf Druck belastbar sind und Zugkräfte – im Unterschied zum Filigranbau – nicht kompensieren können.
2. Die **Tektonik** umfasst als filigrane Dachwerke alle stab- und rutenförmigen Strukturen bzw. gewebeartige Flechtwerke, die als Raumüberspannungen den Raum vertikal begrenzen. Dazu zählen gleichsam der Holzbau als auch der industrielle Stahlbau, da die Prinzipien der Strukturbildung auf beide übertragen werden können. Konkrete Beispiele dafür sind Kegel- und Sphärenkuppeln aus geraden und gebogenen Stäben, oder horizontale Balkenlagen für Decken- und Dachkonstruktionen. Entsprechend besteht ein Filigranbau „aus einer feingliedrigen Struktur, einem Geflecht aus linearen, stab- oder rutenförmigen Elementen, die zu einem flächigen oder dreidimensionalen Gitterwerk gefügt werden.“²³ In Anlehnung an die textile Kunst beschreibt das tektonische Prinzip des Filigranbaus, das Weben, Knüpfen und Flechten als die ursprünglichsten handwerklichen Techniken des Menschen.
3. Bei einer Vermischung der Tektonik und Stereotomie spricht man auch von einem **Mischbau**.

²² Vgl. Deplazes, 2013, S. 13-14.

²³ Ebd.

Dieser theoretische Abriss soll dazu dienen den Begriff „Bauweise“ besser einzugrenzen und einen Überblick zu schaffen. Überaus interessant gestaltet sich dabei nun das Anwendungsgebiet der Stereotomie. Im Rahmen dieser Masterarbeit dient die Massivbauweise als Synonym für den Bau von Rohbauten mit Stahlbeton (d.h. gegossene Stahlbetonwände) und/oder Wandbauten mit Ortbeton ausgefüllten Mantelbetonsteinen. Diese Bauweise soll im Zuge dieser Arbeit anhand der Herstellung des Rohbaus eines Referenz-Einfamilienhauses analysiert werden.

2.1.3. Anwendungsgebiete in der Bauindustrie: Das Einfamilienhaus

Wie anhand der Forschungsfrage in Kapitel 1.2. ersichtlich soll die Analyse zwischen der additiven Fertigung und der Massivbauweise anhand eines Referenz-Einfamilienhauses durchgeführt werden. In der österreichischen Bauordnung entspricht dies Bauklasse I. Für eine thematischen Eingrenzung wird nun eine kurze Begriffsdefinition angeführt:

Ein Einfamilienhaus [...], ist ein Gebäude, das als Wohnhaus für eine Familie dient (allgemeiner: für eine überschaubare Gruppe von Menschen, die einen gemeinsamen Haushalt führen, wie Wohngemeinschaften oder Paare) und eine Wohneinheit enthält. Es gehört zu den Gebäuden mit nur einer „Nutzungseinheit“ – im Gegensatz zum Mehrfamilienwohnhaus.²⁴

Das Einfamilienhaus wurde vom Autor ausgewählt, da es sich bei dieser Bauweise um einen sehr häufigen Anwendungsfall in der Praxis handelt. So sind laut Statistik Austria zwei Drittel aller Gebäude in Österreich Einfamilienhäuser. Diese Feststellung entstammt zwar einer Registerzählung aus dem Jahr 2011, kann aber als valide betrachtet werden, um einen ungefähren Richtwert anzuführen.²⁵ Für eine repräsentative Beantwortung der Forschungsfrage erscheint die Analyse anhand eines Einfamilienhauses folglich als ideale Ausgangsbasis.

Ein weiterer Aspekt für die Umsetzung einer erfolgreichen Vergleichsanalyse besteht darin analoge Grundlagen zu schaffen. Da die additive Fertigung noch nicht in der Lage ist, sämtliche Prozessschritte in der Herstellung eines Einfamilienhauses abzudecken bzw. dies in naher Zukunft auch nicht realistisch erscheint, beschränkt sich die Analyse auf jene Prozessschritte, die in Bezug auf die additive Fertigung und die Massivbauweise überhaupt vergleichbar sind. Aus diesem Grund gilt es den Bauablauf eines Einfamilienhauses in möglichst voneinander unabhängige Abfolgen

²⁴ Wikipedia, 2021, online.

²⁵ Vgl. Statistik Austria, 2013, online.

zu unterteilen, um anschließend miteinander vergleichbare Grundlagen zu schaffen. Dazu hat Deplazes einzelne Prozessschritte definiert, die beim Bau eines Einfamilienhaus (nach der Massivbauweise) zu berücksichtigen sind:

Bauablauf	Prozessschritte
Vorbereitungsarbeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Baugrunduntersuchung • Räumungen, Terrainvorbereitungen • Gemeinsame Baustelleneinrichtung • Baugrube, Baugrubenaushub
Rohbau 1	<ul style="list-style-type: none"> • Baumeisterarbeiten (Gerüste, Kanalisationen Gebäude, Beton-, Stahlbetonarbeiten, Mauerarbeiten) • Montagebau in Beton / Stahl / Holz
Rohbau 2	<ul style="list-style-type: none"> • Fenster, Außentüren, Tore • Spenglerarbeiten • Bedachungsarbeiten • spezielle Dichtungen und Dämmungen • Fassadenputze • äußere Oberflächenbehandlungen • Sonnenschutz, äußere Abschlüsse
Medien / Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Elektroanlagen • Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage • Sanitäranlagen • Transportanlagen (Lifte)
Ausbau 1	<ul style="list-style-type: none"> • Gipserarbeiten • Metallbauarbeiten • Schreinerarbeiten
Ausbau 2	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenbeläge • Wandbeläge • Deckenbeläge • Innere Oberflächenbehandlung • Bauaustrocknung

	<ul style="list-style-type: none"> • Baureinigung
Umgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Terraingestaltungen • Roh- und Ausbauarbeiten (Kanalisationen Umgebung, Geländemauern, Belagsarbeiten) • Gartenanlagen (Gärtnerarbeiten, Einfriedungen, Ausstattungen, Geräte)

Tabelle 2: Bauablauf eines Einfamilienhaus nach Massivbauweise inklusive einzelner Prozessschritte

Tabelle 2 zeigt in der linken Spalte die wichtigsten Elemente unterhalb des Bauablaufes, die von der Vorbereitung bis hin zur Fertigstellung und Umgebungsarbeiten reichen. In der rechten Spalte wird der Bauablauf nochmals konkretisiert und die einzelnen Prozessschritte beschrieben, die in weiterer Folge wichtig für die Beantwortung der Forschungsfrage sind. Vor allem die Bauabläufe „Vorbereitungsarbeiten“ und „Rohbau 1“ erscheinen besonders interessant für die Vergleichsanalyse. Die eben erwähnten Prozessschritte werden in Kapitel 3.1. erneut aufgegriffen. Als nächstes widmet sich der Autor nun der additiven Fertigung.

2.2. Additive Fertigung und Verfahrensmethoden

2.2.1. Definition / Ursprung / historische Entwicklung

Bevor auf die unterschiedlichen Verfahrenstypen der additiven Fertigung eingegangen wird, ist es notwendig einzelne Begriffe zu definieren. Bei der „Additiven Fertigung“ handelt es sich um

„Fertigungsverfahren, bei denen das Bauteil (...) durch Hinzufügen von Volumenelementen oder Schichten direkt aus digitalen 3D-Daten automatisiert aufgebaut wird oder auf einem bestehenden Werkstück weitere Volumenelemente aufgebaut werden. Wesentliches Merkmal aller Verfahren ist der Entfall produktspezifischer Werkzeuge und Vorbereitungen („werkzeuglose Fertigung“).“²⁶

Der große Vorteil gegenüber der Massenproduktion besteht in diesem Zusammenhang darin, Werkstücke hoher Komplexität in kleinen Stückzahlen fertigen zu können.²⁷ Heutzutage hat sich der Begriff „3D-Druck“ als Synonym für die additive Fertigung im Sprachgebrauch durchgesetzt. Die historische Entwicklung des 3D-Drucks lässt sich bis ins Jahr 1984 zurückverfolgen, als die 3D-Druck-Technologie namens Stereolithografie erfunden wurde und zwei Jahre später mit einem Patent in

²⁶ Kumke, 2018, S. 25.

²⁷ Vgl. Lowke, et al., 2015, S. 3.

den Vereinigten Staaten von Amerika geschützt wurde. Seither haben sich die additiven Fertigungsverfahren weiterentwickelt und in vielen Bereichen der Produktionsindustrie neben konventionellen Herstellungsverfahren etabliert. Diese neuartige Fertigungsmethode ist dadurch zu einem zentralen Bestandteil der modernen Produktherstellung geworden und die Technologie wurde in jenem Maße kommerzialisiert, als dass 3D-Drucker jetzt auch für den Heimgebrauch verfügbar sind.²⁸ Hinsichtlich des tatsächlichen „Druckens“ verfolgt die additive Fertigung dabei recht einheitliche Verfahrensschritte, die in Abbildung 3 dargestellt sind.

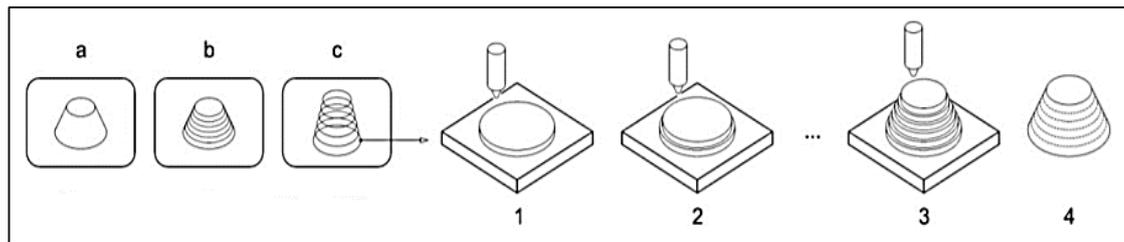


Abbildung 3: Standardisierter Ablauf in der additiven Fertigung

Um besser zu verstehen, wie sich die konkrete Abläufe im 3D-Druck gestalten, werden die einzelnen Verfahrensschritte gemäß Lowke et al. näher betrachtet²⁹:

- (a) Verwendung eines digitalen Modells des zu druckenden Festkörpers
- (b) Virtuelle Aufteilung des Objektes in Schichten gleicher Stärke („slicing“)
- (c) Ableitung ebener Geometrien aus den Schichtvolumina und Übergabe der einzelnen Schichtinformationen an die Maschine
- (1) Fertigung der ersten (Filament-)Schicht
- (2) Fertigung der zweiten (Filament-)Schicht
- (3) Fertigung der letzten (Filament-)Schicht
- (4) Fertigung Festkörper nach eventuellen Nachbearbeitungen

In der Bauindustrie hingegen hat dieser technologische Fortschritt erst verzögert eingesetzt. Erste Forschungsarbeiten zeigten früh die grundsätzliche Machbarkeit sowie das große Potential der additiven Fertigung im Bauwesen. Das erste 3D-Druck-Verfahren im Betonbau wurde im Jahr 1997 von Pegna skizziert und 2004 weiter vorangetrieben, als Khoshnevis ein 3D-Druckverfahren namens Contour Crafting entwickelte. In unmittelbarer zeitlicher Nähe konstruierte der italienische Ingenieur und Erfinder Enrico Dini die sogenannte D-Shape Technologie.³⁰ Für die Einführung

²⁸ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 275.

²⁹ Vgl. Lowke, et al., 2015, S. 3.

³⁰ Vgl. Vasilic, 2020, S. 1006.

einer nahtlosen, digital gesteuerten Wertschöpfungskette im Bauwesen ist es notwendig, dass die bereits vorhandenen Werkzeuge der digitalen Planung durch die bisher fehlende digitale Fertigung zu einem kompletten System vervollständigt werden.³¹

Allein im Jahr 2018 waren mehr als 30 Gruppen weltweit an der Forschung von großvolumigen 3D-Druck-Verfahren tätig, wie in der Abbildung 4 unterhalb ersichtlich ist.³²

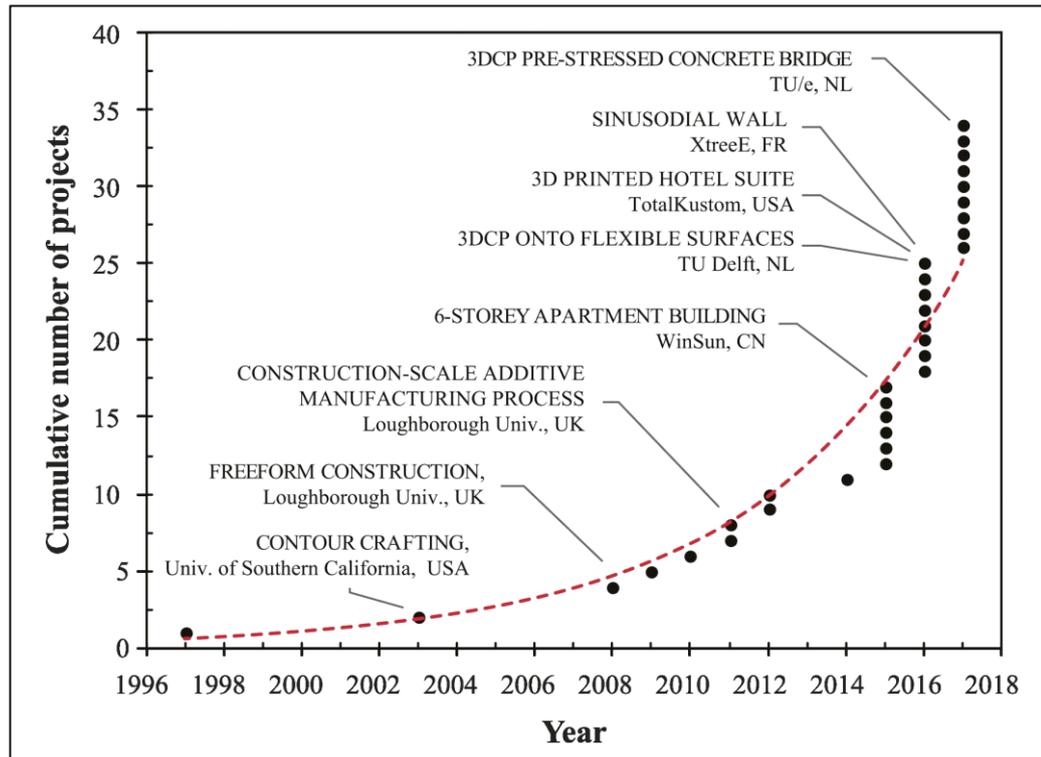


Abbildung 4: Forschungstätigkeiten von großvolumigen 3D-Druck-Verfahren seit 1996 weltweit

Diese Forschungs- und Innovationstätigkeiten wurden in den letzten 5 Jahren nochmals intensiviert, wodurch mittlerweile fast weltweit an unterschiedlichsten 3D-Druck-Verfahren für Beton gearbeitet wird. Umso schwieriger ist daher die Einordnung der unterschiedlichen technologischen Ansätze. Im Rahmen dieser Masterarbeit sollen nicht alle Verfahren und Technologien behandelt werden, sondern vielmehr jene, die gemäß Literatur am häufigsten in Verwendung sind oder den höchsten Entwicklungsstand aufweisen.

³¹ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 275.

³² Vgl. Buswell et al., 2018, S. 37.

Die nachfolgende Kategorisierung in Kapitel 2.2.2. basiert vor allem auf den Einteilungen von Mechtcherine & Nerella³³, Vasilic³⁴ und Xia et al³⁵, gibt einen Überblick über die relevantesten Verfahren und benennt die wichtigsten Stakeholder.

2.2.2. Verfahrensmethoden

Das Bauen mit Beton ist die weltweit mit Abstand am weitesten verbreitete Bauweise mit einem Materialumsatz von mehreren Milliarden m³ pro Jahr. Die aktuelle Arbeitsweise im Betonbau ist von einem hohen manuellen Aufwand und gleichzeitig geringen Möglichkeiten der Automatisierung gekennzeichnet. Das Verbesserungspotential durch die Weiterentwicklungen von Technologien und der damit verbundenen Steigerung der Produktivität ist laut Ansicht vieler Experten immens. Diese Potentiale umfassen unter anderem:³⁶

- die Senkung der Herstellungskosten
- die Verkürzung des Bauprozesses im Hinblick auf eine steigende Komplexität und Individualität der Bauteile oder der Bauwerke
- die Erhöhung der Gestaltungsmöglichkeiten der Bauteilgeometrie und Entwicklung neuer architektonischer Formen
- die hohe Flexibilität des Bauprozesses selbst

Die Hauptprobleme in der Bauindustrie sind, wie bereits in Kapitel 1.1. beschrieben, die Stagnation bzw. der Rückgang der Produktivität oder die Umweltbelastung, die durch den enormen Materialbedarf und den damit verbundenen hohen CO₂-Ausstoß entstehen.³⁷ Additive Verfahren im Betonbau könnten entscheidend zur Überwindung unterschiedlichster Problemstellungen und Herausforderungen beitragen. Darunter fallen laut Mechtcherine & Nerella [1] der Mangel an qualifizierten Bauarbeitern, auch in Ländern in denen Arbeitskräfte in Fülle zur Verfügung stehen, oder [2] die Knappheit der Ressourcen an Ausgangsstoffen. Beispielsweise könnte durch die additive Betonfertigung auf Schalungen und deren Entsorgung verzichtet oder Abfälle gänzlich vermieden werden. Des Weiteren bietet die Technologie auch die

³³ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018.

³⁴ Vgl. Vasilic, 2020.

³⁵ Vgl. Xia, et al., 2021.

³⁶ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 275 f.

³⁷ Vgl. Vasilic, 2020, S. 1009.

Möglichkeit [3] in schwer zugänglichen bzw. gefährlichen Bereichen oder weit entlegenen Gegenden zu arbeiten.³⁸

Das technologische und wirtschaftliche Potenzial des digitalen Betonbaus mittels 3D-Druck-Verfahren wurde inzwischen von vielen Personen im Bausektor erkannt. Der Umfang von Innovationsaktivitäten auf diesem Gebiet steigt von Monat zu Monat rasant an. So werden 3D-Druck-Verfahren bereits erfolgreich zur Fertigung einiger Komponenten im Rahmen von Pilotprojekten eingesetzt und hinsichtlich der Praxiseignung evaluiert.³⁹

Exkurs: Beton

Bevor nun auf die einzelnen Verfahren näher eingegangen wird, erfolgt noch ein kurzer Abschnitt zu dem in weiterer Folge oftmals als „Betongemisch“, „Mitur“ oder „Mörtel“ bezeichneten Materials, das in den 3D-Druck-Verfahren eingesetzt wird. Eine der größten Herausforderungen ist es, ein geeignetes Druckmaterial zu entwickeln das sämtliche Ansprüche für den Einsatz im 3D-Drucker erfüllt. Dabei muss einerseits die Kompatibilität mit dem jeweiligen 3D-Drucker gewährleistet sein, andererseits auch Mindeststandards hinsichtlich der Materialeigenschaften erfüllt werden. Eine Vielzahl von Studien, die in den letzten Jahren veröffentlicht wurden, hatten zum Inhalt, den Einfluss verschiedenster Materialien auf die Leistungssteigerung des Betons zu untersuchen.⁴⁰ Malaeb et al. haben diese unterschiedlichen Studien analysiert und im Anschluss daran einen eigenen Feldversuch gestartet. Die Zielsetzungen des optimalen Betongemisches haben sie wie folgt definiert:⁴¹

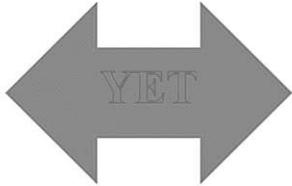
Maximize compressive strength		Maximize workability
Maximize flowability in the system Maximize speed of concrete setting		Maximize buildability upon pouring Maintain appropriate setting rate so as to ensure bonding with the subsequent layer

Abbildung 5: Zielsetzungen für ein optimales Betongemisch

³⁸ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 275-276.

³⁹ Ebd.

⁴⁰ Vgl. Malaeb, AlSakka, & Hamzeh, 2019, S. 116-118.

⁴¹ Ebd.

In Abbildung 5 werden Ziele angeführt, die aus technischer Sicht miteinander konkurrieren, jedoch alle berücksichtigt werden müssen. Die große Herausforderung liegt darin, ein Gleichgewicht zwischen diesen verschiedenen Zielen herzustellen, um die optimale Betonmischung zu erhalten. Als Beispiel ist die Kompressionsstärke zu erwähnen, die prinzipiell maximiert werden soll. Diese Maximierung der Kompressionsstärke in einer optimalen Betonmischung bedeutet dabei die Minimierung des Wasser-Zement-Verhältnisses. Es muss jedoch ein angemessener Wassergehalt in der Mischung eingehalten werden, um eine geeignete Verarbeitbarkeit des Betons zu gewährleisten. Des Weiteren sollte die Mischung im gesamten 3D-Druck-System fließfähig, beim Extrudieren jedoch so weit stabil sein, um sich selbst und jede weitere Filamentschicht zu tragen – dabei so schnell wie möglich verarbeitbar sein, aber langsam genug aushärten, um die Haftung mit der nachfolgenden Schicht sicherzustellen.⁴²

Um all diese Ziele miteinander zu vereinen, wird die optimale Betonmischung anhand von fünf Parametern beurteilt:⁴³

- Extrudierbarkeit (eng. extrudability)
- Fließfähigkeit (eng. flowability)
- Bebaubarkeit (eng. buildability)
- Kompressionsstärke. (eng. compressive strength)
- Verwertungszeit (eng. open time)

Sowohl die Extrudierbarkeit als auch die Fließfähigkeit dienen dazu eine leicht fließfähige Paste von der Quelle (konkret des Mischgerätes) bis zur Extrusionsdüse herzustellen. Die Bebaubarkeit bezieht sich auf die Fähigkeit der Betonschicht, die nachfolgenden Filamentschichten zu tragen, ohne dabei unter dem Eigengewicht einzubrechen. Zudem muss der Beton auch eine angemessene Kompressionsstärke bzw. Druckfestigkeit aufweisen, um gesetzlichen Anforderungen zu entsprechen. Schließlich wird über die Verwertungszeit die Dauer der Fließfähigkeit des Betons untersucht. Ziel ist es sicherzustellen, dass jede gedruckte Filamentschicht die Fähigkeit besitzt, sich selbst zu tragen und beim Betongießen auszuhärten, und dennoch flüssig genug zu bleiben, um sich mit der darüber liegenden Schicht zu verbinden und eine stabile Verbindung zu erzeugen.⁴⁴

⁴² Vgl. Malaeb, AISakka, & Hamzeh, 2019.

⁴³ Vgl. Malaeb, 2015, S. 14-22.

⁴⁴ Ebd.

Nach unterschiedlichen Feldversuchen mit verschiedensten Mixturen definieren Malaeb et al. das optimale Betongemisch wie folgt:

“This [optimal] mix consists of 125g cement, 80g sand and 160g fine aggregates with w/c ratio (water/cement) of 0.39. In addition, the mix included 1 mL of accelerator⁴⁵ and 0.625 mL of retarder⁴⁶. The concrete exhibited a compressive strength equal to 42 MPa. The final mix obtained proves to be of appropriate strength in addition to satisfying the extrudability, flowability, and buildability requirements.”⁴⁷

Dieses optimale Betongemisch birgt jedoch das Risiko bei abweichenden Verfahrensmethoden weniger kompatibel zu sein. Es ist davon auszugehen, dass bei sich unterscheidenden additiven Fertigungsverfahren oder Druckertypen auch unterschiedliche Betonmischungen eingesetzt werden müssen. Das oberhalb angeführte Beispiel soll lediglich als Referenzbeispiel dienen.

