

Diplomarbeit

3D-Betondruck – Baubetriebliche Analyse unterschiedlicher Druckverfahren

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

3D concrete printing – Construction analysis of different printing methods

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Paul Ohrwalder, BSc

Matr.Nr.: 01527164

Betreuung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Frank Lulei**
Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Oliver König**, BSc
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/235-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im September 2024

Danksagung

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um allen zu danken, die mich während dieser Zeit unterstützt und begleitet haben.

Zunächst möchte ich meiner Ehepartnerin Lisa meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Deine unermüdliche Unterstützung, Geduld und Liebe haben mir die Kraft gegeben, diese herausfordernde Zeit zu bewältigen. Du warst stets an meiner Seite und hast mich in den schwierigsten Momenten ermutigt.

Ich bedanke mich herzlich bei meinen Eltern, die mich in meiner persönlichen und akademischen Entwicklung stets unterstützt haben. Eure bedingungslose Liebe und Unterstützung haben mir den Weg geebnet, um meine Ziele zu erreichen.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Lulei, sowie Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing Oliver König für ihre hervorragende Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit. Ihre wertvollen Ratschläge, das konstruktive Feedback und die stetige Motivation waren von unschätzbarem Wert.

Ein besonderer Dank gilt Progress 3D Innovation, insbesondere Andreas Gallmetzer, für die Möglichkeit der Prototypenerstellung und die interessanten Interviews. Ihre Unterstützung und Zusammenarbeit haben maßgeblich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen.

Ich bedanke mich bei der Eigner Bauunternehmung GmbH, allen voran Dipl. -Ing. Wolfram Uhl und Florian Greiser, für die Möglichkeit der Prototypenerstellung und die aufschlussreichen Interviews. Ihre Bereitschaft zur Zusammenarbeit und Ihre wertvollen Einblicke haben diese Arbeit bereichert.

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit konnten anhand der Experteninterviews gewonnen werden. Daher bedanke ich mich herzlich bei allen Teilnehmenden der Befragung für ihre Offenheit, Informationsbereitschaft und interessanten Beiträge.

Kurzfassung

Schlagwörter: Additive Fertigungstechnologie, Betonbau, Baubetriebsanalyse, Materialeffizienz, Nachhaltigkeit

Die vorliegende Diplomarbeit widmet sich der Untersuchung des 3D-Betondrucks als innovativer Bauverfahrenstechnologie mit einem speziellen Fokus auf der Produktion von Stahlbetonsäulen. Ziel der Arbeit ist es, die Leistungsfähigkeit und Effizienz dieser additiven Fertigungstechnologien im Vergleich zu konventionellen Bauverfahren zu analysieren und zu bewerten. Im Zentrum der Analyse stehen die Verfahren Concrete Printing und Selective Paste Intrusion, die hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Potenziale kritisch hinterfragt werden.

Zu Beginn der Arbeit erfolgt eine umfangreiche Literaturanalyse, welche die theoretischen Grundlagen des 3D-Betondrucks aufbereitet. Diese Analyse umfasst den aktuellen Stand der Forschung, die technologischen Entwicklungen und die verschiedenen Ansätze der additiven Fertigung im Bauwesen. Besonders wird dabei auf die Unterschiede zwischen herkömmlichen Bauverfahren und den durch 3D-Druck ermöglichten neuen Produktionsmethoden eingegangen. Darüber hinaus werden die spezifischen Materialeigenschaften von Beton in Verbindung mit additiven Fertigungstechnologien sowie die Herausforderungen, die mit der Herstellung tragender Bauteile verbunden sind, untersucht.

Für den empirischen Teil der Arbeit wurden zwei Prototypen von Stahlbetonsäulen unter Anwendung der Verfahren Concrete Printing und Selective Paste Intrusion hergestellt und mit einer traditionell gefertigten Stahlbetonsäule verglichen. Die experimentelle Untersuchung konzentrierte sich auf wesentliche Parameter wie Produktionsgeschwindigkeit, Materialeffizienz und die Designfreiheit der Bauteile. Diese Untersuchungen wurden durch Experteninterviews ergänzt, dank derer wertvolle Einblicke in die aktuellen Herausforderungen und zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten der Technologie gewonnen werden konnten.

Die Ergebnisse zeigen, dass der 3D-Betondruck signifikante Vorteile im Hinblick auf Materialeinsparungen und die Flexibilität bei der Formgebung bietet. Diese Vorteile könnten insbesondere bei komplexen und maßgeschneiderten Bauteilen wirtschaftlich und ökologisch relevant sein. Gleichzeitig identifiziert die Arbeit jedoch technische Hürden, die derzeit eine breitere Anwendung im Bauwesen einschränken. Hierzu zählen insbesondere die fehlende Normierung von 3D-gedruckten Bauteilen, die Unsicherheiten hinsichtlich der Langzeitstabilität und die noch nicht vollständig entwickelten Technologien zur Qualitätssicherung während des Druckprozesses.