Im Anschluss werden jene Fertigungsverfahren beschrieben, die gemäß Literatur am fortschrittlichsten sind bzw. den höchsten Entwicklungsstand aufweisen. Buswell et al. haben im August 2020 ein umfassendes Klassifizierungssystem entwickelt, das im Umfang dieser Arbeit nicht abgedeckt werden kann.⁴⁸

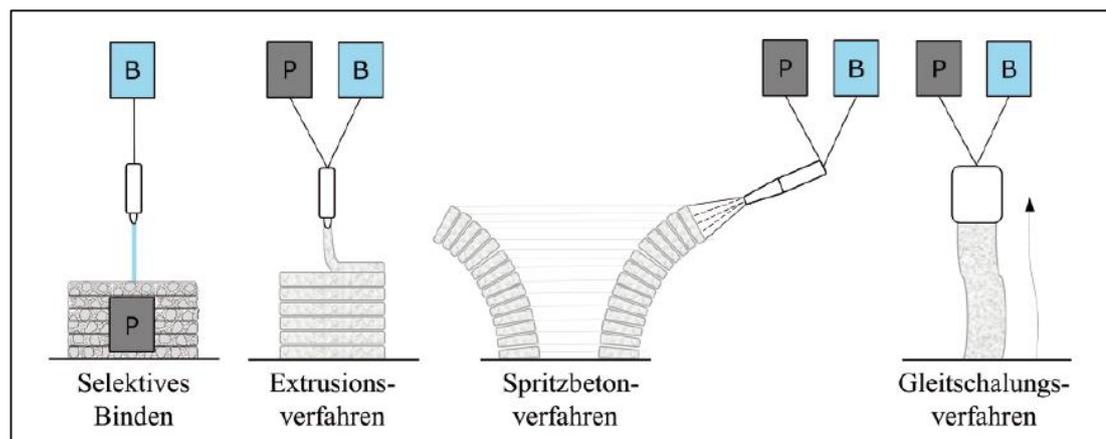


Abbildung 6: Vier Hauptgruppen der additiven Fertigung („P“ steht für Partikel und „B“ für Binder)

Um eine Klassifizierung zu vereinfachen, können mit dem heutigen Stand vier Gruppen unterschieden werden: [1] das Selektive Binden, [2] die Extrusion, [3] das Spritzbetonverfahren und [4] das Gleitschalungsverfahren.

⁴⁵ eng. accelerator, dt. Übersetzung: Trocknungsbeschleuniger.

⁴⁶ eng. retarder, dt. Übersetzung: Trocknungsverzögerer.

⁴⁷ Malaeb, AISakka, & Hamzeh, 2019, S. 134.

⁴⁸ Vgl. Buswell, et al., 2020, S. 1 ff.

Selektives Binden

Bei dem Verfahren des selektiven Bindens (auch als Partikelbett-3D-Drucken bezeichnet) wird ein Fluid kontrolliert in ein Partikelbett eingebracht. Dabei wird ein schüttbares, trockenes Material zuerst als dünne Schicht auf einer Plattform (ein sogenanntes Partikelbett) angebracht und anschließend ein Bindemittel an vordefinierte Koordinaten angeliefert. Danach wird eine zusätzliche Schicht von trockenem Material aufgeschüttet und ein weiteres Mal mit einem Bindemittel vermischt. Der Prozess wird laufend wiederholt und so entsteht schließlich Schicht für Schicht des zuvor am Computer modellierten Bauteils. Nach Fertigstellung wird überschüssiges Trockenmaterial entfernt und es verbleibt der Festkörper. Es dauert etwa 24 Stunden, bis der Erstarrungsprozess abgeschlossen ist.⁴⁹

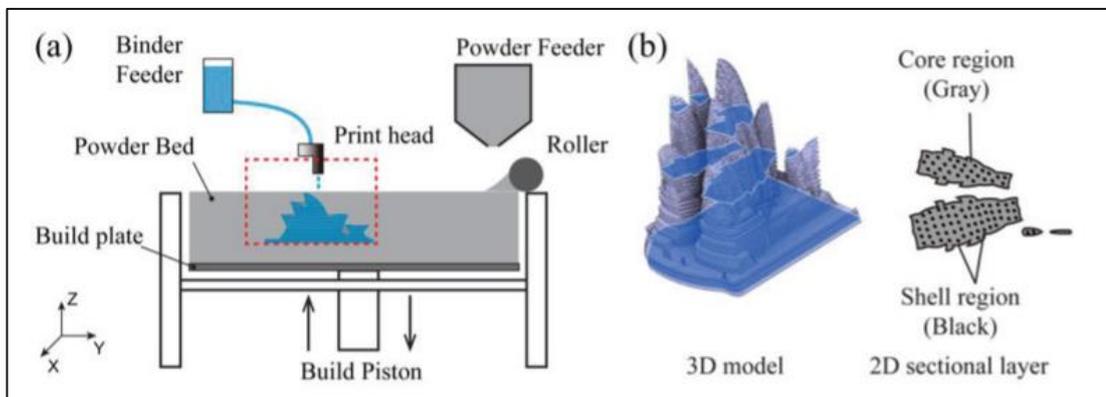


Abbildung 7: Ablauf des Verfahrens des selektiven Bindens. (a) zeigt schematisch das schichtweise Einbringen eines Bindemittels in das Partikelbett zu vordefinierten Koordinaten, (b) veranschaulicht wie einzelne 2D-Schichten zu einem 3D-Modell zusammengefügt werden mittels selektiven Bindens

Der Begriff „selektiv“ bedeutet, dass das schüttbare Trockenmaterial einzig an jenen Stellen verfestigt wird, an denen auch ein Bindemittel zugeführt wird. Es wird daher von selektiven Druckorten gemäß eines Druckplanes gesprochen.⁵⁰ Ziel dieser Verfahrensart ist es durch eine Optimierung der Zusammensetzung des trockenen Materials eine möglichst hohe Genauigkeit des Drucks bei gleichzeitig hoher Eindringtiefe des Wassers, sowie einer starken Verbundwirkung der einzelnen Schichten zu erreichen. Im Hinblick auf die Betonzusammensetzung ist auch hier das Wasser-Zement-Verhältnis entscheidend.⁵¹ Das bekannteste auf dem selektiven

⁴⁹ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 277-278.

⁵⁰ Ebd.

⁵¹ Vgl. Lowke, et al., 2015, S. 4.

Binden basierendes Verfahren ist das sogenannte D-Shape-Verfahren, das 2007 erstmalig angewendet wurde.⁵²



Abbildung 8: Darstellung zeigt einen werksbasierten Partikelbett-Drucker der Festkörper in einer Abmessung von 6 x 6 x 6 m auf Basis des D-Shape-Verfahrens drucken kann

Extrusionsverfahren

Bei dieser Verfahrensmethode wird ein vorgemischtes Material durch ein Düse bei vordefinierten Druckraten an spezifizierten Koordinaten extrudiert.⁵³ Buswell et al. beschreiben dieses Verfahren wie folgt:

“Over half the processes under development employ extrusion, typically a small (6 mm to 50 mm diameter) continuous filament, pumped through a nozzle often mounted on a gantry or robotic arm that positions the material during the build process. The material is typically a high cement content mortar, with a maximum particle size in the order of 2 mm to 3 mm, although larger aggregates have been used. The shape of the extrusion varies and is either circular, ovular or rectangular and linear rates of extrusion are in the range of 50 mm/s to 500 mm/s.”⁵⁴

Der Begriff Extrusion ist grundsätzlich im weiteren Sinn zu verstehen. Damit gemeint ist, dass neben der eigentlichen Extrusion bei der die Form des gedruckten Materials

⁵² Vgl. Vasilic, 2020, S. 1007.

⁵³ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 277.

⁵⁴ Buswell, Leal de Silva, Jones, & Dirrenberger, 2018, S. 37.

(sog. Filamentform) hauptsächlich durch die Düsenöffnung geprägt ist, dieser Gruppe auch Verfahren zugerechnet werden, bei denen weiche Frischbetone aus der Düse lediglich herausfließen. Durch dieses „Zerfließen“ des Materials und unter Einwirkung des Eigengewichtes entstehen folglich von der Düsenform abweichende Filamentformen. Der Druckablauf wird so weit optimiert, dass die Materialablage kontinuierlich und möglichst gleichmäßig ohne Unterbrechungen erfolgt. Auf diese Weise entsteht keine einheitliche geometrische Form mit (scharfen) Ecken und Kanten, vielmehr ist diese durch Breite und Höhe des abgelegten Filaments bestimmt. Der vertikale Aufbau erfolgt durch die Überlagerung der zunehmenden Anzahl von Filamentschichten. Für die Formstabilität und Maßgenauigkeit sind dabei vor allem die rheologischen Eigenschaften, das heißt das Verformungs- und Fließverhalten des gedruckten Frischbetons, sowie die Gleichmäßigkeit des Materialflusses entscheidend. Höhenabweichungen der einzelnen Filamentschichten können hingegen zu einer schlechten Verbundwirkung führen.⁵⁵

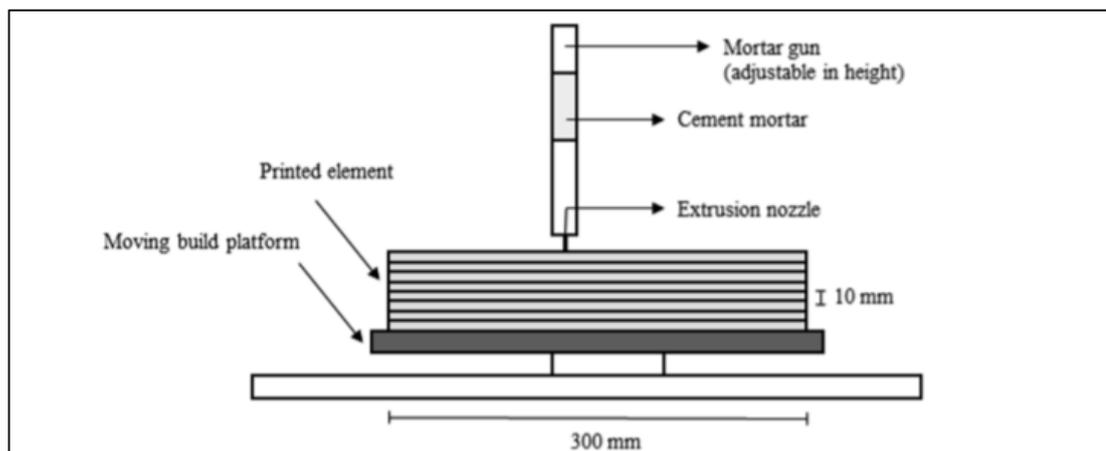


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Extrusionsverfahrens. Einzelne Filamentschichten werden mittels Extrusionsdüse (Extrusion nozzle) übereinander gedruckt. Die Einspeisung der Betonmischung erfolgt dabei über einen direkten Anschluss (cement mortar / mortar gun). Des Weiteren wird eine sich bewegende Plattform gezeigt (moving build platform) und eine fest fixierte Extrusionsdüse. Diese Methode ist für kleinere Festbauteile geeignet, bei größeren Projekten wird eine bewegliche Extrusionsdüse verwendet.

Mit abnehmender Breite und Höhe der Filamentschicht steigt zwar einerseits die Genauigkeit, die Komplexität und die Präzision des Drucks, andererseits verringert sich dadurch die Produktivität. Die Wahl des Herstellungsverfahrens kann also die Gestaltung der Bauteilgeometrie vorab limitieren.⁵⁶ Positiv zu erwähnen sind die Möglichkeiten der Extrusionsverfahren hinsichtlich der vielfältigen

⁵⁵ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 277-280.

⁵⁶ Ebd.

Gestaltungsmöglichkeit von Bauelementen sowie der Integration von Bewehrungen⁵⁷ während des Druckes.⁵⁸

*“Bereits diese kurze Aufzählung der wesentlichen, mit der Filamentfeinheit zusammenhängenden Gesichtspunkten verdeutlicht, dass es **kein universales Betondruckverfahren geben kann**, das für jegliche Aufgabenstellung im gleichen Maße optimal geeignet wäre. Daher ist zu erwarten, dass sich künftig mehrere auf Extrusion basierende 3D-Druckverfahren im Betonbau etablieren werden.”⁵⁹*

Die unterschiedlichen Verfahren reichen dabei je nach Detailgrad von einem „Filigrandruck“ bis hin zu einem „Massivbaudruck“, und unterscheiden sich vorrangig hinsichtlich der Größe des extrudierten Material sowie der Gesteinskörnung im Betongemisch. Die wichtigsten Forschungsprojekte der vergangenen Jahre sind hier auszugsweise angeführt und mittels Abbildungen veranschaulicht:

1. **Feinfilamentablage:** Fused Filament Fabrication (Universität Loughborough)⁶⁰

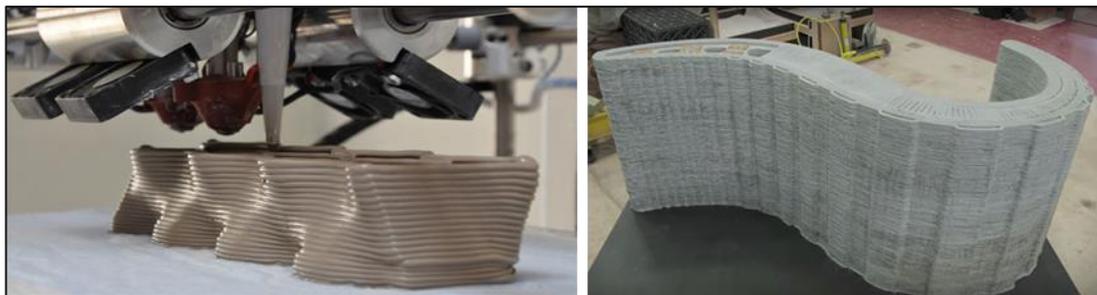


Abbildung 10: Darstellung zeigt Feldversuche einer Feinfilamentablage

2. **Mittelfilamentablage:** Contour-Crafting (Spin-Off: University of Southern California; nimmt eine Art Pionierrolle hinsichtlich der Verwendung von extrusionsbasierten 3D-Druckverfahren ein)⁶¹

⁵⁷ Definition: Bewehrung oder Armierung bezeichnet die Verstärkung von Betonbauteilen zur Erhöhung der Tragfähigkeit. Dabei handelt es sich um einen Verbundwerkstoff. Die bekannteste Anwendung ist der im Stahlbeton eingegossene Armierungs- oder Bewehrungsstahl (Quelle: Wikipedia).

⁵⁸ Vgl. De Schutter, et al., 2018, S. 28

⁵⁹ Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 280.

⁶⁰ Vgl. Loughborough University, 2021, online.

⁶¹ Vgl. Contour Crafting Corporation, 2021, online.



Abbildung 11: Darstellung zeigt Feldversuche einer Mittelfilamentablage

3. Grobfilamentablage: CONPrint3D (Technische Universität Dresden)⁶²



Abbildung 12: Darstellung zeigt Feldversuche einer Grobfilamentablage (u.a. CONPrint3D-Verfahren)

In Kapitel 2.4. wird näher auf aktuelle Forschungs- und Pilotprojekte eingegangen und der derzeitige Wissensstand diesbezüglich dargelegt.

Spritzbetonverfahren

Bei dieser Gruppe erfolgt ein schichtweiser Aufbau ebenfalls durch einen mittels Düse geförderten Beton. Anders als bei Extrusionsverfahren findet beim Düsenaustritt eine energiereiche Verdichtung statt, die sowohl durch Vibration oder Spritzen sichergestellt wird und zu einer guten Verbundwirkung zwischen den einzelnen Filamentschichten führt. Im Zuge dieses Verfahrens können auch Betonmischungen verwendet werden, die für Extrusionsverfahren ungeeignet sind, wie jene mit einer Gesteinskörnung von ca. 20 mm. Als weiteren Vorteil bietet das Spritzbetonverfahren neben vertikalen auch erweiterte Optionen hinsichtlich des horizontalen Materialflusses.⁶³ Damit gemeint vor allem die Variation des Auftragungswinkels der

⁶² Vgl. Technische Universität Dresden, 2016, online.

⁶³ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 279.

Düse im Fertigungsprozess, wodurch eine größere geometrische Freiheit des Bauteils ermöglicht wird.⁶⁴

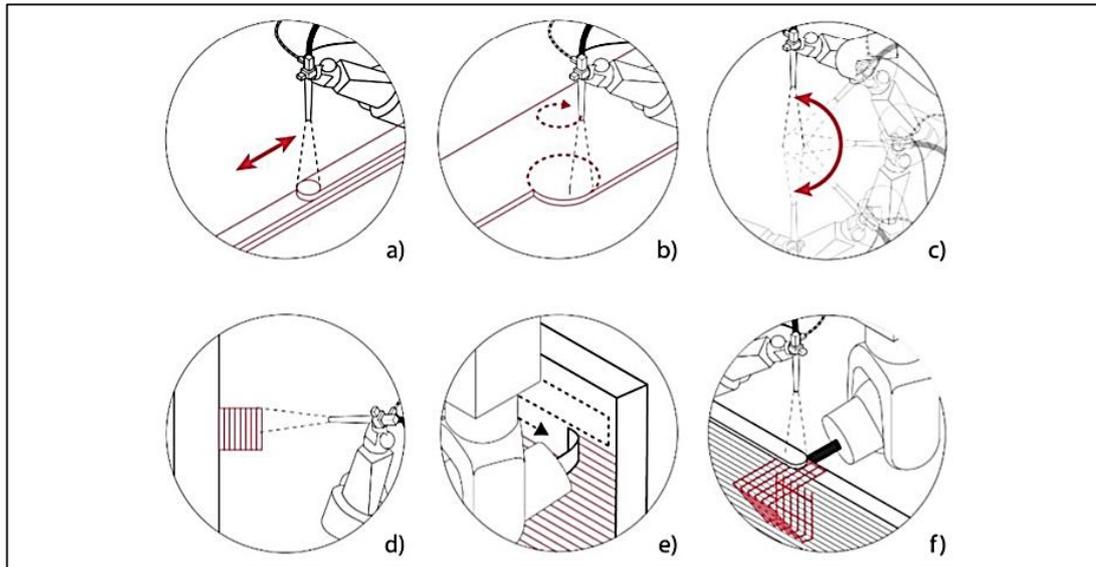


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Spritzbetonverfahrens. (a) Stellt den schichtweisen Aufbau der Filamentschichten dar und (b) zeigt auch die horizontale Verbundwirkung; (c) der Roboterarm kann ein Spritzwinkel von 0° bis 180° variieren und (d) überhängende Bauelemente sprühen bzw. drucken; (e) verdeutlicht notwendige Nachbearbeitungsprozesse, z.B. glatt streichen mit einer extra Applikation; (f) zeigt die Bewehrung mittels Eisen- oder Stahlelementen

Als Beispiel für dieses Verfahren kann das robotergesteuerte Shotcrete-3D-Printig-Verfahren genannt werden, das an der TU Braunschweig entwickelt wurde. Diese Technologie führt die Grundprinzipien der Spritzbetonverfahren mit den Möglichkeiten der robotergestützten additiven Fertigung zusammen.⁶⁵

⁶⁴ Vgl. Vasilic, 2020, S. 1008.

⁶⁵ Ebd.

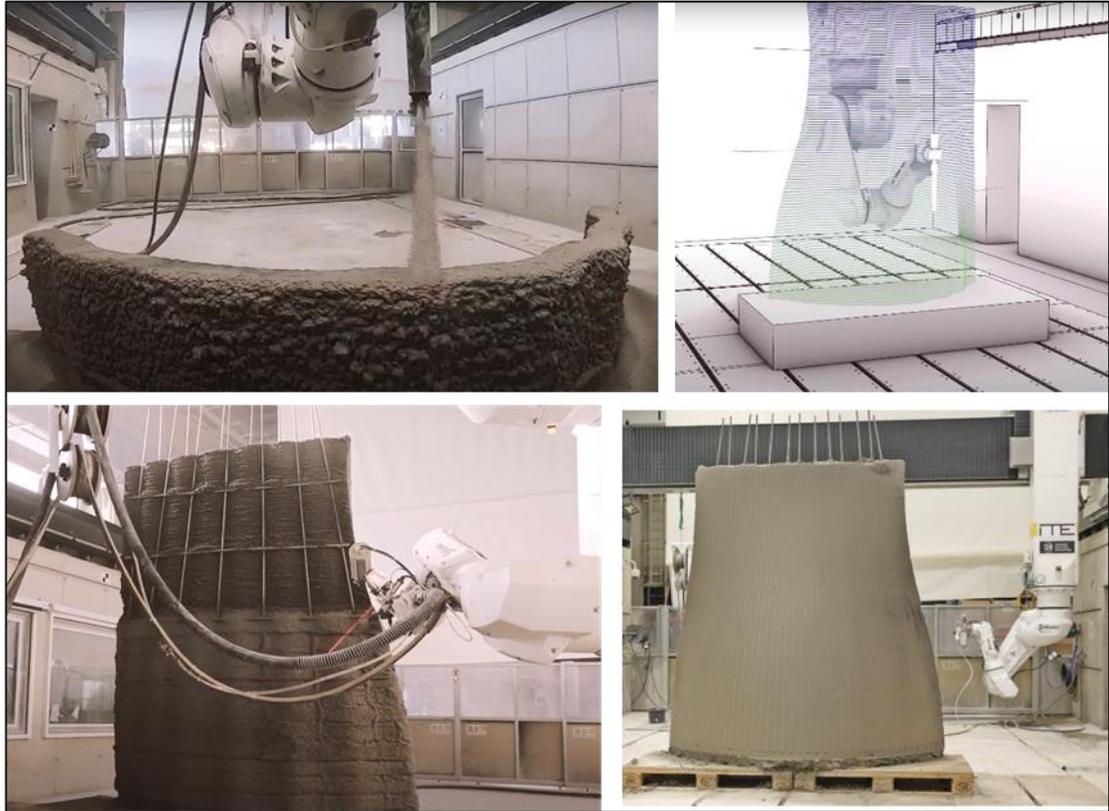


Abbildung 14: Darstellung zeigt die Produktion eines Prototypen nach dem Shotcrete-3D-Printing-Verfahren inklusive einer Eisenbewehrung

Unerlässlich für dieses Verfahren sind gewisse Hilfsmaßnahmen zur Sicherung der genauen Materialplatzierung wie etwa die Verwendung von seitlichen Abschirmungen oder eine kontinuierliche Erfassung der geometrischen Daten der erzeugten Schichten während des Drucks, um die Anpassung der Druckkopfsteuerung zu ermöglichen.⁶⁶

Gleitschalungsverfahren

Die bisher beschriebenen additiven Verfahren finden vorrangig in der Erzeugung von Wandelementen Verwendung und ermöglichen ein großes Potenzial für Kostenreduktionen und Effizienzen im Herstellungsprozess. Bei der Produktion von Stützen, Säulen und anderen Bauelementen mit kleinerem Querschnitt und großer vertikaler Ausdehnung sind diese bisher beschriebenen Verfahren zwar ebenfalls geeignet, jedoch kann die Umsetzung mittels Gleitschalungsverfahren nach heutigem Stand effizienter erfolgen. In der Bauindustrie sind derartige Verfahren grundsätzlich nicht unbekannt, jedoch ist der Ansatz einer Herstellung von Bauelementen mit computergesteuerter adaptiver Geometrie und ebenfalls computergesteuerten

⁶⁶ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 279.

komplexen Bewegungsabläufen neuartig in der Betrachtung.⁶⁷ Diese robotergesteuerte adaptive Gleitschalungsverfahrensmethode wurde an der ETH Zürich entwickelt und wird als „Smart Dynamic Casting“ bezeichnet.⁶⁸

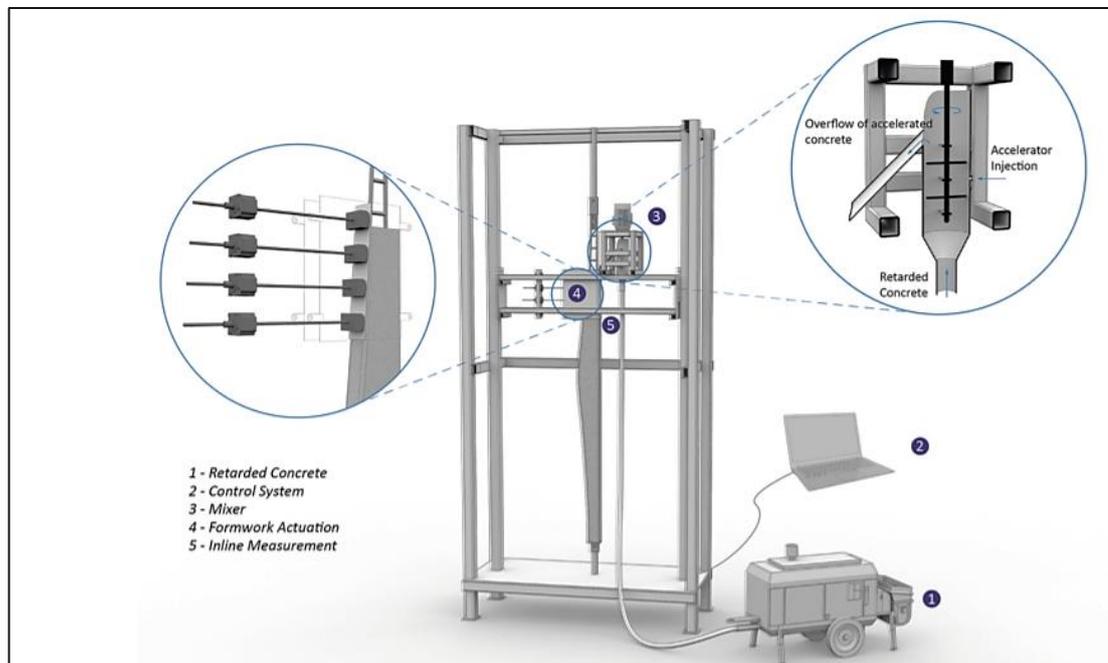


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Gleitschalungsverfahrens. Es zeigt dabei das Fördergerät der Betonmischung (Retarded concrete), die computergestützte Steuerung (Control system) sowie die Vermengung mit weiteren Zusatzstoffen (Mixer); des Weiteren wird die Schalung im Detail gezeigt (Formwork Actuation) und die Vermessung des gedruckten Bauteils (Inline Measurement)

Im Zuge des Druckprozesses wird ein Schalungssegment kontinuierlich mit Beton befüllt und vertikal bewegt. Der Beton befindet sich dabei bei der Befüllung in einem weichen formbaren Zustand und härtet schnell aus, um Formstabilität zu gewährleisten. Die Geschwindigkeit der vertikalen Schalungsbewegung ist dabei auf den Aushärtungsprozess angepasst. Bisher kam dieses Verfahren hauptsächlich bei der automatisierten Herstellung von materialoptimierten, tragenden Betonstützen zum Einsatz.⁶⁹

⁶⁷ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 279.

⁶⁸ Vgl. ETH Zürich, 2021, online.

⁶⁹ Ebd.



Abbildung 16: Eisenbewehrungen im „Smart Dynamic Casting“-Verfahren



Abbildung 17: „Smart Dynamic Casting“-Verfahren im Detail 1; links: Schalung inklusive der Eisenbewehrung, rechts: Befüllen der Schalung mit der Frischbetonmischung.



Abbildung 18: „Smart Dynamic Casting“-Verfahren im Detail 2; links: Schrittweises vertikales Drucken des Bauteils, rechts: Fertiges Bauteil (Stützpfeiler)



Abbildung 19: Das fertige Bauprojekt mit im „Smart Dynamic Casting“-Verfahren erzeugten Stützpfeiler

Um den Erfolg des Drucks zu gewährleisten, ist es notwendig die drei Hauptfertigungsparameter im Fertigungsprozess zu synchronisieren. Diese Parameter sind in Abbildung 20 beispielhaft dargestellt und wie folgt definiert: die Geschwindigkeit, mit der der Beton in die Schalung gepumpt wird (P), die vertikale

Geschwindigkeit, mit der die Schalung nach oben bewegt wird (V) und die horizontale Positionierung (H) des Formgebungsfaktors entlang des Fertigungsweges.⁷⁰

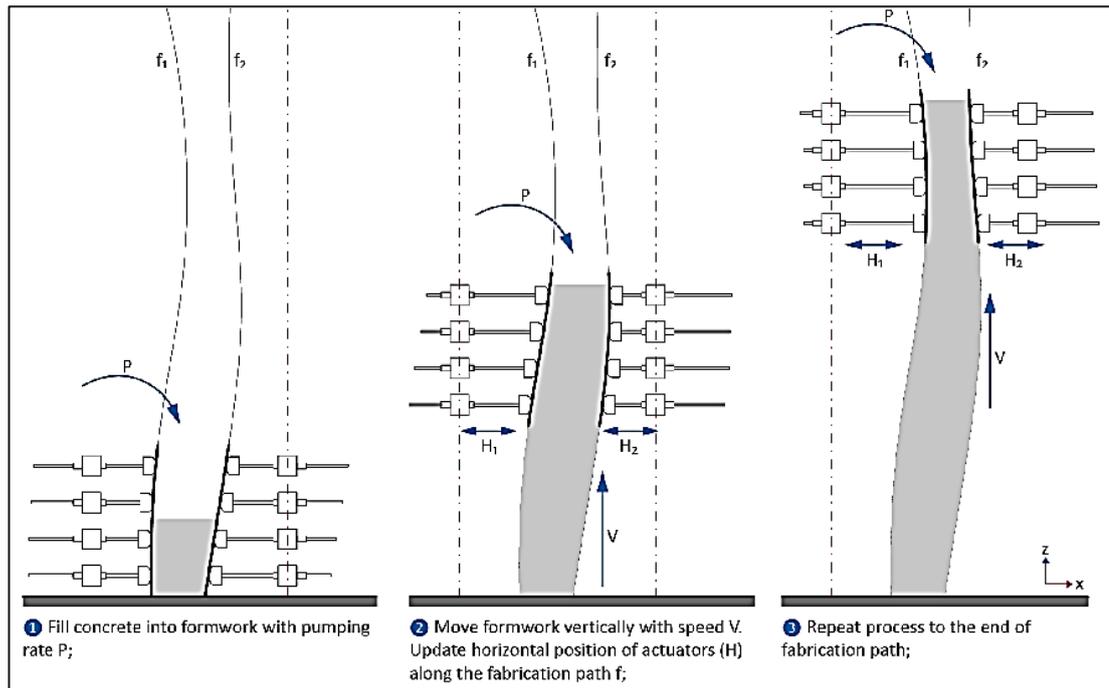


Abbildung 20: Schalungsdetails zur Herstellung von konkaven Bauteilen

In der Praxis bedeutet dies: Das Gleitschalungsverfahren ermöglicht, die Schalung beim vertikalen Hochziehen zu verdrehen sowie den Querschnitt zu erweitern bzw. zu verkleinern. Neben klassisch rechteckigen Formen können somit alternative geometrische Formen gedruckt werden. Dabei reicht eine einzige Schalung für die Herstellung von unterschiedlichen Querschnitten. Neben den Anforderungen an die Schalungs- und Steuerungstechnik, sind auch jene an das Material außerordentlich hoch. Um die Flexibilität in der Formgebung durch Querschnittsänderungen gewährleisten zu können, muss ein optimales Gleichgewicht zwischen Fließfähigkeit, Bebaubarkeit, Kompressionsstärke und Verwertungszeit gefunden werden. Die Extrudierbarkeit kann beim diesem Verfahren vernachlässigt werden, da der Beton direkt in die Schalung gegossen wird (und nicht aus einer Düse fließt). Der Kontakt des Frischbetons mit der Schalung darf nur kurz erfolgen und muss nach dem Austritt eine hinreichende Formstabilität aufweisen. Dadurch sollen Zugspannungen oder Rissbildungen vermieden werden.⁷¹

⁷⁰ Vgl. Scotto et al., 2018, S. 258.

⁷¹ Vgl. Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 280.

2.3. Einschätzung der additiven Verfahren für den 3D-Druck von Einfamilienhäusern

Kapitel 2.2.2 erläutert die wichtigsten Verfahrensmethoden in der additiven Fertigung, an denen zum heutigen Forschungsstand gearbeitet wird. Hinsichtlich des technologischen Reifegrades sind diese jedoch unterschiedlich und reichen von (universitären) Forschungsprojekten bis hin zu einsatzbereiten Prototypen.

Um die Forschungsfrage (Kapitel 1.2.) in weiterer Folge beantworten zu können ist es notwendig eine Einschätzung zu treffen, welche der genannten Verfahren am geeignetsten für den Druck eines Einfamilienhauses sind. Diese Analyse auf Basis der jüngsten Literatur und entwickelten Prototypen, wird anhand einer Matrix dargestellt. Sie listet die wichtigsten bereits beschriebenen additiven Verfahrensmethoden auf (vertikal) und beurteilt deren Eignung für den 3D-Druck eines Einfamilienhauses (horizontal). Die Eignungsbeurteilung erfolgt zur Vereinfachung anhand der Merkmale „Ja“, „Nein“ und „Teilweise“.

Additive Verfahrensmethoden	Eignung für 3D-Druck eines Einfamilienhaus
Selektives Binden	Nein
Extrusionsverfahren	Ja
Spritzbetonverfahren	Teilweise
Gleitschalungsverfahren	Nein

Tabelle 3: Matrix zur Beurteilung der Eignung der additiven Verfahren für den 3D-Druck eines Einfamilienhauses

Unterhalb wird zudem eine Begründung angeführt, weshalb die jeweilige Einordnung erfolgt. Dabei wird auch auf die Vor- und Nachteile des entsprechenden Verfahren in Bezug auf die Herstellung eines Einfamilienhauses eingegangen.

	Begründung
Selektives Binden	Das direkte Drucken von Gebäuden ist mit dieser Technologie aufgrund der Notwendigkeit große Mengen an Trägermaterial zu entfernen, sehr langsam. Die Technologie eignet sich gut für die Herstellung von Einzelstücken und Bauteilen, während sie für die Direktfertigung konventioneller Gebäude als weniger geeignet erachtet wird. Der D-Shape 3D-Drucker eignet sich am besten für die

	<p>Vorfertigung verschiedener hochkomplexer Bauelemente, um dann zur Baustelle transportiert zu werden.⁷²</p> <p><u>Vorteile:</u> Herstellung von Einzelstücken und Bauteilen</p> <p><u>Nachteile:</u> Kein Vor-Ort Druck, nicht geeignet für die Direktfertigung von großvolumigen Bauten, Entfernung von Trägermaterial notwendig</p>
Extrusionsverfahren	<p>Die auf Extrusion basierenden additiven Verfahren sind in der Forschung am weitesten verbreitet.⁷³ Trotz offener Themen wie etwa Bewehrungen, die mittels gleichzeitiger oder nachträglicher Einbringung von Bewehrungsstäben (vor dem Aushärten des Betons) oder durch die Verwendung von faserverstärkten Mischungen Anwendung finden, ist das Extrusionsverfahren das mit Abstand vielversprechendste additive Verfahren. In Bezug auf die Haltbarkeit dieser Technologie gilt es auch Probleme bei der Verbundwirkung der einzelnen Filamentschichten zu verbessern, um beispielsweise der Bildung von Wärmebrücken vorzubeugen.⁷⁴</p> <p>Nichtsdestotrotz wird dem Extrusionsverfahren eine hohe Eignung für den 3D-Druck von Einfamilienhäusern zugesprochen. Diese Hypothese wird auch mittels bereits existierender Pilotprojekte untermauert. Auf die konkreten Vor- und Nachteile wird in Kapitel 2.4. näher eingegangen.</p>
Spritzbetonverfahren	<p>Das Spritzbetonverfahren existiert seit über 100 Jahren und wird hauptsächlich im Tunnelbau und im Bergbau eingesetzt. Es lässt sich schnell und einfach auf allen Arten von Oberflächen aufbringen und</p>

⁷² Vgl. Monolite UK (Dinitech SpA), 2016, S. 4.

⁷³ Vgl. Lindeman, et al., 2019, S. 288.

⁷⁴ Vgl. Stefanoni, Angst, & Elsener, 2019, S. 230.

	<p>ermöglicht die Integration von Bewehrungen auch bei nicht standardmäßigen Geometrien. Dieses Verfahren hat daher grundsätzlich das Potenzial konstruktive Betonelemente mit großen Oberflächen herzustellen. Eine hohe Bauteilgenauigkeit kann derzeit aber nur bedingt erreicht werden.⁷⁵</p> <p>Um den Herstellungsprozess zu industrialisieren, sind jedoch Weiterentwicklungen notwendig. Zum einen muss ein automatisierter Post-prozess für die Oberflächenqualität entwickelt werden, um die sehr rauen Oberflächen zu glätten. Andererseits müssen weitere Studien durchgeführt werden, um die Grenzen des Verfahrens zu untersuchen. Zusätzlich sind Prozessketten zur automatisierten Integration von Bewehrungs- und Fertigteilen (z.B. Leerrohren) zu entwickeln.⁷⁶ Aufgrund dieser eben geschilderten Limitierungen kann dieses Verfahren aktuell nur teilweise für den 3D Druck eines Einfamilienhauses herangezogen werden</p> <p><i><u>Vorteile:</u> Herstellung von großvolumigen Baukörpern, Integration von Bewehrungen, rasche Aufbringung möglich, Vor-Ort Druck möglich</i></p> <p><i><u>Nachteile:</u> schlechte Bauteilgenauigkeit und hoher Aufwand in der Nachbearbeitung</i></p>
<p>Gleitschalungsverfahren</p>	<p>Der größte Vorteil des Gleitschalungsverfahrens besteht darin, dass es bis heute der einzige Roboter-Fertigungsprozess ist, mit dem maßgeschneiderte Betonelemente inklusive einer Bewehrung ohne Nachbearbeitung hergestellt werden können.⁷⁷ Da sich die bisherigen Forschungsprojekte einzig auf die Herstellung von Bauteilen beschränkten (u.a. Smart</p>

⁷⁵ Vgl. Lindeman, et al., 2019, S. 287-296.

⁷⁶ Ebd.

⁷⁷ Vgl. Lloret-Fritschi, et al., 2019, S. 300.

	<p>Dynamic Casting – DFAB House⁷⁸), die in weiterer Folge zur Baustelle transportiert wurden, wird die Technologie vor Ort als weniger geeignet für den 3D Druck eines Einfamilienhauses betrachtet.</p> <p><u>Vorteile:</u> <i>Integration von Bewehrungen, individuelles Design bei gleichzeitig geringem Schalungsaufwand</i></p> <p><u>Nachteile:</u> <i>Kein Vor-Ort Druck (Transport), nicht geeignet für die Direktfertigung von großvolumigen Bauten, vielmehr Ergänzung zu herkömmlichen Bauverfahren</i></p>
--	---

Tabelle 4: Begründung der Eignung des jeweiligen additiven Verfahrens für den 3D-Druck eines Einfamilienhauses

Nach Beurteilung der einzelnen Verfahren auf Basis der jüngsten Literatur und Pilotprojekten, widmet sich diese Arbeit in weiterer Folge **ausschließlich dem Extrusionsverfahren**, da dieses am geeignetsten erscheint die Anforderungen der Bauindustrie an die Errichtung eines 3D-gedruckten Einfamilienhauses zu erfüllen.

2.4. Anwendungsgebiete des Extrusionsverfahrens in der Bauindustrie

In diesem Kapitel werden die Anwendungsgebiete in der Bauindustrie näher untersucht. Dabei werden nicht mehr sämtliche additiven Verfahren betrachtet, sondern ein Schwerpunkt auf das Extrusionsverfahren und die verfügbaren Druckertypen gelegt. Letztere werden vor allem in Bezug auf die Realisierbarkeit von 3D-gedruckten Einfamilienhäusern analysiert.

2.4.1. Druckertypen des Extrusionsverfahrens

Auf Basis des Extrusionsverfahrens wurden in den vergangenen Jahren etliche Anstrengungen unternommen den Sprung von der teilweise rein universitären Forschung hin zur Entwicklung eines Prototyps oder gar eines marktreifen Produktes zu schaffen. Unterhalb werden die etabliertesten Druckertypen aufgelistet, die dem Extrusionsverfahren zugeschrieben werden können. Aufgrund der Fülle an weltweiten Projekten auf diesem Gebiet, werden pro Druckertyp jeweils ein bis maximal zwei Beispiele angeführt:

⁷⁸ Vgl. ETH Zürich, 2021, online.

Druckertypen	Beispiele
Gantry Drucker (siehe Kapitel 2.4.2.)	„BOD 2“ von der Firma COBOD https://cobod.com „VULCAN“ von der Firma ICON https://www.iconbuild.com/vulcan
Delta Drucker	„Crane WASP The Infinity“ von der Firma WASP https://www.3dwasp.com
Roboterarm Drucker (teilweise auch Spritzbetonverfahren)	„CyBe RC 3Dp“ von der Firma CyBe in Kooperation mit ABB https://cybe.eu/technology/3d-printers „KR QUANTEC“ von der Firma KUKA in Kooperation mit BESIX https://www.kuka.com/en-be/industries/solutions-database/2019/02/3d-concrete-printing_besix
Crawler Boom Drucker	„La Maxi Printer“ von der Firma Constructions 3d https://en.constructions-3d.com/la-maxi-printer
Polar Drucker (siehe Kapitel 2.4.2.)	„Frank“ von der Firma Apis Cor https://www.apis-cor.com/3dprinter

Tabelle 5: Auflistung der Druckertypen des Extrusionsverfahrens

Derzeit ist eine sehr hohe Aktivität im Bereich 3D-Betondruck, im Speziellen bei den Extrusionsverfahren, zu beobachten. Damit gemeint ist sowohl eine Aktivität im Rahmen neuerer wissenschaftlicher Publikationen als auch im Bereich neu angekündigter Bauprojekte. Diese Veröffentlichungen erfolgen beinahe im Wochentakt. Aus diesem Grund dienen die unterhalb angeführten Pressemitteilungen dazu, einen Eindruck über die hohe Aktivität hinsichtlich neuerer Veröffentlichungen innerhalb der letzten Monate zu gewinnen:

- **28.12.2021:** „Erstes 3D-gedrucktes Familienhaus der USA wird bezogen“ in Williamsburg (USA). Zusammenarbeit der Firmen Alquist 3D, COBOD sowie der gemeinnützigen Organisation Habitat for Humanity bei der Errichtung eines Einfamilienhauses vor Ort mit Hilfe eines Gantry Druckers.⁷⁹

⁷⁹ Vgl. Habitat for Humanity, 2021, online.

- **04.12.2021:** „3D-printed 'green' villa in Sharjah cuts building and maintenance costs“ in Sharjah (UAE). Zusammenarbeit der American University of Sharjah und CyBe bei der Errichtung eines Einfamilienhauses vor Ort mit Hilfe eines Roboterarm Druckers⁸⁰
- **28.10.2021:** „PERI und STRABAG drucken erstes Gebäude in Österreich“ in Niederösterreich. Zusammenarbeit der Firmen STRABAG und PERI beim Druck eines Bürogebäudes vor Ort mit Hilfe eines Gantry Druckers.⁸¹
- **26.07.2021:** „Erstes gedrucktes Haus Deutschlands offiziell eröffnet“ in Beckum (Deutschland). Zusammenarbeit der Firmen PERI und COBOD beim Druck des ersten Einfamilienhauses in Deutschland vor Ort mit Hilfe eines Gantry Druckers⁸²
- **30.04.2021:** „Dutch couple become Europe’s first inhabitants of a 3D-printed house“ in Eindhoven (Niederlande). Zusammenarbeit der Firma Saint-Gobain Weber Beamix mit der TU Eindhoven im Rahmen des Druckes des ersten Einfamilienhauses in den Niederlanden mit Hilfe eines Roboterarm Druckers. Der Druck selbst erfolgte dabei in einer Produktionsstätte fernab der Baustelle selbst.⁸³
- **20.12.2019:** „World's Largest 3D Printed Building“ in Dubai (UAE). Dieses Projekt markiert einen Meilenstein im 3D-Druck von Gebäuden und ist nach wie vor das größte 3D-gedruckte Gebäude. Es wurde von der Firma Apis Cor vor Ort mit Hilfe eines Polar Druckers umgesetzt.⁸⁴

Bei den oberhalb angeführten Presseinformationen handelt es sich um ausgewählte Veröffentlichungen, da eine weitreichende Analyse über den Umfang dieser Arbeit hinausgehen würde. Befasst man sich nun mit den einzelnen Druckertypen und legt dabei einen Schwerpunkt auf das Drucken von Einfamilienhäuser vor Ort, stechen nach dem heutigen Stand der Technologie besonders zwei Druckertypen hervor:

1. Gantry-Drucker
2. Polar-Drucker

⁸⁰ Vgl. The National, 2021, online.

⁸¹ Vgl. PERI GmbH, 2021a, online.

⁸² Vgl. PERI GmbH, 2021, online.

⁸³ Vgl. The Guardian, 2021, online.

⁸⁴ Vgl. Apis Cor, 2019, online.

Diese beiden Druckertypen haben laut Ansicht des Autors aktuell ein hohes Potential sich von einem Prototypenstatus hin zu einem marktreifen Produkt zu entwickeln, aufgrund der folgenden Tatsachen:

- Ermöglichen den Druck vor Ort
- Transportfähig mittels handelsüblicher LKWs
- Technologie ist am weitesten fortgeschritten und es wurden mit beiden Druckertypen bereits einige Probehäuser weltweit gedruckt
- Sind in der Lage das Volumen eines Einfamilienhauses zu Drucken (d.h. sie verfügen über die notwendige Spannweite)
- Finanziell starke Investoren stehen hinter diesen Projekten und sind bereit weiter zu investieren
- Arbeiten an Lösungen zur laufenden Verbesserungen der Technologie
- Bieten konkrete Designkonzepte und -renderings an (z.B. Apis Cor)
- Haben die aktuell besten Lösungen für die bestehenden Kundenwünsche
- Bieten Wissensvermittlungen an für interessierte Kunden (z.B. Online-University)

2.4.2. Ausgewählte Druckertypen des Extrusionsverfahrens

Da diesen beiden Druckertypen, wie oberhalb erwähnt, ein besonderes Potential hinsichtlich Etablierung am Markt zugeschrieben wird, werden diese nun im Anschluss näher beschrieben.

Gantry Drucker

Das Wort „Gantry“ stammt aus dem Englischen und kann mit „Gerüst“ übersetzt werden, wodurch sich auch das Erscheinungsbild des Druckers erklären lässt (siehe Abbildung 21). Ein Gantry Drucker hat typischerweise einen quadratischen oder rechteckigen Druckbereich, der von einem gerüstartigen Aufbau begrenzt ist. Der Druckkopf wiederum gleitet innerhalb des Druckbereichs entlang einer X- und Y-Achse auf bis zu drei Schienen, die von den vertikalen Gerüstpfeilern getragen werden. Die Gerüstpfeiler sind über ein Betonfundament verankert, es gibt jedoch auch Druckertypen mit gleitenden Schienensystemen.⁸⁵

⁸⁵ Vgl. Apis Cor, 2021, online.



Abbildung 21: Darstellung eines Gantry Druckers. Links zeigt einen BOD 2 der Firma COBOD mit einem Druckbereich von 9.57 x 12.13 x 5.62 m, rechts ebenfalls ein BOD 2 mit einer größeren Druckbereich mit den Abmessungen 12.10 x 24.75 x 8.14 m

Wie bereits erwähnt kann der Gantry Drucker für den Direktdruck vor Ort eingesetzt werden. Xia, et al. haben dazu die einzelnen Prozessschritte für der Nutzung des Druckers in der Abbildung 22 zusammengefasst.⁸⁶

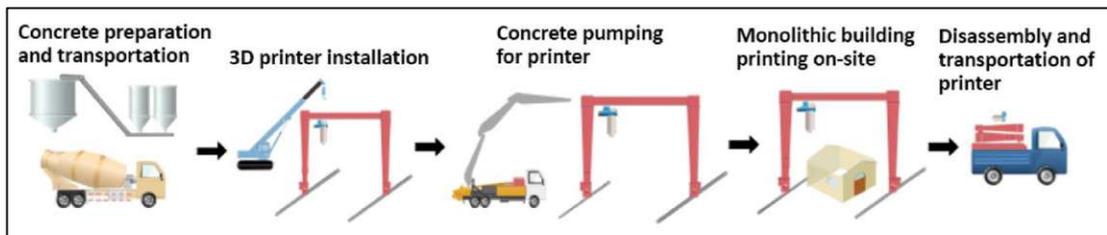


Abbildung 22: Prozessschritte für die Nutzung eines Gantry Druckers

Dazu werden sowohl die Betonmischung als auch der Gantry Drucker zum Bauplatz transportiert. Nach Aufbau und Installation des Druckers, sowie der Verankerung im Fundament, kann mit dem Druck begonnen werden. Das Betongemisch wird dazu entweder direkt als Frischbeton zum Druckkopf gepumpt oder als Trockenmaterial vor Ort mit Wasser vermengt und dann weiterverarbeitet. Nach Herstellung des 3D-Drucks anhand des digitalen 3D-Modells wird der Gantry Drucker wieder abgebaut und abtransportiert. Für die Verankerung im Fundament gibt es zwei Ansätze, die an dieser Stelle noch zu erwähnen sind. Einerseits gibt es Gantry Drucker, die mittels eines im Fundament befestigten Schienensystems die Vergrößerung des Druckbereichs ermöglichen (z.B. Druck von Reihenhäusern, siehe Abbildung 23), andererseits gibt es feste Fundamentverankerungen in Form von Betonblöcken, die

⁸⁶ Vgl. Xia, et al., 2021, S. 2.

für mehr Stabilität sorgen, den Druckbereich jedoch in der Größe beschränken (siehe Abbildung 24).⁸⁷

Bei der Druckgeschwindigkeit erreicht beispielsweise der Gantry Drucker „BOD 2“ von COBOD einen Höchstwert von 100 cm pro Sekunde, die tatsächliche Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei etwa 40-50 cm pro Sekunde. An einem Tag ist es somit möglich – jene nach Komplexitätsgrad des Grundrisses – Gebäude mit einer Größe von bis zu 50m² zu drucken. Der Aufbau und die Installation am Bauplatz sind innerhalb von vier Stunden abgeschlossen.⁸⁸



Abbildung 23: Fundament mit Schienensystem für einen Gantry Drucker (links)

Abbildung 24: Fundament mit sechs Betonblöcken für einen Gantry Drucker (rechts)

Polar Drucker

Die Bezeichnung dieses Druckertyps entstammt dem dafür verwendeten Polarkoordinatensystem, also „ein zweidimensionales Koordinatensystem, in dem jeder Punkt in einer Ebene durch den Abstand von einem vorgegebenen festen Punkt (als Pol bezeichnet) und den Winkel zu einer festen Richtung festgelegt wird.“⁸⁹ Mit diesem Polarkoordinatensystem kann der Polar Drucker mit Hilfe eines ausfahrbaren Teleskoparmes exakte Punkte entlang der X-, Y- und Z-Achsen ansteuern und das digitale 3D-Modell fertigen. Diese Methodik ist mit einem US-Patent geschützt.⁹⁰

Der Drucker „FRANK“ von Apis Cor ist 4,5 m lang, 1,5 m hoch sowie breit und kann per Klein-LKW an den Bauplatz transportiert werden. Durch den ausfahrbaren Teleskoparm (bis zu 8,5 m) wird in Summe ein 132 m² großer Druckbereich abgedeckt, der über eine örtliche Standortverlagerung entsprechend vergrößert werden kann. Beim Ausfahren des Teleskoparmes gibt es zudem Gegengewichte,

⁸⁷ Vgl. Apis Cor, 2021, online.

⁸⁸ Vgl. COBOD International A/S, 2022, online.

⁸⁹ Vgl. Wikipedia, 2022 online.

⁹⁰ Vgl. USA Patentnr. US20160361834A1, 2016 online.

die für zusätzliche Stabilität des Druckers sorgen. Der Aufbau und die Installation am Bauplatz sind innerhalb von 30 Minuten abgeschlossen.⁹¹



Abbildung 25: Komponenten eines Polar Druckers (links); Ein im Druck befindlicher Polar Drucker (rechts)

Wie in Abbildung 25 ersichtlich wird Trockenmaterial in einem Silo an den Bauplatz geliefert, vor Ort in einem Mischgerät mit Wasser vermengt und der entstandene Frischbeton mittels Schlauch an den Polar Drucker gepumpt, wo dieser über eine Düse extrudiert wird. Das Fundament wird vor allem aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht zu Gänze mit Hilfe eines Polar Druckers hergestellt, sondern muss mit herkömmlichen Verfahren gegossen werden. Sehr wohl möglich ist ein 3D-Druck des Grundrisses mit dem Polar Drucker, der im Anschluss mit Stahl oder Eisen bewehrt und mit Ortbeton ausgefüllt werden kann.⁹²

In jüngster Zeit ist die Firma Apis Cor auch mit neuen Designs für Einfamilienhäuser in Erscheinung getreten, die im Jahr 2022 umgesetzt werden sollen (siehe Abbildung 26). Diese Tatsache unterstreicht die bevorstehende Marktreife dieses Druckertyps und dessen Bedeutung für eine kommerzielle Nutzung.



Abbildung 26: Entwurf für das Haus „Spirit“ mit 214m² verteilt auf zwei Stockwerke (links); Entwurf für das Haus „Liberty“ mit 167m² auf einer Geschoßebene (rechts)

⁹¹ Vgl. 3d Natives, 2019 online.

⁹² Vgl. Apis Cor, 2016 online.

3. Beschreibung der methodischen Vorgangsweise und des Forschungsansatzes

Im vorherigen Kapitel wurden Definitionen angeführt und Begriffe erklärt. Nach einer detaillierten Beschreibung der jeweiligen Vor- und Nachteile, wurde evaluiert welche Verfahrensmethoden am geeignetsten für den 3D-Druck von Einfamilienhäusern sind und welche Druckertypen am Markt verfügbar sind. Dies ist aus Sicht des Autors notwendig, um ein Basiswissen zu vermitteln, das in weiterer Folge für die Beantwortung der Forschungsfrage wichtig ist.

Im Allgemeinen können wissenschaftliche Aussagen anhand von bestehender Literatur oder Erkenntnissen auf Basis der quantitativen bzw. qualitativen Forschung generiert werden. Im Rahmen dieser Masterarbeit soll nicht nur eine Erhebungstechnik allein für die Datenerhebung angewendet werden. Die methodische Herangehensweise an dieses umfassende Thema erfolgt vielmehr anhand von zwei Methoden, die im Anschluss miteinander kombiniert werden: [1] ein Literatur- bzw. Desk-Research-Vergleich sowie [2] eine Einzelfallstudie.

3.1. Literatur- bzw. Desk-Research-Vergleich

Im Rahmen des Literaturvergleiches sollen wissenschaftliche Aussagen auf Basis von bestehendem Wissen mittels Analogieschlüssen generiert werden. Um eine tragfähige Wissensbasis zu schaffen, ist folgende Methodik bei der Literaturrecherche anzuwenden: In einem ersten Schritt wird die entsprechende Literatur anhand von Schlagwörtern in unterschiedlichen Wissensdatenbanken gesucht. Dazu wird eine Liste mit etwa 10-15 thematisch passenden Begriffen erstellt. Im Zuge dieser Masterarbeit erfolgte die Literatursuche vorwiegend über das Onlineverzeichnis der Bibliothek der Technischen Universität Wien und über die Literaturdatenbank ScienceDirect. Darüber hinaus wurde auch in der Universitätsbibliothek vor Ort nach relevanter Fachliteratur gesucht. In einem anschließenden Schritt wird die Literatur bewertet und nach vordefinierten Kriterien gereiht. Der Autor wählte dabei unter anderem die Aktualität, das gewählte additive Fertigungsverfahren und das Vorhandensein von Beurteilungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit als Bewertungskriterien aus. Abschließend werden die relevanten Textstellen herausgearbeitet und entsprechend untersucht.⁹³ Da aktuell eine hohe Forschungsaktivität im Bereich der additiven Fertigung erfolgt, unter anderem etliche

⁹³ Vgl. Rössl, 2008, S. 177.

Studien veröffentlicht und Pilotprojekt weltweit gedruckt werden, erscheint dies als geeignete Methodik für einen Status-Quo-Vergleich und die Beantwortung der Forschungsfrage. Aus diesem Grund kann ein sogenannter Desk-Research-Vergleich⁹⁴ durchgeführt werden. Um eine weitere Eingrenzung dieses umfassenden Themas zu erreichen, werden zusätzliche Faktoren definiert.

Der Vergleich der Verfahrensarten und somit die Beantwortung der Forschungsfrage, soll dabei insbesondere anhand [1] einer kostenseitigen Betrachtung unter Einschränkung auf den [2] Bautyp „Einfamilienhaus“ in Österreich erfolgen. Diese beiden Faktoren sind wichtig, damit sowohl die additive Fertigung als auch die Massivbauweise unter einheitlichen Gesichtspunkten beleuchtet werden können. Im Speziellen soll im Rahmen des Einfamilienhauses der Prozessschritt „Rohbau 1“ analysiert werden (siehe dazu Kapitel 2.1.3.). Die Parameter für das Referenz-Einfamilienhaus lauten wie folgt:

- Nettogeschosßfläche umfasst 140 m²
- Einstöckige Bauweise mit einer Deckenhöhe von 2,70 m
- Wandstärke beträgt 0,3 m, etwaige Hohlräume werden aus Gründen der Vereinfachung vernachlässigt
- Alleinige Betrachtung des Rohbaus

Darüber hinaus ist die [3] Erstellung vor Ort entscheidend. Dies bedeutet, dass dabei keine Bauteile wie etwa ganze Wandelemente oder Fertigteile zur Baustelle transportiert werden dürfen, sondern die Herstellung des Einfamilienhauses direkt am Bauplatz erfolgt. Es wird davon ausgegangen, dass sämtliche notwendigen Baumaterialien an der Baustelle vorhanden sind, weshalb keine Aufwendungen für den Transport berücksichtigt werden.

3.2. Einzelfallstudie

Bei der Einzelfallstudie steht grundsätzlich der einzelne Mensch, die einzelne Gruppe, der einzelne Betrieb, etc. in seinem konkreten Kontext im Mittelpunkt des Forschungsinteresses. Diese zielt darauf ab, einen besseren Einblick in das Zusammenwirken multipler Faktoren zu gewinnen und bietet sich daher besonders für die Analyse schwer zugänglicher und komplexer Forschungsgegenstände an. Bei dieser Form der Analyse werden zwar einerseits komplexe Phänomene im Detail erfasst, andererseits bleiben subjektive Verzerrungen der Daten unbemerkt. Aus

⁹⁴ d.h. die Sammlung von Daten aus bestehender Literatur ohne eigene Erhebung (z.B. qualitative Interviews).

diesem Grund soll eine Objektivierung der Daten mit Hilfe des Literatur- bzw. Desk-Research-Vergleichs sichergestellt werden.⁹⁵

Im konkreten Fall soll die Einzelfallstudie anhand eines zusätzlichen Experten-Fachgesprächs in diese Arbeit einfließen. Dieses erfolgt auf Basis der Herstellung des ersten Gebäudes in Österreich aus dem 3D-Drucker, das im Zeitraum von November bis Februar 2022 in Niederösterreich realisiert wurde.⁹⁶ Mit Hilfe des Fachgesprächs sollen wichtige praxisrelevante Daten, die über die bestehende Literatur hinausgehen, für die Beantwortung der Forschungsfrage generiert werden. Im Allgemeinen sind Forschungsgespräche in der qualitativen Forschung die am häufigsten angewandten Erhebungsverfahren – dementsprechend vielfältig sind die möglichen Varianten der Interviewführung und der anschließenden Auswertung.⁹⁷ Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde im Vorfeld des Experten-Fachgesprächs ein Fragebogen mit offenen Fragen erstellt, die auch die Möglichkeit vorsehen etwaige Unterfragen zu stellen. Als Leitfaden dienten dabei die folgenden fünf allgemeinen Fragen:

- Welche Vorteile haben sich im Zuge des Projektes gezeigt?
- Welche Nachteile haben sich im Zuge des Projektes gezeigt?
- Welche sind die größten technologischen Herausforderungen bzw. Limitierungen für eine massentaugliche Umsetzung in Österreich?
- Wie sieht eine Kostenbetrachtung gegenüber einem herkömmlichen Bauprojekt aus (Massivbauweise)?
- Wurden sonstige allgemeine Beobachtungen festgestellt, die zu erwähnen sind?

Ziel dieser offenen Frageform ist, dass ein großer Antwortrahmen gegeben wird und eine ausschließliche Fokussierung auf die Sichtweisen der befragten Person erfolgt. Dieses Interviewverhalten ist eher weich gestaltet und kommt der befragten Person im Allgemeinen entgegen.⁹⁸ Der Autor kann somit sicherstellen, dass eine gewisser Gesprächsleitfaden eingehalten wird, aber dennoch genug Raum besteht auch Themen zu beleuchten, die auf den ersten Blick nicht im Fokus gestanden wären.

⁹⁵ Vgl. Fink, 2008, zitiert nach Rössl, 2008, S. 230 f.

⁹⁶ Vgl. PERI GmbH, 2021a online.

⁹⁷ Vgl. Fink, 2008, zitiert nach Rössl, 2008, S. 230 f.

⁹⁸ Ebd.

3.3. Forschungsansatz und Erhebungstechnik

Wie bereits oberhalb angeführt, ist das Ziel dieser Masterarbeit die Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigung im Vergleich zum bestehenden Verfahren der Massivbauweise zu untersuchen. Für eine thematische Eingrenzung wird daher der Bautyp „Einfamilienhaus“ unter Annahme einer Herstellung vor Ort näher analysiert. Um die wirtschaftliche Perspektive möglichst transparent zu machen, wird eine Einteilung in die folgenden Kostenkategorien gewählt: [1] Materialkosten, [2] Personalkosten, [3] sonstige Kosten, [4] Gerätekosten und [5] Herstellungskosten. Durch diesen Ansatz sollen die wichtigsten Annahmen und Parameter miteinander vergleichbar gemacht werden und um die Erfahrungen aus der Einzelfallstudie ergänzt werden. Die Erhebungstechnik ist zusammenfassend in der Tabelle 6 dargestellt:

	Einfamilienhaus (vor Ort hergestellt)
Vergleichsanalyse: Wirtschaftlichkeit	Vergleich vorhandener Literaturstudien & Input einer Einzelfallstudie
[1] Materialkosten	
[2] Personalkosten	
[3] sonstige Kosten	
[4] Gerätekosten	
[5] Herstellungskosten	

Tabelle 6: Erhebungstechnik für die Vergleichsanalyse

Für eine bessere Einordnung werden die einzelnen Kostenkategorien kurz beschrieben. Der Autor geht dabei immer von Nettokosten aus und etwaige steuerliche Aspekte werden nicht berücksichtigt.

Die Materialkosten umfassen im Allgemeinen die Kosten für das jeweils verwendete Betongemisch. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, besteht dieses vorrangig aus Zement, Wasser und diversen Zusatzstoffen. Bei den Personalkosten handelt es sich um jene Kosten, die für Arbeitskräfte an der Baustelle vor Ort anfallen. Es wird dabei zwischen einem günstigeren Sacharbeiter und einer spezialisierten Fachkraft unterschieden. Etwaige An- und Abreisezeiten werden dabei außer Acht gelassen. In den Bereich der sonstigen Kosten fallen unter anderem Aufwendungen für die Baustelleneinrichtung, Kosten für Schalungen oder die Kosten für das Versetzen von Kränen und Arbeitsgerüsten. Die Kosten für Bewehrungen können ebenfalls in dieser

Kostenkategorie berücksichtigt werden. Die Gerätekosten beinhalten die reinen Kosten für den 3D-Drucker sowie die Nebenkosten, zu denen die Steuerung, der Betonmischer und das Zwischenlagersilo zählen. Die Herstellungskosten setzen sich jeweils aus den Materialkosten, den Lohnkosten und den sonstigen Kosten zusammen. Die Gerätekosten sollen darin nicht berücksichtigt und im Idealfall separat ausgewiesen werden.

Nach Untersuchung der vorhandenen Literatur und der Einzelfallstudie, soll die Forschungsfrage aus Kapitel 1.2. beantwortet werden. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse interpretiert und Schlussfolgerungen gezogen.

4. Wirtschaftlichkeitsanalyse zwischen der additiven Fertigung und der Massivbauweise

In diesem Kapitel wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse im Einklang mit der methodischen Vorgangsweise gemäß Kapitel 3. durchgeführt. Dabei werden die additive Fertigung und die Massivbauweise anhand von vordefinierten Kostenkategorien miteinander verglichen. Im Allgemeinen wird im Zuge dieser Analyse untersucht, ob und in welcher Form Kostenvorteile gegenüber der herkömmlichen Massivbauweise bestehen.

4.1. Betrachtung anhand bestehender Literatur

Der zentrale Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit ist die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit bei der Errichtung eines 3D-gedruckten Einfamilienhauses. Dabei soll untersucht werden ob und in welcher Form Kostenvorteile gegenüber der herkömmlichen Massivbauweise bestehen. Wie bereits erwähnt, dient die Massivbauweise vorwiegend als Synonym für den Bau von Rohbauten mit Stahlbeton (d.h. gegossene Stahlbetonwände) und/oder Wandbauten mit Ortbeton ausgefüllten Mantelbetonsteinen.

In der jüngsten Vergangenheit haben sich im Speziellen drei Studien einer Untersuchung der wirtschaftlichen Perspektive sowie der Kostenanalyse im 3D-Druck gewidmet:

- Studie 1: „Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of robotically built wall“ von García de Soto, et al. (2018)
- Studie 2: „Wirtschaftliche Perspektiven von Beton-3D-Druckverfahren“ von Otto, Kortmann, & Krause (2020)
- Studie 3: „3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study (2022) von Batikha, Jotangia, Yasser Baaj, & Mousleh

In weiterer Folge sollen nun die wichtigsten Schlussfolgerungen dieser Studien erläutert und davon ausgehend eigene Erkenntnisse abgeleitet werden. Studie 1 von García de Soto et al. analysiert die Kostenstruktur einer geraden sowie einer doppelt-gebogenen Wand auf Basis eines Spritzbetonverfahrens (siehe Kapitel 2.2.2.) und stellt diese in ein Verhältnis zur Massivbauweise. Im Speziellen werden dabei also sowohl eine gerade als auch eine doppelt-gebogene Wand untersucht. Studie 2 von Otto, Kortmann, & Krause widmet sich einer Kostenanalyse auf Basis eines Extrusionsverfahrens und vergleicht dabei die Grobfilamentablage (CONPrint3D,

siehe Kapitel 2.2.2.) mit der Herstellung von herkömmlichen Mauerwerken (insbesondere einer Stahlbetonwand). Studie 3 widmet sich ebenfalls dem Extrusionsverfahren. Dabei vergleichen Batikha, et al., den 3D-Druck unter Verwendung eines Gantry-Druckers oder eines roboterarm Druckers (siehe Kapitel 2.4.1) mit vier weiteren Bauweisen anhand eines fiktiven zweistöckigen Gebäudes. Da all diese Studien auf Annahmen oder verhältnismäßig teuren Experimenten beruhen, versucht der Autor die Ergebnisse möglichst zu vereinheitlichen, um eine Vergleichbarkeit herzustellen und transparente Annahmen zu treffen. Dazu werden die Studien 1-3 in die folgenden Kostenkategorien eingeteilt: [1] Materialkosten, [2] Personalkosten, [3] sonstige Kosten, [4] Gerätekosten und [5] Herstellungskosten.

4.1.1. Materialkosten

In Studie 1 wurden die Materialkosten vorwiegend anhand von Interviews mit Herstellern eingeholt, beispielsweise jene für Schalungskosten, die zwischen 380 € und 636 € pro m² festgelegt sind. Die Materialkosten werden in dieser Studie nicht explizit ausgewiesen, sondern lediglich die Herstellungskosten, die sich aus Personalkosten, Materialkosten und anteiligen Gerätekosten zusammensetzen.⁹⁹

In Studie 2 wurden die Materialkosten über aktuelle Marktpreise und Preisangebote inklusive etwaiger Zu- und Abschläge ermittelt. Für das Betongemisch des 3D-Drucks wurde ein 30%-iger Kostenaufschlag auf den Preis für Normalbeton angewandt, um den Einsatz von Zusatzmitteln zu berücksichtigen.¹⁰⁰ In Studie 2 werden die Materialkosten in Höhe von 22,10 € m² jedoch für eine Wandstärke von 0,2 m angesetzt. Da das in dieser Arbeit untersuchte Referenz-Einfamilienhaus (siehe Kapitel 3.1.) eine Wandstärke von 0,3 m aufweist, ist es notwendig die Materialkosten dementsprechend anzupassen und mit dem Faktor von 1,5¹⁰¹ zu multiplizieren. Daraus folgend können die Materialkosten mittels CONPrint3D-Verfahren und einer Wandstärke von 0,3 m mit 33,15 € pro m² beziffert werden.

Studie 3 verwendet Marktdaten, spricht jedoch von einem gewissen Maß an Ungenauigkeit hinsichtlich der Kostendaten. Die Materialkosten¹⁰² für das Betongemisch für den 3D-Druck betragen 229 € pro m³ und sind etwa 3,8-mal höher als die normalen Betonkosten von 60 € pro m³. Der Preis in Höhe von 229 € pro m³

⁹⁹ Vgl. García de Soto, et al., 2018, S. 301.

¹⁰⁰ Vgl. Otto, Kortmann, & Krause, 2020, S. 590 f.

¹⁰¹ Annahme: Wandstärke = 0,3 / 0,2 – 1 = 1,5; d.h. Anpassung um +50%.

¹⁰² Annahme: Wechselkurs USD/EUR von 1,1316.

wird als Mittelwert aus verschiedensten Literaturangaben abgeleitet. Unter Annahme einer Wandstärke von 0,3 m ergibt dies einen Kostensatz von 68,70 € pro m².¹⁰³

Materialkosten	Studie 1	Studie 2	Studie 3
Materialkosten 3D-Druck	Keine Angabe	33,15 € pro m ²	68,70 € pro m ²

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Materialkosten der Studien 1-3

Die Materialkosten werden hier explizit betrachtet, da diese erheblichen Einfluss auf die Herstellungskosten haben.

4.1.2. Personalkosten

Studie 1 verwendet öffentlich zugängliche Personalkostensätze¹⁰⁴, wobei diese von einem günstigerem Sacharbeiter mit 42,81 € pro Arbeitsstunde bis zu einer spezialisierten Fachkraft mit 70,70 € pro Arbeitsstunde reichen. Der durchschnittliche kalkulierte Tagessatz für ein ganzes Team vor Ort (konkret 3 bis 4 Arbeitskräfte je nach anfallenden Aufgaben) beträgt 1.124 € für die Massivbauweise und 693 € für den 3D-Druck.¹⁰⁵ Die Personalkosten für 3D-Druck sind also um 38% günstiger als jene der Massivbauweise.

In Studie 2 werden die Personalkosten für Sacharbeiter mit 35 € pro Arbeitsstunde, für jene als spezialisierter Geräteführer am 3D-Drucker ein höherer Satz mit 70 € pro Arbeitsstunde beziffert. Die Werte wurden dabei mittels aktueller Lohnkosten und eingeholten Preisangeboten ermittelt. Unter Berücksichtigung des anfallenden Arbeitsaufwandes an der Baustelle vor Ort wurde ein durchschnittlicher Stundensatz von 52,50 € kalkuliert. Bei einem angenommen 8-Stunden-Arbeitstag und gemäß Otto, Kortmann, & Krause zwei Arbeitskräften für die Betreuung des 3D-Drucks bedeutet dies einen Tagessatz in Höhe von 840 €. ¹⁰⁶

In Studie 3 werden Personalkosten nicht konkret beziffert jedoch auf das Lohnniveau in den Vereinigten Arabischen Emiraten referenziert. Als Einheit werden hier Arbeitsstunden pro m² gewählt, die bei dem 3D-Druck-Verfahren mit 9,8 h pro m² und bei dem Stahlbetonbau mit 20,8 h pro m² angenommen werden. Die Personalkosten für 3D-Druck sind also um 53% günstiger als jene der Massivbauweise. Des Weiteren

¹⁰³ Vgl. Batikha, Jotangia, Yasser Baaj, & Mousleh, 2022, S. 2.

¹⁰⁴ Annahme: Wechselkurs USD/EUR von 1,1316.

¹⁰⁵ Vgl. García de Soto, et al., 2018, S. 303.

¹⁰⁶ Vgl. Otto, Kortmann, & Krause, 2020, S. 591.

sind in dieser Studie drei Arbeitskräfte für die Umsetzung des 3D-Drucks vorgesehen.¹⁰⁷

Personalkosten	Studie 1	Studie 2	Studie 3
Tagessatz für 3D-Druck (netto)	693 €	840 €	9,8 h pro m ²
Arbeitskräfte vor Ort	3-4	2	3

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Personalkosten der Studien 1-3

In Tabelle 8 ist ersichtlich, dass sich die Tagessätze für ein Team vor Ort zwischen 693 € und 840 € bewegen. Der Tagessatz von Studie 1 ist gering unter Berücksichtigung der Anzahl an Arbeitskräften, noch dazu da das Forschungsprojekt in der Schweiz durchgeführt wurde und hier das Lohnniveau allgemein höher ist. Die Tagessätze in Studie 2 sind in der Praxis vorstellbar und beziehen sich auf Projekt in Deutschland. Studie 3 wurde in den Vereinigten Arabischen Emiraten untersucht. Die Angabe von 9,8 h pro m² erscheint in diesem Zusammenhang hoch bemessen.

Laut Studie 1 liegt der Anteil der Personalkosten an den gesamten Herstellungskosten bei 27%.¹⁰⁸ Studie 2 trifft etwas höhere Annahmen und beziffert den Anteil je nach Bauweise zwischen 30% und 70% der Herstellungskosten.¹⁰⁹ Studie 3 tritt hier keine genaueren Angaben und fasst die Personalkosten unter „construction costs“ zusammen, die zwischen 53% und 75% der Gesamtkosten betragen.¹¹⁰

Besonders erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang die Anzahl an benötigten Arbeitskräften vor Ort. Ein Polar Drucker setzt die Anwesenheit von zwei Arbeitskräften für die Bedienung des Druckers und die Kontrolle des extrudierten Materials voraus.¹¹¹ Wie oberhalb ersichtlich, beziffern die Studien 1-3 die Anzahl der Arbeitskräfte an der Baustelle vor Ort zwischen 2 bis 4 Personen.

4.1.3. Sonstige Kosten

Studie 1 berücksichtigt weder Planungs- noch Gestaltungskosten der robotergefertigten oder der konventionellen Betonwände. Beide Bauprozesse

¹⁰⁷ Vgl. Batikha, Jotangia, Yasser Baaj, & Mousleh, 2022, S. 7.

¹⁰⁸ Vgl. García de Soto, et al., 2018, S. 302.

¹⁰⁹ Vgl. Otto, Kortmann, & Krause, 2020, S. 592.

¹¹⁰ Vgl. Batikha, Jotangia, Yasser Baaj, & Mousleh, 2022, S. 9.

¹¹¹ Vgl. Apis Cor, 2021 online.

beginnen vor Ort an der Baustelle und enden mit der fertigen Wand. Es wird davon ausgegangen, dass alle benötigten Materialien und Geräte vor Baubeginn vor Ort verfügbar sind. Des Weiteren enthält die Kostenkalkulation keine Zuschläge für Gemeinkosten und Gewinn.¹¹² In Studie 2 werden auch die Gerätekosten für den Drucker selbst nicht einkalkuliert, sondern mittels einer Break-Even-Analyse das maximale Kostenbudget für die Anschaffung eines 3D-Druckers ermittelt. Darüber hinaus sind Kosten für Schalungen, das Versetzen von Kränen und Arbeitsgerüsten berücksichtigt, welche jedoch laut Autoren bewusst niedriger angesetzt sind.¹¹³ In Studie 2 und Studie 3 wird keine Bewehrung im 3D-Druck-Verfahren verwendet, sondern lediglich ein Betongemisch, das Schicht für Schicht extrudiert wird. Dem gegenüber steht Studie 1, die eine Eisenbewehrung im Wandsystem vorsieht und somit negative Auswirkungen auf die Herstellungskosten hat.

4.1.4. Gerätekosten

Die Gerätekosten hängen stark von den technischen Aspekten des verwendeten Druckers und des angewendeten Druckverfahrens ab. In weiterer Folge finden wieder die beiden in Kapitel 2.4.1. beschriebenen Druckertypen Anwendung.

Kosten Gantry Drucker

Die netto Gerätekosten für einen Gantry Drucker ohne Installation und Montage vor Ort, beispielsweise von der Firma COBOD, betragen je nach Größe der Druckfläche zwischen 257.000 € und 1.027.000 €. Die reinen Gerätekosten eines Gantry Druckers für die serielle Herstellung von Bauten mit der Nettogeschoßfläche eines Standard-Einfamilienhauses (d.h. Länge mal Breite = 10 m x 12 m) werden mit 332.000 € angegeben. Zusätzlich fallen hierbei noch Kosten für die Steuerung, den Betonmischer und das Zwischenlagersilo in Höhe von 77.000 € an. Dadurch erhöht sich der Nettogesamtpreis auf 409.000 €. ¹¹⁴ Otto, Kortmann, & Krause gehen in ihrer Studie von einer Nettogeschoßfläche von 120 m² aus. Für das im Rahmen dieser Arbeit behandelte Referenz-Einfamilienhaus mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m², bedeutet dies einen größenbedingten Aufschlag in Höhe von 16%. Daraus folgend, werden die reinen Gerätekosten ebenfalls mit einem Aufschlag von 16% versehen, der die Gerätekosten für den Druck einer Nettogeschoßfläche von 140 m²

¹¹² Vgl. García de Soto, et al., 2018, S. 300.

¹¹³ Vgl. Otto, Kortmann, & Krause, 2020, S. 588-590.

¹¹⁴ Ebd.

auf 374.000 € erhöht. Fügt man nun die oberhalb beschriebenen Nebenkosten hinzu, ergibt sich ein Nettogesamtpreis von 450.000 €.

Zur Verifizierung der reinen Gerätekosten, wurde eine weitere Quelle aus Herbst 2021 herangezogen. Diese beziffert die netto Gerätekosten für einen Gantry Drucker mit einem Druckbereich von 186 m² und ohne Installation und Montage vor Ort mit 550.000 \$. Unter Annahme des aktuellen Wechselkurses (Stand 19.02.2022: 1,1316) entspricht dies einem Betrag von 486.000 €. Unter erneuter Berücksichtigung der Nettogeschoßfläche des Referenz-Einfamilienhauses von 140 m² ergibt sich ein Abschlag von 33 % und folglich reine Gerätekosten in Höhe von 366.000 € exklusive Nebenkosten.¹¹⁵ Beide Werte, 374.000 € und 366.000 € befinden sich in einer ähnlichen Bandbreite und können somit als Referenzpreis für die reine Gerätekosten für das Drucken einer 140 m² großen Druckfläche herangezogen werde. Der Durchschnittswert beläuft sich auf 370.000 €.

Gantry Drucker für 140 m ² Nettogeschoßfläche	in € (netto)
Gerätekosten	Ø 370.000
Nebenkosten (Steuerung, Betonmischer, Zwischenlagersilo)	77.000
Gesamtkosten	447.000

Tabelle 9: Kostenaufstellung für einen Gantry Drucker

Der Gantry Drucker kann laut Herstellerangaben für mindestens 1.200 Druckdurchläufe verwendet werden und muss nach jeder 25-ten Anwendung gewartet werden. Die Wartungskosten werden ohne außerordentliche Reparaturen nach jedem 25-ten Druckdurchlauf mit insgesamt 13.000 € beziffert oder anteilig mit 600 € pro Druckdurchlauf. Darüber hinaus sind ebenfalls die Kosten für die Baustelleneinrichtung zu berücksichtigen. Um die Stabilität des Gantry Druckers sicherzustellen, ist es notwendig die Gerüstpfeiler über ein Betonfundament im Boden zu verankern. Für einen Druckbereich von 140 m² ist die Installation von sechs¹¹⁶ Betonfundamenten notwendig, wodurch damit verbundene Kosten in Höhe von 4.000 - 5.000 € anfallen.¹¹⁷

¹¹⁵ Vgl. Apis Cor, 2021 online.

¹¹⁶ Vgl. COBOD International A/S, 2022 online.

¹¹⁷ Vgl. Apis Cor, 2021 online.

Kosten Polar Drucker

Die reinen Gerätekosten für einen Polar Drucker werden laut Hersteller mit 180.000 \$ inklusive der Kosten für die Steuerung, den Betonmischer und das Zwischenlagersilo angegeben. Unter Annahme des aktuellen Wechselkurses (Stand 19.02.2022: 1,1316) entspricht dies umgerechnet 159.000 €. Da der Polar Drucker über einen ausfahrbaren Teleskoparm verfügt, kann dieser grundsätzlich eine Druckfläche von 140 m² abdecken, muss dafür aber jeweils neu positioniert werden. Die Abbildung 27 zeigt eine Druckfläche von 186 m² und eine viermalige Neupositionierung, um diesen Bereich zur Gänze bedrucken zu können.¹¹⁸ Aus konservativer Sicht wird bei der etwas kleineren Druckfläche von 140 m² des Referenz-Einfamilienhauses ebenfalls von einer viermaligen Neupositionierung ausgegangen.

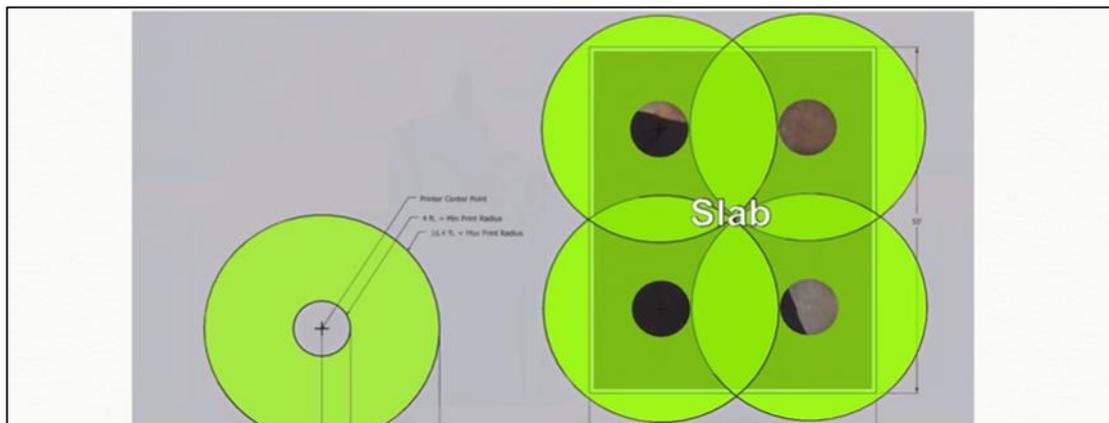


Abbildung 27: Positionen eines Polar Druckers, um einen Druckbereich von 186 m² abzudecken

Der Polar Drucker hat laut Herstellerangaben eine Lebensdauer von bis zu 5.000 Druckdurchläufe und muss nach jeder 100-ten Anwendung gewartet werden. Die Wartungskosten werden ohne außerordentliche Reparaturen mit insgesamt 8.800 € beziffert oder anteilig mit 88 € pro Druckdurchlauf.¹¹⁹ In weiterer Folge fallen keine weiteren Kosten für die Baustelleneinrichtung an, da dieser Druckertyp sofort einsatzbereit ist und im Gegensatz zu einem Gantry Drucker keine zusätzlichen Betonfundamente benötigt werden.

¹¹⁸ Vgl. Apis Cor, 2021 online.

¹¹⁹ Ebd.

Polar Drucker für 140 m ² Nettogeschoßfläche	in € (netto)
Gerätekosten	Ø 159.000
Nebenkosten (Steuerung, Betonmischer, Zwischenlagersilo)	inklusive
Gesamtkosten	159.000

Tabelle 10: Kostenaufstellung für einen Polar Drucker

4.1.5. Herstellungskosten

Die Herstellungskosten setzen sich jeweils aus Materialkosten, Lohnkosten und sonstige Kosten zusammen. Studie 2 führt in den Herstellungskosten auch Gerätekosten an, die eine Vergleichsanalyse erschweren.

Studie 1 analysiert die Herstellungskosten eines Spritzbetonverfahrens (siehe Kapitel 2.2.2) im Detail und vergleicht dabei eine sogenannte „Mesh Mould Wall“¹²⁰ mit einer herkömmlichen Stahlbetonwand. In Summe werden vier Wände mit gleichem Volumen und gleicher Funktionalität miteinander verglichen: [1] eine gerade und [2] eine doppelt-gebogene Wand mittels Massivbauweise, sowie [3] eine gerade und [4] eine doppelt-gebogene Wand mittels Spritzbetonverfahren. Bei gleichbleibendem Volumen von 4,39 m³, betragen die Bandbreiten der Höhe der jeweiligen Wand zwischen 2,50 m und 2,80 m und jene der Länge zwischen 11,70 m und 12,20 m. Die Gesamtfläche je nach Form der Wand erstreckt sich demzufolge zwischen 58,80 m² und 69,60 m². Die Angaben werden vorwiegend in m³ gemacht, so auch bei den Herstellungskosten, weshalb eine Umrechnung auf m² erfolgt, um eine Vergleichbarkeit mit den anderen Studien zu gewährleisten. Als Wandstärke für eine Umrechnung wird mit 0,3 m kalkuliert.¹²¹

García de Soto et al. unterstreichen bei Studie 1 zudem, dass es sich um ein reines Experiment handelt und es nicht rational erscheint, die Kosten auf ein kommerzielles Projekt umzulegen. Dies spiegelt sich auch in den Herstellungskosten¹²² wider, die 435 € pro m² für eine gerade Wand und durchschnittlich 3.295 € pro m² für eine doppelt-gebogene Wand mittels Massivbauweise betragen. Unter Anwendung des robotergestützten Spritzbetonverfahrens liegen die durchschnittlichen Kosten bei

¹²⁰ Definition: Die Mesh Mould Wall ist eine tragende Freiform-Stahlbetonwand, die vor Ort mittels Spritzbetonverfahren hergestellt wird. Dabei wird die gerüstartige Bewehrung vom Drucker erstellt und anschließend mit Ortbeton ausgefüllt und glattgestrichen.

¹²¹ Vgl. García de Soto, et al., 2018, S. 299 ff.

¹²² Annahme: Wandstärke 30 cm und Wechselkurs USD/EUR von 1,1316.

1.332 € pro m² für eine gerade Wand und 1.403 € pro m² für eine doppelt-gebogene Wand.¹²³

Bei einem Vergleich der Referenzwände untereinander zeigt sich, dass bei geraden Wänden kein wirtschaftlicher Vorteil besteht auf einen roboterarm gestützten 3D-Druck umzusteigen, da die Kosten pro m² nahezu um das 3-fache höher sind als jene einer konventionellen Massivbauweise. Betrachtet man hingegen die Möglichkeiten der Formfreiheit des 3D-Drucks, ist festzustellen, dass bei steigender Komplexität das Spritzbetonverfahren – im Speziellen bei der Herstellung einer doppelt-gebogenen Wand – signifikante Kostenersparnisse gegenüber etablierten Bauweisen entstehen. Studie 1 errechnet hier Reduktionen von bis zu 56,8% gegenüber der Massivbauweise und hebt die großen Vorteile bei zunehmender Komplexität hervor.¹²⁴

Auf Basis der Annahmen von García de Soto et al. können die reinen Herstellungskosten für den Rohbau eines Referenz-Einfamilienhauses mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m² und Wandhöhen von 2,70 m mittels Spritzbetonverfahren zwischen 500.000 und 530.000 € errechnet werden.

Kalkulation: Herstellungskosten von 1.332 € pro m² x Wandhöhe 2,70 m x Nettogeschoßfläche 140 m² = 503.496 €; Herstellungskosten von 1.403 € pro m² x Wandhöhe 2,70 m x Nettogeschoßfläche 140 m² = 530.334 €

Studie 2 analysiert die Herstellungskosten des CONPrint3D-Verfahren (eine Grobfilamentablage die auf dem Extrusionsverfahren basiert, siehe Kapitel 2.2.2) im Detail. Durch das Drucken von rohbaufertigen Wänden und praxistauglichen Grundrissen, hebt sich dieses Verfahren optisch von anderen Extrusionsverfahren ab, bei denen oftmals gebogene Wände oder runde Innen- und Außenecken erzeugt werden. Der wirtschaftliche Vergleich der 3D-gedruckten Herstellungskosten erfolgt gegenüber den konventionellen Wandsystemen [1] Kalksand-Stein-Mauerwerk, [2] Ziegelmauerwerk und [3] Stahlbeton. Für die Analyse dient jeweils eine 1 m² große Referenzwand. Laut Otto, Kortmann, & Krause handelt es sich dabei um in der Praxis typischerweise vorzufindende Konstruktionen für tragende Wände. In der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wird eine baukonstruktive und statische Gleichwertigkeit der vier Wandsysteme unterstellt, obgleich etwaiger Unterschiede beispielsweise beim Wärmedurchgangskoeffizient. Die Kosten für Bewehrungen

¹²³ Vgl. García de Soto, et al., 2018, S. 299-305.

¹²⁴ Ebd.

werden im CONPrint3D-Verfahren ebenfalls nicht berücksichtigt, da diesen kein großer Einfluss auf die Druckfestigkeit beigemessen wird. Besonders hervorzuheben ist, dass Studie 1 die Gerätekosten für den Drucker selbst nicht einkalkuliert, sondern separat mittels einer Break-Even-Analyse das maximale Kostenbudget für die Anschaffung eines 3D-Druckers ermittelt.¹²⁵

Die Herstellungskosten für eine gedruckte Wand mittels CONPrint3D-Verfahren werden mit 30,64 € pro m² bemessen. Werden die einzelnen Referenzwände nun gegenübergestellt, zeigt Studie 2, dass die Herstellungskosten der CONPrint3D-Wand am geringsten sind. Bildet man einen Durchschnitt aus den Herstellungskosten von [1] Kalksand-Stein-Mauerwerk, [2] Ziegelmauerwerk und [3] Stahlbeton, ergibt dies einen Kostenvorteil der 3D-gedruckten Wand gegenüber konventionellen Wandsystemen von 56,2%. Der Kostenvorteil gegenüber einer Betonwand beträgt gar 66,8%.¹²⁶ In Studie 2 werden die Herstellungskosten von 30,64 € m² jedoch für eine Wand mit einer Wandstärke von 0,2 m berücksichtigt. Da das in dieser Arbeit untersuchte Referenz-Einfamilienhaus (siehe Kapitel 3.1.) eine Wandstärke von 0,3 m aufweist, werden die Herstellungskosten angepasst und können demnach mit 45,96 € pro m² berechnet werden. Es gilt nochmals darauf hinzuweisen, dass darin keine anteiligen Gerätekosten berücksichtigt sind.

Auf Basis der Annahmen von Otto, Kortmann, & Krause können die reinen Herstellungskosten für den Rohbau eines Referenz-Einfamilienhauses mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m² und Wandhöhen von 2,70 m mittels 3D-Druck-Verfahren auf 17.000 € errechnet werden.

Kalkulation: Herstellungskosten von 45,96 € pro m² x Wandhöhe 2,70 m x Nettogeschoßfläche 140 m² = 17.373 €

Studie 3 widmet sich ebenfalls dem Extrusionsverfahren. Dabei vergleichen Batikha, et al. den Wandaufbau unter Verwendung eines Gantry Druckers sowie eines roboterarm Druckers (siehe Kapitel 2.4.1.) mit vier weiteren Bauweisen. Für eine bessere Vergleichbarkeit mit Studie 1 und Studie 2, wird vorrangig der Unterschied des 3D-Druck-Verfahrens zu einem Wandaufbau aus Stahlbeton herausgearbeitet und die weiteren in der Studie erwähnten Wandsysteme vernachlässigt. Die Vergleichsanalyse erfolgt auf Basis eines fiktiven zweistöckigen Gebäudes mit einer Nettogeschoßfläche von 219 m². Dadurch wird versucht die Kostenanalyse

¹²⁵ Vgl. Otto, Kortmann, & Krause, 2020, S. 589-592.

¹²⁶ Ebd.

praxisnäher zu gestalten und nicht nur kleinere Wandausschnitte zu betrachten.¹²⁷ Die Annahmen aus Studie 3 werden ebenfalls auf das in dieser Arbeit verwendete Referenz-Einfamilienhaus mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m² umgelegt.

Die Herstellungskosten des 3D-Druck-Verfahrens in Studie 3 werden ohne Bewehrungen und ohne Schalungen kalkuliert. Aufgrund der hohen Festigkeit des Betongemisches hat das Fehlen einer Bewehrung laut den Autoren keine negativen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Wandelemente und kann für einen effektiven Vergleich mit der Massivbauweise herangezogen werden. Es ist diesbezüglich hinzuweisen, dass der Wandaufbau aus Stahlbeton sehr wohl Bewehrungen verwendet und dies in den Annahmen zu berücksichtigen ist.¹²⁸

Gemäß Studie 3 betragen die Herstellungskosten¹²⁹ des Extrusionsverfahrens unter Anwendung eines Gantry Druckers 602 € pro m³. Bei einer angenommenen Wandstärke von 0,3 m (wie auch in Studie 1 und Studie 2), lassen sich die Herstellungskosten mit 181 € pro m² beziffern. Eine kürzere Bauzeit, die mit Hilfe des 3D-Drucks verwirklicht werden kann, soll die Kosten zusätzlich senken, da dadurch die Baunebenkosten, wie etwa Personalkosten, ebenfalls geringer ausfallen. So stellt diese Studie fest, dass der 3D-Druck eine um durchschnittlich 95 % kürzere Bauzeit als die Massivbauweise aufweist. Bei den reinen Herstellungskosten ist der 3D-Druck um 14% teurer als die Massivbauweise mit Stahlbeton, bezieht man jedoch die kürzere Bauzeit in die Kalkulation mit ein, ist der 3D-Druck gar um 10% günstiger.¹³⁰

Auf Basis der Annahmen von Batikha, et al. belaufen sich die reinen Herstellungskosten für den Rohbau eines Referenz-Einfamilienhauses mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m² und Wandhöhen von 2,70 m mittels 3D-Druck-Verfahren auf ungefähr 68.000 €.

Kalkulation: Herstellungskosten von 181 € pro m² x Wandhöhe 2,70 m x Nettogeschoßfläche 140 m² = 68.418 €

¹²⁷ Vgl. Batikha, Jotangia, Yasser Baaj, & Mousleh, 2022, S. 2-4.

¹²⁸ Ebd.

¹²⁹ Annahme Wandstärke 30 cm und Wechselkurs USD/EUR von 1,1316.

¹³⁰ Vgl. Batikha, Jotangia, Yasser Baaj, & Mousleh, 2022, S. 7-12.

4.2. Betrachtung anhand einer Einzelfallstudie

4.2.1. Projektübersicht

Wie bereits erwähnt, umfasst die Einzelfallstudie das erste 3D-gedruckte Gebäude in Österreich, das von den beiden Firmen PERI und STRABAG umgesetzt wurde.¹³¹ Als Ort wurde dabei eine Gemeinde in Niederösterreich gewählt, da die Firma STRABAG dort bereits über Liegenschaften verfügt und die Erweiterung eines bestehenden Büros plante. Aufgrund der jüngsten Entwicklungen im Bereich des 3D-Drucks, entschied man sich, das geplante Büro über ein 3D-Druck-Verfahren zu realisieren und wählte dabei einen Gantry Drucker für die operative Umsetzung vor Ort aus.¹³²

Dieser Zubau umfasst eine Nettogeschoßfläche von rund 125 m² und ist einstöckig konzipiert.¹³³ In Abbildung 28 ist ersichtlich, dass der schichtweise Aufbau des Gebäudes im Erscheinungsbild erhalten bleibt und kein zusätzlicher Außenputz angebracht wird. Dies bedeutet, dass die einzelnen, optisch markanten Filamentschichten des Extrusionsverfahrens nach Fertigstellung sichtbar sind. Diese Vorgehensweise zielt darauf ab, das unverwechselbare Aussehen des 3D-gedruckten Gebäudes zu erhalten und einen gewissen Wiedererkennungswert zu schaffen.¹³⁴



Abbildung 28: Entwurf des 3D-gedruckten Zubaus

Eines der großen Potentiale des 3D-Drucks besteht darin ein Projekt in einer kürzeren Bauzeit als herkömmliche Bauprojekt abzuwickeln. Bei diesem konkreten Projekt hat

¹³¹ Vgl. STRABAG SE, 2021a, online.

¹³² Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

¹³³ Vgl. STRABAG SE, 2021a, online.

¹³⁴ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

sich die Projektleitung jedoch dafür entschieden, die Bauzeit über mehrere Monate zu erstrecken, um die einzelnen Projektfortschritte auch der Öffentlichkeit bzw. der Presse zugänglich zu machen. So wurde im November 2021 ein „Tag der offenen Tür“ veranstaltet, um eine direkte Besichtigung zu ermöglichen.¹³⁵ Unterhalb sind einige Eindrücke des ersten 3D-gedruckten Gebäudes in Österreich festgehalten.



Abbildung 29: Seitenansicht der Baustelle in Niederösterreich



¹³⁵ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

Abbildung 30: Wandaufbau inklusive des Fensteranschlusses (links); Ecke des gedruckten Gebäudes und Darstellung der einzelnen Druckperioden, erkennbar aufgrund unterschiedlicher Betonfärbungen (rechts)



Abbildung 31: Eines von insgesamt sechs Betonfundamenten für den Gantry Drucker (links); Hohlraum zwischen den gedruckten Filamentschichten mit minimaler Bewehrungen und dünne Spangen, die eine vertikale Bewegung verhindern sollen (rechts)



Abbildung 32: Grundriss in Form eines Kleeblattes¹³⁶

Wie oberhalb ersichtlich war zum Zeitpunkt der Besichtigung im November etwa die Hälfte des Rohbaus fertig gestellt. Der Druckprozess wurde im Laufe des Projekts

¹³⁶ STRABAG SE, 2021,online.

immer wieder unterbrochen, um den Beton etwas aushärten zu lassen und die Festigkeit für weitere Filamentschichten zu gewährleisten. Im Anschluss daran wurde ein Kleber bzw. ein Bindemittel aufgetragen und die nächsten Teilabschnitte horizontal gedruckt. Aus diesem Grund lassen sich die unterschiedlichen Betonfärbungen, teils heller oder dunkler, erklären. Dies hat keine negative Auswirkungen auf die Druckfestigkeit, erhöht aber die Wahrscheinlichkeit für leichte Rissbildungen.¹³⁷

4.2.2. Grundrissplan und Schnittdarstellung

Der Grundrissplan in Abbildung 34 zeigt die einzelnen Wandelemente die unter Anwendung des Gamy Druckers hergestellt werden. Auf den ersten Blick fallen die Formfreiheit und der markante Grundriss auf, der an die Umrisse eines Kleeblattes erinnern soll. Bis auf den Kernbereich des Gebäudes finden sich keine geraden Wandelemente in dem Plan. Die Ecken des Gebäudes sind stark abgerundet und die Außenwände leicht nach innen gebogen. Bei der Farbcodierung ist folgendes zu beachten: Sämtliche Wandelemente in *hellgrün* sind 3D-gedruckte, tragende Wände, die mit einer minimalen Bewehrung in Form von Eisenstäben ausgestattet sind und im Anschluss mit Ortbeton ausgefüllt werden (siehe Abbildung 31, rechts). Gemäß den Erkenntnissen aus Kapitel 4.1.5. wäre die Druckfestigkeit auch ohne den Ortbetonkern gewährleistet. Die Projektleitung hat sich jedoch für das Ausfüllen mit Ortbeton entschieden, um den österreichischen Baunormen besser zu entsprechen und baubehördliche Prozesse zu vereinfachen.¹³⁸



Abbildung 33: Ausfüllen der 3D-gedruckten Wände mit Ortbeton

¹³⁷ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

¹³⁸ Ebd.

Bei den Wandelementen in *orange* handelt es sich um eine 3D-gedruckte nichttragende Außenschale, die an die tragende Innenschale angeschlossen wird und ausschließlich für den Wärmeschutz vorgesehen ist. Nach dem Aushärten der Wandelemente der Außenschale wird der Hohlraum mit einer Einblasdämmung befüllt, um eine den Witterungsverhältnissen entsprechende Wärmedämmung zu gewährleisten.¹³⁹ Da es sich hier, wie bereits erwähnt, bei den Außenwänden um ausschließlich gebogene Wandelemente handelt, ist die Verwendung konventioneller Dämmmaterialien wie beispielsweise gerader Styropor-, Schaum- oder Steinwolleplatten nicht möglich. Das Ausweichen auf eine Einblasdämmung erscheint daher als einzige Möglichkeit einen funktionierenden Wärmeschutz herzustellen.

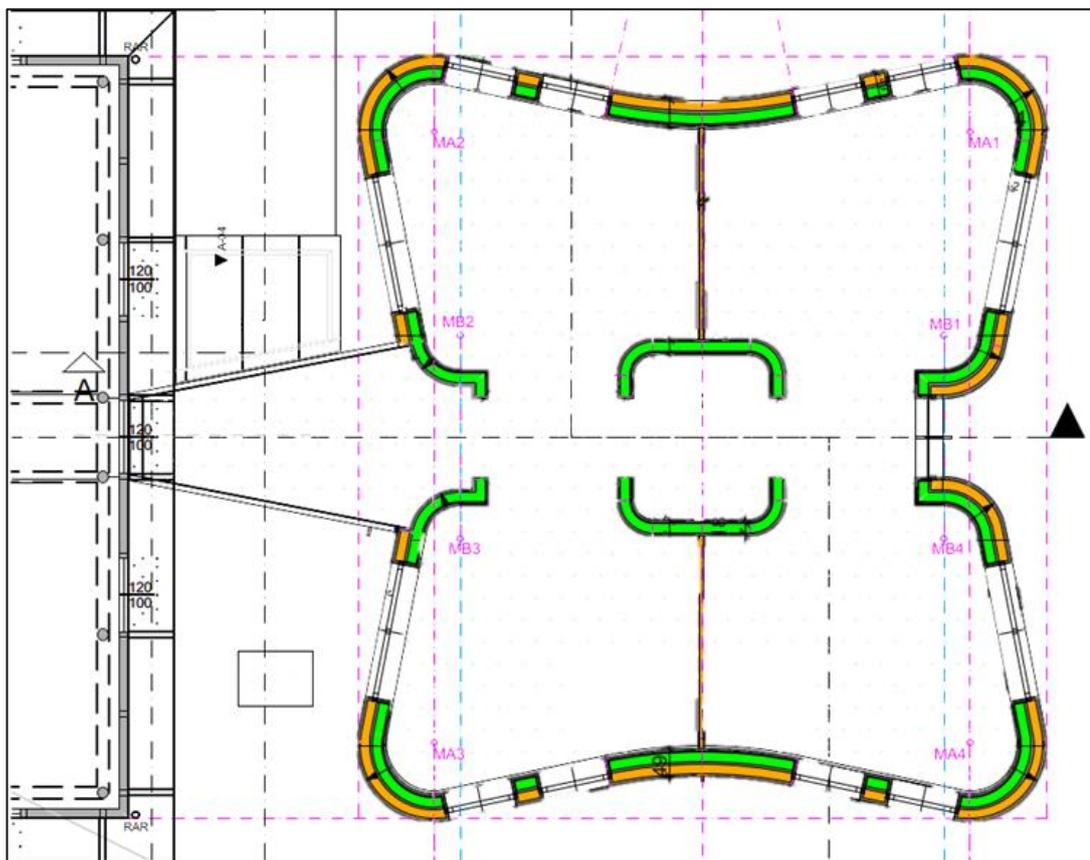


Abbildung 34: Grundrissplan in Form eines Kleeblattes

Um einen besseren Überblick zur Gebäudestruktur und -höhe zu erhalten, ist in Abbildung 35 eine Schnittdarstellung abgebildet. Darin ist ersichtlich, dass es sich um ein einstöckiges Gebäude mit einem Flachdach handelt. Des Weiteren sind weder ein Keller noch Sanitäreanlagen vorgesehen.¹⁴⁰ Die tragende Innenschale, sowie die nicht

¹³⁹ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

¹⁴⁰ Ebd.

tragende Außenschale sind mit derselben Farbcodierung wie bereits in Abbildung 34 dargestellt. Zusätzlich sind in *dunkelgrün* sowohl die Boden-, also auch die Deckenplatten eingezeichnet. Bei sämtlichen Elementen, die *violett* gekennzeichnet sind, handelt es sich um eine Fußbodendämmung sowie eine zweilagige Wärmedämmung des Flachdaches.

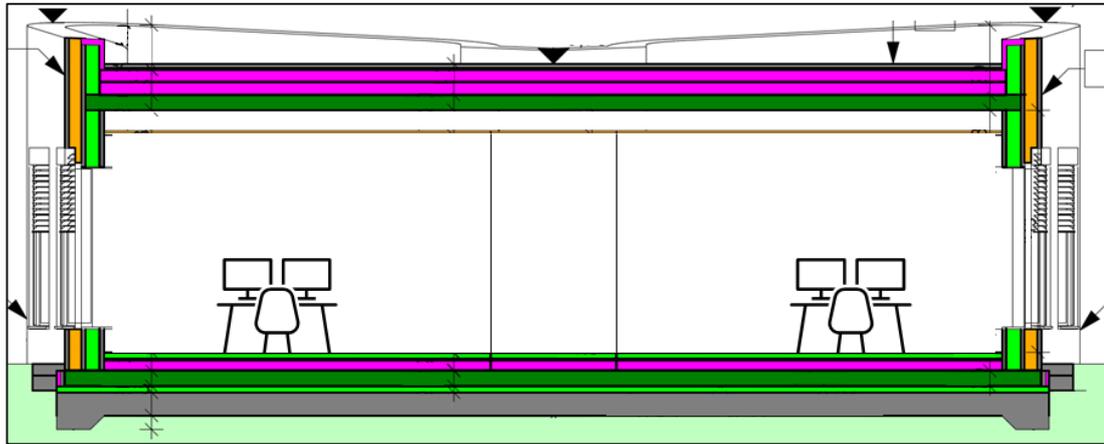


Abbildung 35: Schnittdarstellung

4.2.3. Wandschnitt

Um das Prinzip des im Rahmen dieses Projekts gewählten Wärmeschutzes zu veranschaulichen, wird unterhalb eine Detailbeschreibung angeführt. Abbildung 36 zeigt die Details der zweischaligen Außenwand mit Ortbetonkern, welche die 3D-gedruckte Außenschale (*grau*) und die 3D-gedruckte Schalung (*orange*) darstellt. Der Ortbetonkern (*hellgrün*) wird in die 3D-gedruckte Schalung gegossen, um ein tragendes Innenwandelement herzustellen und die Druckfestigkeit sicherzustellen. Der Wärmeschutz (*gelb*) wird, wie bereits erwähnt, in die nicht tragende Außenschale mittels Einblasdämmung eingebracht.



Abbildung 36: Detail zu zweischaliger Außenwand mit Ortbetonkern

4.2.4. Betongemisch

Als Betongemisch für die Herstellung des Rohbaus wurde das Produkt „Tector® 3D Build“ der Firma Lafarge in Zusammenarbeit mit der Firma HOLCIM gewählt, das eine lange Verarbeitbarkeit und gute Pumpbarkeit garantiert. Das Material wird nicht in Österreich produziert und ist für das Projekt importiert worden.¹⁴¹ Eine genaue Produktbeschreibung zu „Tector® 3D Build“ lautet gemäß der Firmenwebsite wie folgt:

„This new product range includes both cement and natural hydraulic lime solutions and covers convert pressure levels between 2 MPa up to 90 MPa - for high print speed capacity. Tector 3D Build is flexible and can adapt to a wide variety of customer needs, in both residential and infrastructure projects. As 3D printing technology uses only the materials the building requires, it helps optimize the amount of materials used and minimize errors in the construction work.“¹⁴²

4.2.5. Personalkosten

Da es sich bei einem Gantry Drucker um ein höchst innovatives Baugerät handelt, wird dieses auch von spezialisierten Fachkräften bedient, die über die notwendigen Fähigkeiten hinsichtlich Softwarelösungen und Maschinenbautechnik verfügen. Der Einsatz dieser hochqualifizierten Arbeitskräfte verursacht dadurch höhere Personalkosten als jene von Sacharbeitern. Ungeachtet dessen wurden günstigere Sacharbeiter ebenfalls für die Abwicklung des Bauvorhabens benötigt. Hinsichtlich der Personenanzahl wurden im Zuge dieses Projekts drei spezialisierte Facharbeiter für die Bedienung des 3D-Druckers und zwei bis drei Sacharbeiter für ergänzende und klassische Arbeiten, wie etwa Betonieren oder Schalen, eingesetzt.¹⁴³ Diese Anzahl an Arbeitskräften spiegelte also nicht jene Zahl wider, die für den 3D-Druck grundsätzlich vorgesehen ist. In Zukunft wird davon ausgegangen, dass bei einer kommerziellen Nutzung zwei Arbeitskräfte an der Baustelle vor Ort ausreichend sind.¹⁴⁴ Bei einem Projekt in dieser Größenordnung ist eine effiziente Personalauslastung ebenfalls wichtig. Da in der Umgebung der Baustelle ein Ausweichprojekt vorhanden war, konnte die Personalauslastung dementsprechend optimiert werden.¹⁴⁵

¹⁴¹ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

¹⁴² Vgl. HOLCIM, 2020 online.

¹⁴³ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

¹⁴⁴ Ebd.

¹⁴⁵ Ebd.

4.2.6. Materialkosten

Die Materialkosten können mit 360 € pro Tonne zuzüglich 40 € bis 90 € Transportkosten beziffert werden. Da das Betongemisch, wie bereits erwähnt, importiert wurde, könnten Einsparungspotentiale durch eine regionale Erzeugung dieses Produktes erzielt werden.¹⁴⁶

Aufgrund dieser Preisangaben für das Betongemisch lässt sich eine Grobschätzung für die Materialkosten des Rohbaus abgeben. Es ist jedoch festzuhalten, dass damit keine Personalkosten, Gerätekosten oder sonstige Kosten berücksichtigt werden können. Die Rohbaukosten sollen nun unter Anwendung eines stark vereinfachten Rechenbeispiels anhand einer fiktiven Einheit von 40 kg Fertigbeton hergeleitet werden: Gemäß dieser Angaben ist von ungefähr 21 Liter Beton auszugehen, wenn eine 40 kg Betonmischung mit entsprechender Menge Wasser vermischt wird. Da 1 m³ über ein Volumen von 1.000 Liter verfügt, ist im Anschluss 1.000 / 21 zu dividieren. Bei dieser Rechnung erhält man den Bedarf von aufgerundet 48 Säcken Fertigbeton zu je 40 kg oder insgesamt 1.920kg Fertigbeton-Mischung pro m³.¹⁴⁷

Bei Materialkosten von 360 € pro Tonne ergibt dies folglich 691,20 € ohne Transportkosten pro m³ Betongemisch für den 3D-Druck.¹⁴⁸ Unter Berücksichtigung der Transportkosten kann der Betrag zwischen 768 € pro m³ und 864 € pro m³ beziffert werden, also im Durchschnitt 816 € pro m³. Bei einer Wandstärke von 0,3 m (ohne Berücksichtigung etwaiger Hohlräume für das Auffüllen von Ortbeton) kann von 207,36 € pro m² exklusive und durchschnittlich 244,80 € pro m² inklusive Transportkosten ausgegangen werden.

Auf Basis dieser vereinfachten Annahmen können die reinen Materialkosten inklusive Transport (jedoch ohne: Personalkosten, Gerätekosten oder sonstigen Kosten), für den Rohbau eines Referenz-Einfamilienhauses mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m² und Wandhöhen von 2,70 m mittels 3D-Druck-Verfahren auf 92.000 € errechnet werden.

Kalkulation: Materialkosten von 244,80 € pro m² x Wandhöhe 2,70 m x Nettogeschoßfläche 140 m² = 92.534 €

¹⁴⁶ Ebd.

¹⁴⁷ Vgl. Beco Treat Aps, 2022 online.

¹⁴⁸ Annahme für Kalkulation: 360 € pro Tonne x Faktor 1,92 = 691,20 € pro m³.

Dabei handelt es sich um eine sehr vereinfachte Kalkulation und diese ist daher mit entsprechender Vorsicht zu betrachten, gibt aber einen groben Richtwert für die Materialkosten des Referenz-Einfamilienhauses vor.

4.2.7. Herstellungskosten

Da es sich um ein reines Pilot- bzw. Forschungsprojekt handelt, stand die Wirtschaftlichkeit nicht im Vordergrund. Die zum Teil in der Fachliteratur angegebenen kürzeren Druckzeiten konnten nur bedingt erreicht werden, da hier weder Vorbereitungszeiten (u.a. für das Einstellen der Konsistenz des Druckmaterials oder das Justieren des 3D-Druckers), Nachbereitungszeiten (u.a. Spülen und Reinigen der Anlage), Anreisezeiten oder gegebenenfalls Stehzeiten für Trocknungen oder Betonierarbeiten eingerechnet sind. STRABAG möchte grundsätzlich keine genauen Angaben zu den Herstellungskosten machen, nennt jedoch Bandbreiten. Die Herstellungskosten betragen das 3-4-fache im Vergleich zu einer Herstellung eines ähnlichen Gebäudes in Massivbauweise.¹⁴⁹

Es ist daher festzustellen, dass sich beim jetzigen technologischen Stand noch keine monetären Kostenersparnisse aus dem Faktor Zeit, sprich einem schnelleren Bauen, oder dem Einsatz von optimierten Betongemischen ergeben.

Wichtig zu erwähnen ist: In diesen Herstellungskosten sind die Kosten des gesamten Bauablauf (siehe Kapitel 2.1.3.) ohne Planungskosten enthalten. Eine grobe Kostenschätzung für die Vergleichsanalyse wurde daher in Kapitel 4.2.6. lediglich auf Basis der Materialkosten erstellt.

¹⁴⁹ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

5. Darstellung der Ergebnisse der Arbeit

Im Anschluss an das vorherige Kapitel 4. wird nun versucht die Erkenntnisse der Studien 1-3 in eine Beziehung zur Einzelfallstudie zu setzen. Dabei sind auch nochmals die unterschiedlichen Annahmen der einzelnen Studien zu berücksichtigen. Die Auswertung selbst soll auf Basis der Personalkosten, Materialkosten und Herstellungskosten erfolgen.

5.1. Auswertung

5.1.1. Personalkosten

In Österreich betragen die durchschnittlichen Arbeitskosten 36,70 € pro Arbeitsstunde.¹⁵⁰ Die Arbeitskosten für spezialisierte Fachkräfte für die Steuerung eines 3D-Druckers werden vom Autor ähnlich wie in Studie 2 als doppelt so hoch mit 73,40 € pro Arbeitsstunde angenommen. Unter Berücksichtigung des anfallenden Arbeitsaufwandes an der Baustelle vor Ort wurde ein durchschnittlicher Stundensatz¹⁵¹ von 49,90 € pro Arbeitsstunde kalkuliert. Obwohl die Studien 1-3 zwischen den Jahren 2018 und 2022 erstellt wurden, werden aus Gründen der Vereinfachung keine Inflationsanpassungen durchgeführt.

Personalkosten	Studie 1	Studie 2	Studie 3	Einzelfallstudie
Tagessatz netto laut Kapitel 4.1.2 und 4.2.5	693 €	840 €	9,8 h / m ²	keine Angabe
Anzahl Arbeitskräfte vor Ort	3-4	2	3	5-6
Fiktiver Tagessatz netto in Österreich mit \emptyset 49,40 € pro Arbeitsstunde	1.198 € - 1.597 €	798 €	1.198 €	1.996 € - 2.395 €

Tabelle 11: Auswertung der Personalkosten anhand der Studien 1-3

In Tabelle 11 werden die Tagessätze und die Anzahl der Arbeitskräfte aus den einzelnen Studien aufgelistet, und im Anschluss in ein Verhältnis zu der

¹⁵⁰ Vgl. Wirtschaftskammer Österreich, 2021 online.

¹⁵¹ Annahme für Kalkulation: 2 Fachkräfte á 36,70 und 1 spezialisierte Fachkraft á 73,40€ = 49,90 € pro Arbeitsstunde.

durchschnittlichen Arbeitskosten in Österreich gesetzt. Die Basis bildet hier ein 8-Stunden-Arbeitstag.

In Betrachtung des Standortes Österreich würden somit bei einem Einsatz von zwei bis vier Arbeitskräften, Tagessätze in der Bandbreite zwischen 798 € und 1.597 € anfallen. Diese Annahmen liegen teilweise höher als jene in den Studien 1-3 getroffenen Werte, einzig Studie 2 geht von zwei Arbeitskräften und einem ähnlichen Lohnniveau aus. Die Einzelfallstudie hat an der Baustelle vor Ort 5-6 Arbeitskräfte eingesetzt, wodurch sogar die 3-fachen Personalkosten zu Studie 2 anfallen würden.

Die Anzahl jener Personen, die für den Einsatz vor Ort an der Baustelle benötigt werden, bietet daher aus Sicht des Autors noch eine gewisse Unschärfe. Es wird davon ausgegangen, dass bei einer kommerziellen Nutzung des 3D-Drucks zwei Arbeitskräfte ausreichend sind.¹⁵² Unter dieser Annahme kann also bei einer 3D-Druck Baustelle in Österreich mit Personalkosten in Höhe von 798 € (d.h. ein Tagessatz für zwei Arbeitskräfte) kalkuliert werden.

Studie 3 stellt fest, dass der 3D-Druck eine um durchschnittlich 95 % kürzere Bauzeit als die Massivbauweise aufweist.¹⁵³ Rechnet man dies nun gegen unter der Annahme, dass der oberhalb erwähnte österreichische Tagessatz von 798 € auf 5% der Bauzeit umgelegt werden kann, bedeutet dies, dass die Personalkosten für den Rohbau eines Einfamilienhauses in der Massivbauweise mit 15.960 € zu kalkulieren sind. Zur Verifizierung dieser Annahme wird eine Gegenprobe durchgeführt: Auf Basis mehrerer Quellen kann die durchschnittliche Bauzeit eines Rohbaus in der Massivbauweise mit 3-4 Wochen angeführt werden.¹⁵⁴ Unter Annahme einer normalen Arbeitswoche von 5 Arbeitstagen und arbeitsfreien Wochenenden, beträgt die Bauzeit demnach 15-20 Tage. Multipliziert man den oberhalb kalkulierten österreichischen Tagessatz von 798 € nun mit dieser Anzahl an Tagen, errechnet sich ein Wertebereich zwischen 11.970 € und 15.960 €. Da die berechneten Werte in einer ähnlichen Bandbreite liegen, lässt sich schlussfolgern, dass in Studie 3 ebenfalls von einer Bauzeit zwischen 15-20 Tagen ausgegangen wird.

Aus konservativen Gesichtspunkten leitet der Autor daraus ab, dass für den Rohbau eines Einfamilienhauses in der Massivbauweise Personalkosten in Höhe von 15.960

¹⁵² Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview. & Otto, Kortmann, & Krause, 2020, S. 592.

¹⁵³ Vgl. Batikha, Jotangia, Yasser Baaj, & Mousleh, 2022, S. 7-12.

¹⁵⁴ Vgl. Hausbauberater, 2022 online. & Vgl. Weissenseer, 2022 online. & Vgl. Einfamilienhaus, 2022 online.

€ anfallen. Wird die Herstellung eines Rohbaus nun unter Verwendung eines 3D-Druckers mit der Unterstützung von zwei Arbeitskräften vor Ort durchgeführt, ergibt sich ein Einsparungspotenzial gegenüber der Massivbauweise von ungefähr 15.000 € pro Baustelle. Dieser Vergleich unterstellt jedoch, dass bei der Massivbauweise ebenfalls zwei Arbeitskräfte an der Baustelle im Einsatz sind. Ändert man die Anzahl der Arbeitskräfte entsprechend, ist auch das Einsparungspotenzial neu zu evaluieren.

Im Kostenvergleich zu einer 3D-Druck Baustelle in Österreich mit zwei Arbeitskräften, zeigt sich ein Einsparungspotenzial gegenüber der Massivbauweise von ungefähr 15.000 € pro Baustelle aufgrund der kürzeren Bauzeit.

Wie bereits in Kapitel 4.1.2. erwähnt, liegt der Anteil der Personalkosten an den gesamten Herstellungskosten bei mindestens 27% und maximal 70%. Eine Reduzierung der Anzahl an vor Ort eingesetzter Arbeitskräfte ist folglich entscheidend, um eine Kostenreduktion zu erwirken und einen Preisvorteil gegenüber der Massivbauweise zu erzielen.

5.1.2. Materialkosten

Die reinen Materialkosten können im Detail nur anhand von Studie 2 und Studie 3 analysiert werden – Studie 1 kann hier, wie bereits erwähnt, nur bedingt in Betracht gezogen werden, da hier die Materialkosten mit den Herstellungskosten vermischt sind (siehe Kapitel 4.1.1.).

Materialkosten	Studie 1	Studie 2	Studie 3	Einzelfallstudie
Materialkosten 3D-Druck	Keine Angabe	33,15 € pro m ²	68,70 € pro m ²	244,80 € pro m ²

Tabelle 12: Auswertung der Materialkosten anhand der Studien 1-3

Vergleicht man neben den Materialkosten aus Studie 2 und Studie 3 nun auch jene der Einzelfallstudie, sind diese um das 7-fache höher als die Kosten in Studie 2 und um das 4-fache höher als jene in Studie 3. Da es sich bei Studie 2, Studie 3 und der Einzelfallstudie mit dem Extrusionsverfahren um die Anwendung desselben 3D-Druck-Verfahrens handelt, sind diese großen Wertunterschiede durchaus überraschend. Dies kann damit begründet werden, dass es in den Studien unterschiedliche Limitierungen gibt:

- Studie 1 führt an, dass es sich um ein reines Experiment handelt und es nicht rational erscheint, die Kosten auf ein tatsächliches kommerzielles Projekt

umzulegen. Darüber hinaus werden die Materialkosten nicht explizit ausgewiesen und es wird auch eine anderer Druckertyp verwendet.

- In Studie 2 werden die Materialkosten mit einem 30%-igen Kostenaufschlag auf Normalbeton gesehen. Diese Annahme ist aus Sicht des Autors eher konservativ berechnet.
- Studie 3 verwendet Marktdaten, spricht jedoch von einem gewissen Maß an Ungenauigkeit hinsichtlich der Kostendaten.
- Bei der Einzelfallstudie handelt es sich um ein Pilotprojekt, bei dem die Wirtschaftlichkeit nicht im Vordergrund stand. Zudem musste das Material teuer aus dem Ausland importiert werden.

Für eine konkrete wissenschaftliche Aussage sind diese Werte daher mit Vorsicht zu betrachten. Es zeigt sich dennoch, dass sowohl die Einzelfallstudie als auch Studie 3 noch weit von den durchschnittlichen Kosten für Frischbeton (Annahme: Wandstärke 0,3 m) zwischen 20 € pro m² und 30 € pro m² entfernt liegen und somit weniger Anreiz schaffen den 3D-Druck konkret in Erwägung zu ziehen. Vielfach sind es die benötigten Zusatzstoffe und Transportkosten, die für einen Kostenauftrieb sorgen. Die Materialkosten von Studie 2 liegen hier knapp darüber, beinhalten jedoch aus Sicht des Autors eine eher konservative Schätzung hinsichtlich der Kosten für Zusatzmittel.

Bei einem Vergleich der Materialkosten, die im Zuge von 3D-Druck-Verfahren angewendet werden, mit jenen der Massivbauweise zeigt sich ein (teilweise markanter) Preisunterschied, der aktuell weniger Anreiz schafft den 3D-Druck bei der Herstellung des Rohbaus eines Einfamilienhauses in Erwägung zu ziehen. Zusammenfassend ist kein klarer Preisvorteil gegenüber herkömmlichen Beton zu erkennen.

5.1.3. Herstellungskosten

Die Herstellungskosten setzen sich jeweils aus Materialkosten, Lohnkosten und sonstigen Kosten zusammen. Während Studie 2 ohne etwaige Gerätekosten kalkuliert, werden diese in Studie 3 berücksichtigt. Diese unterschiedlichen Annahmen erschweren die Vergleichsanalyse zusätzlich. Tabelle 13 zeigt eine tabellarische Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Kapiteln 4.1.5 bis 4.2.5.

Vergleichsanalyse	Studie 1	Studie 2	Studie 3
Verfahren	Spritzbetonverfahren	Extrusionsverfahren	Extrusionsverfahren

Kernaussagen	Herstellungskosten von 3D-Druck günstiger als konventionellen Wandsystemen bei zunehmender Komplexität	Herstellungskosten von 3D Druck günstiger als herkömmliche konventionellen Wandsystemen	Herstellungskosten von 3D Druck günstiger als Massivbau mittels Stahlbeton jedoch nur durch kürzere Bauzeit und geringen Baunebenkosten
Reduktion in % vs. Massivbauweise	-56,8%	-56,2%	-10,0% (+14,0% ohne Bauzeitverkürzung)
berücksichtigt nicht	Skaleneffekte Dämmungen	Bewehrungen Kosten für Drucker Dämmungen	Dämmungen kleinteilige Referenzwände

Tabelle 13: Auswertung der Herstellungskosten anhand der Studien 1-3

Trotz der teilweise unterschiedlichen methodischen Annahmen schlussfolgern alle drei Studien, dass Kostenvorteile gegenüber der Massivbauweise bestehen. Studie 1 spricht davon, dass bei dem 3D-Druck von geraden Wandsystemen kein wirtschaftlicher Vorteil besteht, der rechtfertigen würde auf einen roboterarm gestützten 3D-Druck umzusteigen. Bei zunehmender Komplexität und Formfreiheit des 3D-Drucks, ist jedoch festzustellen, dass signifikante Kostenersparnisse gegenüber etablierten Bauweisen bestehen. Studie 2 leitet anhand einer 1 m² großen Referenzwand ab, dass die Herstellungskosten von 3D-gedruckten Wänden günstiger sind als jene von herkömmlichen Wandsystemen. Studie 3 errechnet die Kostenvorteile von 3D-gedruckten Gebäuden erst unter der Berücksichtigung einer viel kürzeren Bauzeit und den dadurch geringeren Personalkosten. Es zeigt sich also ein durchaus gemischtes Bild.

Setzt man die Erkenntnisse aus den Studien 1-3 nun in ein Verhältnis zur Einzelfallstudie, können diese Ergebnisse und Hypothesen nicht bestätigt werden. Obwohl in den Studien 1-3 von Einsparungspotenzialen gegenüber der Massivbauweise gesprochen wird, zeigt die Einzelfallstudie ein differenziertes Ergebnis.

Vergleichsanalyse	Einzelfallstudie
Verfahren	Extrusionsverfahren
Kernaussagen	Die Herstellungskosten betragen das 3-4-fache im Vergleich zu deinem Referenzprojekt in Massivbauweise.
berücksichtigt nicht	Es handelt sich hierbei um eine vollumfängliche Betrachtung der Herstellungskosten (!), somit sind auch Vorbereitungszeiten, Nachbereitungszeiten, Anreisezeiten und Stehzeiten berücksichtigt

Tabelle 14: Auswertung der Herstellungskosten anhand der Einzelfallstudie

Es ist darauf hinzuweisen, dass auch die Einzelfallstudie gewissen Limitierungen unterliegt und die Kostenstruktur nicht vollumfänglich vorliegt. Die Angaben von 3-4-fach höheren Kosten im Vergleich zur Massivbauweise stechen besonders hervor, umfassen aber die Kosten des gesamten Bauablaufs (siehe Kapitel 2.1.3.) ohne Planungskosten.¹⁵⁵ Ein Vergleich der Herstellungskosten der Einzelfallstudie mit jenen der Referenz-Einfamilienhäuser in Tabelle 15 ist daher abzulehnen. Sehr wohl können aber die Materialkosten in ein Verhältnis zu den Studien 1-3 gesetzt werden.

Vergleichs-analyse	Studie 1	Studie 2	Studie 3	Einzelfall-studie
Verfahren	Spritzbeton-verfahren	Extrusions-verfahren	Extrusions-verfahren	Extrusions-verfahren
Errechnete Kosten Referenz-Einfamilienhaus	500.000 - 530.000 € (mit Kosten für Drucker)	17.000 € (ohne Kosten für Drucker)	68.000 € (mit Kosten für Drucker)	92.000 € (nur Materialkosten)

Tabelle 15: Auswertung der Herstellungskosten anhand des Referenz-Einfamilienhauses

Bei dem Vergleich der einstöckigen Referenz-Einfamilienhäuser mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m², die anhand der Annahmen aus den Studien 1-3 und der Einzelfallstudie errechnet wurden, zeigt sich in Tabelle 15 ebenfalls ein unterschiedliches Bild. Vernachlässigt man die Herstellungskosten aus Studie 1 unter der Begründung, dass es sich dabei um ein reines Experiment handelt und die Kosten nicht auf ein kommerzielles Projekt umgelegt werden können, besteht ein auffallender Unterschied zwischen den Werten aus Studie 2 und Studie 3. Die nicht

¹⁵⁵ Vgl. Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022, Interview.

berücksichtigten Gerätekosten in Studie 2, können hier nur bedingt als Erklärung angeführt werden. Die Einzelfallstudie aus der Praxis kalkuliert die reinen Materialkosten (nicht Herstellungskosten!) umgelegt auf den Rohbau des Referenz-Einfamilienhauses mit 92.000 €.

Auf Basis mehrerer Quellen können die durchschnittlichen Herstellungskosten eines Rohbaus in der Massivbauweise je nach Ausführung mit 600 € bis 800 € pro m² Nettogeschoßfläche definiert werden. Unter Rohbaukosten versteht man jedoch alle Bauarbeiten von der Einrichtung der Baustelle bis zum Dachstuhl.¹⁵⁶ Im Rahmen dieser Arbeit werden die Kosten für die Errichtung des Rohbaus des Referenz-Einfamilienhauses anhand der Anforderungen aus „Rohbau 1“ (siehe Kapitel 2.1.3.) beurteilt, worin kein Dachstuhl vorgesehen ist. Aus diesem Grund wird ein Abschlag für die Nicht-Errichtung des Dachstuhls in Höhe von 15% einkalkuliert. Die Herstellungskosten eines Rohbaus können somit mit 680 € pro m² Nettogeschoßfläche in der weiteren Kalkulation berücksichtigt werden.

Auf Basis der aktuellen Marktdaten belaufen sich die reinen Herstellungskosten für den Rohbau eines Referenz-Einfamilienhauses mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m² und (Annahme: Wandhöhen von 2,70) m in der Massivbauweise auf ungefähr 95.000 €.

Kalkulation: Herstellungskosten von 680 € pro m² x Nettogeschoßfläche 140 m² = 95.200 €

Nochmals darauf hinzuweisen ist, dass in der Einzelfallstudie lediglich die Materialkosten für die Kalkulation betrachtet wurden. Diese liegen jedoch bereits in einer ähnlichen Bandbreite wie die Herstellungskosten der Massivbauweise, wodurch kein Preisvorteil ersichtlich ist (d.h. 92.000 € versus 95.000 €).

Betrachtet man die errechneten Kosten des Referenz-Einfamilienhauses in der Massivbauweise in Höhe von 95.000 € im Vergleich zu den Werten gemäß Literatur scheinen aus wissenschaftlicher Sicht Kosteneinsparungen von 28% (zu Studie 3) bis hin zu 82% (zu Studie 2, aber ohne Druckerkosten) möglich. Im Vergleich zur Einzelfallstudie, zeigt sich, dass sich Einsparungspotenziale derzeit kaum bis gar nicht materialisieren.

¹⁵⁶ Vgl. OPTIFIN GmbH, 2021 online. & Vgl. schlau-finanziert Finanzierungsvermittlung GmbH, 2020 online. & Vgl. Be Different LLC, 2022 online.

5.2. Interpretation

Für den weiteren Verlauf wird nun eine Aussage aus Studie 2 aufgegriffen:

„Im konkreten Anwendungsfall kann sich die **Rangfolge der Herstellungskosten** für die unterschiedlichen Wandsysteme **durch das Aufbringen einer notwendigen Außenwanddämmung**, die auf die Konstruktion anzupassen ist, **noch verschieben**.“¹⁵⁷

Dies bedeutet, dass bei der reinen Betrachtung der Herstellungskosten des Rohbaus keinerlei Annahmen für die Kosten für Wärmeschutz getroffen werden, obwohl diese aufgrund des Klimas in den mitteleuropäischen Breitengraden, konkret in Österreich, unerlässlich sind. Dieselbe Vorgehensweise ist auch in Studie 1 und Studie 3 zu beobachten, wo ebenfalls auf die Kosten für Wärmedämmung verzichtet wird. Einzig und allein werden die Kosten für Wärmeschutz in der Einzelfallstudie berücksichtigt.

Studie 1 spricht davon, dass der 3D-Druck bei geraden Wandsystemen kein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber roboterarm gedruckten Wandsystemen besteht. Des Weiteren schlussfolgert die Studie, dass bei zunehmender Komplexität und Formfreiheit des 3D-Drucks signifikante Kostenersparnisse gegenüber etablierten Bauweisen zu beobachten sind. Genau hier liegen kostenseitig die Herausforderungen. Je ausgefallener und kreativer die Formen der 3D-gedruckten Wand, umso schwieriger gestaltet sich die Anbringung einer kostengünstigen Wärmedämmung. Je gebogener und runder die einzelnen Wandelemente sind, desto unmöglicher ist eine Anbringung einer Dämmung mittels konventioneller Dämmmaterialien. Beispielsweise können so standardisierte, gerade Styropor-, Schaum- oder Steinwolleplatten keine Anwendung finden. Wie kann also der Wärmeschutz von gebogenen 3D-gedruckten Wänden umgesetzt werden?

Ein Lösungsansatz bietet hier die Verwendung von Schaumglas (z.B. das Produkt Foamglas®) als Dämmmaterial. Die Herstellung und die Eigenschaften von Schaumglas können wie folgt zusammengefasst werden:¹⁵⁸

- Schaumglas ist ein leichter, stabiler und langlebiger Dämmstoff, der sich aus Millionen komplett versiegelter Glaszellen zusammensetzt
- Nichtbrennbarkeit
- überlegene Druckfestigkeit
- garantierte Wasser- und Dampfdichtigkeit

¹⁵⁷ Vgl. Otto, Kortmann, & Krause, 2020, S. 589.

¹⁵⁸ Vgl. Deutsche FOAMGLAS® GmbH, 2022, online.

- langlebige Wärmedämmleistung
- in einer breiten Palette von Formen und Größen verfügbar (z.B. auch Schüttmaterial)

Schaumglas kann beispielsweise als Schüttmaterial in Form von kleinen Kügelchen in den Hohlraum einer 3D-gedruckten Wand eingebracht werden und so den notwendigen Wärmeschutz gewährleisten. Die Firma Apis Cor hat hier eine erste Feldstudie gestartet, die eine vielversprechende Umsetzung erhoffen lässt.¹⁵⁹



Abbildung 37: Einbringen von Schaumglas in Form von kleinen Kügelchen

Ein Herausforderung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit entsteht jedoch aufgrund der Kosten für Schaumglas. Laut Aussagen des Herstellers betragen die Kosten für Foamglas® ungefähr 100 € bis 150 € pro m² bei einer Dämmstärke von 17 cm.¹⁶⁰

Auf Basis der Preisangabe für Foamglas® belaufen sich die Kosten für das Dämmmaterial für den Rohbau eines Referenz-Einfamilienhauses mit einer Nettogeschoßfläche von 140 m² und Wandhöhen von 2,70 m auf ungefähr 38.000 - 58.000 €

Kalkulation: Herstellungskosten von 100 - 150 € pro m² x Wandhöhe 2,70 m x Nettogeschoßfläche 140 m² = 37.800 - 56.700 €

¹⁵⁹ Vgl. Apis Cor, 2021, online.

¹⁶⁰ Vgl. Deutsche FOAMGLAS® GmbH, 2022, online.

Dieser Betrag ist aus Sicht des Autors erheblich und kann dazu führen, dass sich mögliche Kostenvorteile des 3D-Drucks im Vergleich zur Massivbauweise relativieren. Es ist hervorzuheben, dass bei einer zunehmenden Komplexität und Formfreiheit, die den 3D-Druck als Bauverfahren besonders attraktiv macht, mit verhältnismäßig hohen Kosten für die Wärmedämmung zu rechnen ist. Solange es hier keinen kostengünstigeren Ersatz gibt, sind auch keine Einsparungspotentiale bei der Wärmedämmung zu erwarten. Des Weiteren sind die Kosten für den Drucker selbst noch hoch und aus wirtschaftlicher Sicht kann sich eine Anschaffung erst bei einer kommerziellen Anwendung amortisieren. Im Rahmen von Einzelfallstudien oder Pilotprojekten werden die Gerätekosten daher immer den größten Kostenfaktor darstellen.

6. Schlussfolgerungen

Zunächst wurden die am häufigsten verwendeten 3D-Druck-Verfahren evaluiert und aus wissenschaftlicher Sicht beleuchtet. Nachdem die unterschiedlichen Vor- und Nachteile der 3D-Druck Technologien abgewogen wurden, erfolgte eine Eingrenzung auf das Spritzbetonverfahren und das Extrusionsverfahren. Nach Analyse von Studie 1 war erkennbar, dass das Spritzbetonverfahren aufgrund der hohen Kostenaufstellung aktuell noch weniger geeignet für die Praxistauglichkeit ist und eine Augenmerk auf das Extrusionsverfahren zu legen ist. Daraufhin erfolgte eine Sondierung des Marktes und der einzelnen Druckertypen. In Zuge dieser Marktanalyse haben sich sowohl der Gantry Drucker als auch der Polar Drucker als vielversprechende Lösungen für die kommerzielle Umsetzung herauskristallisiert. Aktuell verfügt der Polar Drucker bei den Gerätekosten noch über einen entscheidenden Preisvorteil gegenüber dem Gantry Drucker, technische Weiterentwicklungen könnten diesen aber in den kommenden Jahren reduzieren.

Nach einer inhaltlichen Auseinandersetzung mit der bestehenden Fachliteratur und einer Betrachtung der Einzelfallstudie, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen: Beim Vergleich der Studien 1-3 war mitunter die unterschiedliche Methodik, die jeweils angewendet wurde, eine der größten Herausforderungen in der Schaffung gleicher Grundlagen. Studie 1 betrachtet ein ganzes Wandelement mit einem Volumen von 4.39 m^3 , Studie 2 eine 1 m^2 Referenzwand und Studie 3 rechnet die Beurteilungen auf ein zweistöckiges Gebäude mit einer Grundfläche von 219 m^2 hoch. Bei der Einzelfallstudie handelt es sich um ein Pilotprojekt, bei dem die Wirtschaftlichkeit nicht im Vordergrund stand.

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde die Wirtschaftlichkeitsanalyse daher anhand eines einstöckigen Referenz-Einfamilienhaus mit einer Grundfläche von 140 m^2 , einer Deckenhöhe von $2,70 \text{ m}$ und einer Wandstärke von $0,3 \text{ m}$ gewählt. Die alleinige Betrachtung des Rohbaus stand dabei im Vordergrund. Dazu wurden sowohl die Parameter der Studien 1-3, also auch jene der Einzelfallstudie auf den einheitlichen Standard „Kosten pro m^2 “ heruntergerechnet und im Anschluss auf das Referenz-Einfamilienhaus übertragen. Die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt auf Basis von den drei Kostenkategorien Personalkosten, Materialkosten und Herstellungskosten. Die gewonnenen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Personalkosten: Im Kostenvergleich zu einer 3D-Druck Baustelle in Österreich mit zwei Arbeitskräften, zeigt sich ein Einsparungspotenzial gegenüber der Massivbauweise von ungefähr 15.000 € pro Baustelle aufgrund der kürzeren Bauzeit. Es wird dabei jedoch unterstellt, dass bei der Massivbauweise ebenfalls zwei Arbeitskräfte an der Baustelle im Einsatz sind. Ändert man die Anzahl der Arbeitskräfte entsprechend, ist auch das Einsparungspotenzial neu zu evaluieren.
- Materialkosten: Bei einer Betrachtung der Materialkosten von 3D-Druck-Verfahren mit jenen der Massivbauweise ist festzustellen, dass ein (teilweise markanter) Preisunterschied besteht, der aktuell weniger Anreiz schafft den 3D-Druck bei der Herstellung des Rohbaus eines Einfamilienhauses in Erwägung zu ziehen. Zusammenfassend ist kein klarer Preisvorteil gegenüber herkömmlichen Beton zu erkennen.
- Herstellungskosten: Analysiert man die errechneten Kosten des Referenz-Einfamilienhauses in der Massivbauweise in Höhe von 95.000 € im Vergleich zu den Werten gemäß Literatur scheinen aus wissenschaftlicher Sicht Kosteneinsparungen von 28% (zu Studie 3) bis hin zu 82% (zu Studie 2, aber ohne Druckerkosten) möglich. Im Vergleich zur Praxis, das heißt unter Berücksichtigung der Kosten der Einzelfallstudie, zeigt sich jedoch, dass diese Einsparungspotenziale nicht beobachtet werden können.

Denkt man einen Schritt weiter insbesondere an die Dämmung des hergestellten Rohbaus, zeigen sich die eigentlichen wirtschaftlichen Herausforderungen. Es ist hervorzuheben, dass bei einer zunehmenden Komplexität und Formfreiheit, die den 3D-Druck als Bauverfahren besonders attraktiv macht, mit verhältnismäßig hohen Kosten für die Wärmedämmung zu rechnen ist. Auf Basis der Preisangabe für Schaumglas können die Kosten für das Dämmmaterial für den Rohbau des Referenz-Einfamilienhauses zwischen 38.000 - 58.000 € beziffert werden. Dieser Betrag ist aus Sicht des Autors erheblich und kann dazu führen, dass sich mögliche Kostenvorteile des 3D-Drucks im Vergleich zur Massivbauweise relativieren. Kann hier in absehbarer Zeit kein kostengünstigerer Ersatz für den Wärmeschutz gefunden werden, bleibt der Einsatz von 3D-Druck-Verfahren aus wirtschaftlicher Sicht eher unattraktiv. Es bleibt der Ausblick, dass weitere technische Entwicklungen und das Erreichen von Skaleneffekten die 3D-Druck-Verfahren in naher Zukunft erschwinglicher machen und den Einsatz in der kommerziellen Nutzung ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- 3d Natives. (2017). *Haus-Drucker Apis Cor erhält 6 Millionen US-Dollar*. Abgerufen am 23. Juli 2021 von: <https://www.3dnatives.com/de/apis-cor-erhalt-6-millionen290920171/#!>
- 3d Natives. (2018). *Interview Apis Cor*. Abgerufen am 21. Juli 2021 von: <https://www.3dnatives.com/de/interview-apis-cor/>
- 3d Natives. (2019). *3D Druck Häuser: Die wichtigsten Unternehmen und Hersteller*. Abgerufen am 21. Juli 2021 von <https://www.3dnatives.com/de/3d-druck-haeuser-unternehmen-hersteller-170620191/>
- Al Jassmi, H., Al Najjar, F., & Mourad, A.-H. (2018). Large-Scale 3D Printing: The Way Forward. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, S. 1-16. Abgerufen von: https://www.researchgate.net/publication/324267765_Large-Scale_3D_Printing_The_Way_Forward/download
- All3dP. (2021). *How Much Does a 3D Printed House Cost in 2021?* Abgerufen am 22. Juli 2021 von: <https://all3dp.com/2/3d-printed-house-cost/>
- Apis Cor. (2016). *Retained foundation framework* [Video]. Abgerufen von: <https://www.youtube.com/watch?v=wSRmqqwm1Us>
- Apis Cor. (2019). *World's Largest 3D Printed Building*. Abgerufen von: <https://www.apis-cor.com/dubai-project>
- Apis Cor. (2021). *Apis Cor University*. Abgerufen von: <https://apis-cor.thinkific.com/courses/fundamentals-of-construction-3d-printing-c3d-1100>
- Batikha, M., Jotangia, R., Yasser Baaj, M., & Mousleh, I. (2022). 3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study . *Automation in Construction* 134, S. 1-14.
- Be Different LLC. (2022). *Hausbau Kosten: Kalkulation, Checkliste & mehr*. Abgerufen von: <https://kreditvergleichsportal.at/hausbau-kosten/#:~:text=Zur%20groben%20Orientierung%20k%C3%B6nnen%20Sie,Euro%20f%C3%BCr%20jeden%20m%C2%B2%20veranschlagen>
- Beco Treat Aps. (2022). *Beton berechnen: Wieviel kg Fertigbeton benötige ich für 1 m³?* Abgerufen von: <https://www.betonversiegelung.com/beton-berechnen/#:~:text=Da%201m%C2%B3%20einem%20Volumen%20von,kg%20Fertigbeton%2DMischung%20pro%20Kubikmeter.>
- Buswell, R., Leal da Silva, W., Bos, F., Schipper, H., Lowke, D., Hack, N., Roussel, N. (2020). A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 134, S. 1-10.
- Buswell, R., Leal de Silva, W., Jones, S., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, S. 37-49.

- Chen-iun-tai, N. (2016). *USA Patentnr. US20160361834A1*. Abgerufen von: <https://patents.google.com/patent/US20160361834A1/en>
- COBOD International A/S. (2022). *COBOD Configurator BOD2*. Abgerufen von: <https://cobod.com/configurator/>
- COBOD International A/S. *FAQ*. Abgerufen am 2. Jänner 2022 von <https://cobod.com/faq/>
- Contour Crafting Corporation. *Building Automated Construction*. Abgerufen am 12. Dezember von: <https://www.contourcrafting.com/building-construction>
- De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V., Habert, G., & Augusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research* 112, S. 25-36.
- Deplazes, A. (2013). *Architektur konstruieren: Vom Rohmaterial zum Bauwerk* (Bd. 4). Zürich: Birkenhäuser.
- DerStandard. (2019). *Warum Wohnen nicht mehr leistbar ist*. Abgerufen am 21. Juli 2021 von: www.derstandard.at/story/2000108781760/warum-wohnen-nicht-mehr-leistbar-ist
- Deutsche FOAMGLAS® GmbH. (1. März 2022). *Owens Corning FOAMGLAS® Wärmedämmung aus Schaumglas*. Abgerufen am 1. März 2022 von: <https://www.foamglas.com/>
- Deutsches Umweltbundesamt. (2019). Abgerufen am 22. Juli 2021 von: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/2019_02_20_uba_knbau_bf.pdf
- Einfamilienhaus. (22. Februar 2022). *Einfamilienhaus Bauzeit – wie lange dauert es?* Abgerufen am 22. Februar 2022 von: <https://www.einfamilienhaus.de/ratgeber/wichtiges/bauzeit-einfamilienhaus/>
- ETH Zürich. (2021). *Smart Dynamic Casting*. Abgerufen von: <https://dfabhouse.ch/de/smart-dynamic-casting/>
- Fastermann, P. (2016). *3D-Drucken: Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert* (Bd. 2. aktualisierte Auflage). Berlin-Heidelberg: Springer Vieweg.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik. (2021). *Mit Forschung Lebensräume gestalten*. Abgerufen von: https://www.bau.fraunhofer.de/content/dam/bau/de/documents/BAU_195_Lgestalten2018_de_rz_Web.pdf
- García de Soto, B., Augustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G., & Adey, B. (2018). Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall. *Automation in Construction*, S. 297-311.
- Habitat for Humanity. (28. Dezember 2021). *Blog*. Abgerufen am 28. Dezember 2021 von: <https://www.habitatpgw.org/habitat-for-humanity-peninsula-and-greater-williamsburg-dedicates-nations-first-ever-3d-printed-habitat-home-to-williamsburg-family/>

- Hausbauberater. (2022). *Die realistische Bauzeit für ein Massivhaus*. Abgerufen am 28. Februar 2022 von: <https://www.hausbauberater.de/bauweisen/massivhaus/massivhaus-bauzeit>
- HOLCIM. (2020). *3D Printing Dry Mortar Range - A First For HOLCIM*. Abgerufen am 22. Juni 2020 von: <https://www.holcim.com/lafargeholcim-spain-introduces-our-first-dry-mortar-range-3d-printing>
- Kumke, M. (2018). *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen* (Bd. Band 124). Wolfsburg: AutoUni, Volkswagen Aktiengesellschaft.
- Lindeman, H., Gerbers, R., Ibrahim, S., Dietrich, F., Hermann, E., Dröder, K., Kloft, H. (2019). Development of a Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) Technology for Additive Manufacturing of Reinforced Freeform Concrete Structures. In T. Wangler, & R. Flatt, *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018* (S. 287-298). Zürich: RILEM / Springer.
- Lloret-Fritschi, E., Scotto, F., Gramazio, F., Kohler, M., Graser, K., Wangler, T., Mata-Falcon, J. (2019). Challenges of Real-Scale Production with Smart Dynamic Casting. In T. Wangler, & R. Flatt, *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018* (S. 299-309). Zürich: RILEM / Springer.
- Loughborough University. (2021). *School of Mechanical, Electrical and Manufacturing Engineering*. Abgerufen am 12. Dezember von: 3D Concrete Printing: <https://www.lboro.ac.uk/enterprise/3dcp/>
- Lowke, D., Weger, D., Henke, K., Talke, D., Winter, S., & Gehlen, C. (2015). 3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen. S. 1-9.
- Malaeb, Z., AISakka, F., & Hamzeh, F. (2019). 3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning, and Mix Comparison Between Different Machine Setups. In J. N. Sanjayan, *3D Concrete Printing Technology - Construction and Building Applications* (S. 115-136). Oxford-Cambridge: Butterworth-Heinemann.
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N., & Hamzeh, F. (2015). 3D concrete printing: Machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Volume 6 (6)*, S. 14 - 22.
- McKinsey & Company. (2017). *Reinventing Construction: A route to higher productivity*. Houston et al.: McKinsey Global Institute.
- Mechtcherine, V., & Nerella, V. (2018). 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen. *Bautechnik 95, Heft 4*, S. 275-287.
- Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, (22. Februar 2022). Erstes 3D gedrucktes Gebäude in Österreich. (C. Stangelberger, Interviewer)

- Monolite UK (Dinitech SpA). (2016). *D-Shape Report*. Abgerufen von: <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/D-Shape.pdf>
- Moro, J. (2019). *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail* (Bd. 1). Stuttgart: Springer Vieweg.
- OPTIFIN GmbH. (21. November 2021). *Hausbau Kosten - Was es kostet, ein Haus zu bauen*. Abgerufen von: <https://www.optifin.at/hausbau-kosten-was-es-kostet-ein-haus-zu-bauen/#rohbau>
- Otto, J., Kortmann, J., & Krause, M. (2020). Wirtschaftliche Perspektiven von beton-3D-Druckverfahren. *Beton- und Stahlbau* 115, S. 586-596.
- Paul, H., & Wollny, V. (2014). *Instrumente des strategischen Managements*. Oldenbourg: De Gruyter.
- Pech, A., Kolbitsch, A., & Zach, F. (2018). *Baukonstruktionen - Tragwerke*. Basel: Birkhäuser.
- PERI GmbH. (2021). *Presseinformation*. Abgerufen von: https://uploadssl.webflow.com/607fed6c7e3de4fa57fdc3f6/60ffce814b8b9d5ac25983b6_Pressemitteilung_Erstes%20gedrucktes%20Haus%20Deutschlands%20offiziell%20er%20%C3%B6ffnet_DE.pdf
- PERI GmbH. (2021a). *Presseinformation*. Abgerufen von: https://uploadssl.webflow.com/607fed6c7e3de4fa57fdc3f6/617a5bcce6bc9ce5130c6df5_Pressemitteilung_PERI%20druckt%20erstes%20Geb%C3%A4ude%20%C3%96sterreichs_DE.pdf
- Rössl, D. (2008). *Die Diplomarbeit in der Betriebswirtschaftslehre: Ein Leitfaden* (Bd. 4. Auflage). Wien: Facultas Verlag.
- schlau-finanziert Finanzierungsvermittlung GmbH. (2020). *Hausbau-Kosten pro m² in Österreich*. Abgerufen am 28. Februar 2022 von: <https://www.schlau-finanziert.at/blog/hausbau-kosten-pro-m%C2%B2-in-oesterreich/>
- Scotto, F., Fritschi, E., Gramazio, F., Kohler, M., & Flatt, R. (2018). Adaptive Control System For Smart Dynamic Casting. *Defining Fabrication-Informed Design Tools and Process Parameters in Digital Fabrication Processes*, S. 255-264.
- Statistik Austria. (2013). *Registerzählung 2011: Zwei Drittel aller Gebäude in Österreich sind Einfamilienhäuser*. Abgerufen von: http://www.statistik.at/web_de/presse/074324.html
- Statistik Austria. (2021). *Baupreisindex*. Abgerufen von: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/baupreisindex/index.html
- Stefanoni, M., Angst, U., & Elsener, B. (2019). Corrosion Challenges and Opportunities Corrosion Challenges and Opportunities. In T. Wangler, & F. R., *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018* (S. 225-235). Zürich: RILEM / Springer.
- STRABAG SE. (28. Oktober 2021). *STRABAG setzt mit PERI Österreichs erstes Gebäude aus dem 3D-Drucker um*. Abgerufen von: <https://www.strabag.com>

[/databases/internet/ public/content.nsf/web/SE-PRESSE.COM-
pressemitteilung-3d-betondruck](#)

Süddeutsche Zeitung. (2021). *3D Druck Neubau. Schicht für Schicht*. Abgerufen am 23. Juli 2021 von: <https://www.sueddeutsche.de/kolumne/3d-druck-neubau-1.5222571>

Technische Universität Braunschweig. (2020). *Shotcrete 3D Printing of a double curved reinforced concrete wall*. Abgerufen von: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=pJ4BbfKnPx0>

Technische Universität Dresden. (2016). *CONPRINT3D*. Abgerufen von: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ifb/das-institut/news/CONPrint3D>

The Guardian. (2021). *Dutch couple become Europe's first inhabitants of a 3D-printed house*. Abgerufen von: <https://www.theguardian.com/technology/2021/apr/30/dutch-couple-move-into-europe-first-fully-3d-printed-house-eindhoven>

The National. (2021). *3D-printed 'green' villa in Sharjah cuts building and maintenance costs*. Abgerufen von: <https://www.thenationalnews.com/uae/environment/2021/12/04/3d-printed-green-villa-in-sharjah-cuts-building-and-maintenance-costs/>

United Nations Environment Programme. (2014). *UNEP Global Environmental Alert Service - Sand, rarer than one thinks*. Abgerufen von: <http://europa.eu/capacity4dev/unep/documents/unep-global-environmental-alert-service-geas-sand-rarer-one-thinks>

Van der Putten, J., De Shutter, G., & Van Tittelboom, K. (2019). The Effect of Print Parameters on the (Micro) structure of 3D Printed Cementitious Materials. In T. Wangler, & R. Flatt, *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018* (S. 234-244). Zürich: RILEM / Springer.

Vasilic, K. (2020). Additive Fertigung im Betonbau: aktueller Stand. *Beton- und Stahlbetonbau, Ausgabe 115*, S.1006-1012.

Wangler, T., & Flatt, R. (2019). *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*. RILEM - The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.

Weissenseer. (22. Februar 2022). *Stressfrei Haus bauen: Dieser Zeitplan ist realistisch*. Abgerufen von: <https://www.weissenseer.com/stressfrei-haus-bauen-dieser-zeitplan-ist-realistisch/#:~:text=In%20Summe%20dauert%20diese%20Phase,4%20Wochen%20vor%20Montagebeginn%20abgeschlossen>

Wikipedia. (2021). *Einfamilienhaus*. Abgerufen von: <https://de.wikipedia.org/wiki/Einfamilienhaus>

Wikipedia. (2022). *Polarkoordinaten*. Abgerufen von: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polarkoordinaten>

- Wirtschaftskammer Österreich. (2021). *Arbeitskosten, Stand 2020*. Abgerufen von: <http://wko.at/statistik/eu/europa-arbeitskosten.pdf>
- Xia, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechterine, V., Pan, J., Du, S. (2021). Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and concrete composites*, Vol. 122, S. 1-13.
- Xia, M., Nematollahi, B., & Sanjayan, J. (2019). Compressive Strength and Dimensional Accuracy of Portland Cement Mortar Made Using Powder-Based 3D Printing for Construction Applications. In T. Wangler, & R. Flatt, *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018* (S. 245-254). Zürich: RILEM / Springer.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Trends im globalen Produktivitätswachstum, Quelle: McKinsey & Company, 2017.....	2
Abbildung 2: Arbeitsproduktivität in der Bauwirtschaft, Quelle: McKinsey & Company, 2017.....	3
Abbildung 3: Standardisierter Ablauf in der additiven Fertigung, Quelle: Lowke, et al., 2015.....	14
Abbildung 4: Forschungstätigkeiten von großvolumigen 3D-Druck-Verfahren seit 1996 weltweit, Quelle: Buswell et al., 2018.....	15
Abbildung 5: Zielsetzungen für ein optimales Betongemisch, Quelle: Malaeb, AISakka, & Hamzeh, 2019.....	17
Abbildung 6: Vier Hauptgruppen der additiven Fertigung, Quelle: Vasilic, 2020.....	19
Abbildung 7: Ablauf des Verfahrens des selektiven Bindens, Quelle: Xia, Nematollahi, & Sanjayan, 2019.....	20
Abbildung 8: Darstellung zeigt einen werksbasierten Partikelbett-Drucker der Festkörper auf Basis des D-Shape-Verfahrens drucken kann, Quelle: Al Jassmi, Al Najjar, & Mourad, 2018.....	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Extrusionsverfahrens, Quelle: Van der Putten, De Shutter, & Van Tittelboom, 2019.....	22
Abbildung 10: Darstellung zeigt Feldversuche einer Feinfilamentablage, Quelle: Loughborough University, 2021.....	23
Abbildung 11: Darstellung zeigt Feldversuche einer Mittelfilamentablage, Quelle: Mechtcherine & Nerella, 2018.....	24
Abbildung 12: Darstellung zeigt Feldversuche einer Grobfilamentablage, Quelle: Technische Universität Dresden, 2016.....	24
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Spritzbetonverfahrens, Quelle: Lindeman, et al., 2019.....	25
Abbildung 14: Darstellung zeigt die Produktion eines Prototypen nach dem Shotcrete-3D-Printing-Verfahren inklusive einer Eisenbewehrung, Quelle: Technische Universität Braunschweig, 2020.....	26
Abbildung 15: Schematische Darstellung des Gleitschalungsverfahrens, Quelle: Lloret-Fritschi, et al., 2019.....	27
Abbildung 16: Eisenbewehrungen im „Smart Dynamic Casting“-Verfahren, Quelle: ETH Zürich, 2021.....	28
Abbildung 17: „Smart Dynamic Casting“-Verfahren im Detail 1, Quelle: ETH Zürich, 2021.....	28

Abbildung 18: „Smart Dynamic Casting“-Verfahren im Detail 2, Quelle: ETH Zürich, 2021.....	29
Abbildung 19: Das fertige Bauprojekt mit im „Smart Dynamic Casting“-Verfahren erzeugten Stützpfeiler, Quelle: ETH Zürich, 2021	29
Abbildung 20: Schalungsdetails zur Herstellung von konkaven Bauteilen, Quelle: Scotto et al., 2018	30
Abbildung 21: Darstellung eines Gantry Druckers, Quelle: COBOD International A/S, 2022.....	38
Abbildung 22: Prozessschritte für die Nutzung eines Gantry Druckers, Quelle: Xia, et al., 2021	38
Abbildung 23: Fundament mit Schienensystem für einen Gantry Drucker, Quelle: Apis Cor, 2021	39
Abbildung 24: Fundament mit sechs Betonblöcken für einen Gantry Drucker, Quelle: PERI GmbH, 2020.	39
Abbildung 25: Komponenten eines Polar Druckers, Quelle: Apis Cor, 2021.....	40
Abbildung 26: Entwurf für das Haus „Spirit“, Quelle: Apis Cor, 2022	40
Abbildung 27: Positionen eines Polar Druckers, Quelle: Apis Cor, 2021	52
Abbildung 28: Entwurf des 3D-gedruckten Zubaus, Quelle: STRABAG SE, 2021a.....	57
Abbildung 29: Seitenansicht der Baustelle in Niederösterreich, Quelle: Eigene Darstellung.....	58
Abbildung 30: Wandaufbau inklusive des Fensteranschlusses, Quelle: Eigene Darstellung.....	59
Abbildung 31: Betonfundamente für den Gantry Drucker, Quelle: Eigene Darstellung	59
Abbildung 32: Grundriss in Form eines Kleeblattes, Quelle: STRABAG SE, 2021	59
Abbildung 33: Ausfüllen der 3D-gedruckten Wände mit Ortbeton, Quelle: STRABAG SE, 2021	60
Abbildung 34: Grundrissplan in Form eines Kleeblattes, Quelle: Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022	61
Abbildung 35: Schnittdarstellung, Quelle: Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022	62
Abbildung 36: Detail zu zweischaliger Außenwand mit Ortbetonkern, Quelle: Mitarbeiter Projektsteuerung STRABAG SE, 2022.....	62
Abbildung 37: Einbringen von Schaumglas in Form von kleinen Kügelchen, Quelle: Apis Cor, 2021	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßnahmen zur Steigerung in der Produktivität des Bausektors, Quelle: McKinsey & Company, 2017	5
Tabelle 2: Bauablauf eines Einfamilienhaus nach Massivbauweise inklusive einzelner Prozessschritte, Quelle: Deplazes, 2013.....	13
Tabelle 3: Matrix zur Beurteilung der Eignung der additiven Verfahren für den 3D-Druck eines Einfamilienhauses, Quelle: Eigene Darstellung	31
Tabelle 4: Begründung der Eignung des jeweiligen additiven Verfahrens für den 3D-Druck eines Einfamilienhauses, Quelle: Eigene Darstellung	34
Tabelle 5: Auflistung der Druckertypen des Extrusionsverfahrens, Quelle: Eigene Darstellung	35
Tabelle 6: Erhebungstechnik für die Vergleichsanalyse, Quelle: Eigene Darstellung	44
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Materialkosten der Studien 1-3, Quelle: Eigene Darstellung	48
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Personalkosten der Studien 1-3, Quelle: Eigene Darstellung	49
Tabelle 9: Kostenaufstellung für einen Gantry Drucker, Quelle: Eigene Darstellung	51
Tabelle 10: Kostenaufstellung für einen Polar Drucker, Quelle: Eigene Darstellung...	53
Tabelle 11: Auswertung der Personalkosten anhand der Studien 1-3, Quelle: Eigene Darstellung	66
Tabelle 12: Auswertung der Materialkosten anhand der Studien 1-3, Quelle: Eigene Darstellung	68
Tabelle 13: Auswertung der Herstellungskosten anhand der Studien 1-3, Quelle: Eigene Darstellung	70
Tabelle 14: Auswertung der Herstellungskosten anhand der Einzelfallstudie, Quelle: Eigene Darstellung	71
Tabelle 15: Auswertung der Herstellungskosten anhand des Referenz-Einfamilienhauses, Quelle: Eigene Darstellung	71