Die Arbeit kommt zum Schluss, dass der 3D-Betondruck, trotz der derzeit noch bestehenden Herausforderungen, ein bedeutendes Potenzial zur Transformation der Bauindustrie in den kommenden Jahren besitzt. Durch kontinuierliche technologische Weiterentwicklungen und die Schaffung klarer Normen kann diese Technologie dazu beitragen, den Bauprozess effizienter und nachhaltiger zu gestalten. Abschließend werden in der Arbeit Empfehlungen formuliert, wie die Integration des 3D-Betondrucks in die Baupraxis vorangetrieben werden kann, um diese innovative Methode zu einer festen Größe in der modernen Bauproduktion zu machen.

Abstract

Keywords: Additive Manufacturing Technology, Concrete Construction, Construction Process Analysis, Material Efficiency, Sustainability

This thesis explores the application of 3D concrete printing as an innovative construction technology, with a particular focus on the production of reinforced concrete columns. The primary objective is to analyze and evaluate the performance and efficiency of these additive manufacturing technologies compared to conventional construction methods. The study specifically examines the Concrete Printing and Selective Paste Intrusion techniques, critically assessing their technical and economic potentials.

The thesis begins with an extensive literature review that provides the theoretical foundations of 3D concrete printing. This review covers the current state of research, technological developments, and various approaches to additive manufacturing in the construction industry. The differences between traditional construction methods and the new production techniques enabled by 3D printing are highlighted. Additionally, the specific material properties of concrete in connection with additive manufacturing technologies, as well as the challenges associated with the production of load-bearing components, are thoroughly investigated.

In the empirical section, two prototypes of reinforced concrete columns were produced using the Concrete Printing and Selective Paste Intrusion methods and compared with a traditionally manufactured reinforced concrete column. The experimental investigation focused on key parameters such as production speed, material efficiency, design freedom, and the structural integrity of the components. These practical assessments were supplemented by expert interviews, which provided valuable insights into the current challenges and future application possibilities of the technology.

The results indicate that 3D concrete printing offers significant advantages in terms of material savings and flexibility in design. These benefits could be economically and environmentally relevant, especially for complex and customized components. However, the thesis also identifies technical barriers that currently limit wider application in the construction industry. These include the lack of standardization for 3D-printed components, uncertainties regarding long-term stability, and the still-developing technologies for quality assurance during the printing process.

The thesis concludes that despite the existing challenges, 3D concrete printing has substantial potential to transform the construction industry in the coming years. Through continuous technological advancements and the establishment of clear standards, this technology could contribute to making the construction process more efficient and sustainable. Finally, the thesis provides recommendations on how to promote the integration of 3D concrete printing into construction practice, aiming to establish this innovative method as a standard in modern construction production.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	10
1.2	Forschungsfragen	11
1.3	Forschungsmethodik	12
1.4	Begriffsbestimmungen	12
1.5	Abkürzungsverzeichnis	13
2	Konventionelle Konstruktionsweisen im Betonbau	15
2.1	Baustoff Beton	16
2.2	Schalung	17
2.3	Fertigteilbauweise	19
2.4	Gegenüberstellung von Ortbetonbauweise und Fertigteilbauweise	19
3	Stand der Technik in der additiven Fertigung (AM) mit mineralischen Baustoffen	21
3.1	Übersicht 3D-Drucktechnologien	23
3.1.1	Prozesskette der additiven Fertigung	24
3.1.2	Modellierung des Bauteils	27
3.2	Bewegungssysteme	28
3.2.1	Gantry-System	29
3.2.2	Delta-System	30
3.2.3	Roboterarm-System	31
3.2.4	Ausleger-System	32
3.2.5	Polar-System	33
3.3	Ablegende Verfahren	33
3.3.1	Contour Crafting (CC)	34
3.3.2	3D Concrete Printing (3DCP)	36
3.4	Shotcrete 3D Printing (SC3DP)	36
3.5	Selektiv bindende Verfahren	37
3.5.1	Selective Cement Activation (SCA)	39
3.5.2	Selective Paste Intrusion (SPI)	39
3.5.3	Binder Jetting	40
3.5.4	Exkurs: Selektives Lasersintern (SLS)	42
3.6	Marktübersicht nach Fertigungsverfahren und Bewegungssystemen	43
4	Vergleichsanalyse des Beton-3D-Drucks am Beispiel einer Stahlbetonsäule	46
4.1	Die Auswahl des Referenzmodells	47
4.1.1	Generatives Design und kraftflussoptimierter Modellentwurf	49
4.2	Referenzmodell - Stahlbetonsäule in konventioneller Ortbetonbauweise	52
4.2.1	Herstellungsprozess der Schalung	53
4.2.2	Herstellungsprozess der Säule auf der Baustelle	55
4.3	Prototyp 1 – Selective Paste Intrusion (SPI)	56
4.3.1	Materialzusammensetzung	59

4.3.2	Herstellungsprozess	60
4.3.3	Kosten	63
4.4	Prototyp 2 – 3D Concrete Printing (3DCP)	64
4.4.1	Materialzusammensetzung	67
4.4.2	Herstellungsprozess	67
4.4.3	Kosten	69
5	Additive und konventionelle Fertigung im Vergleich	70
5.1	Herstellungsdauer der Stahlbetonsäule	70
5.2	Geometrische Freiheit und Oberflächenqualität	74
5.3	Nachhaltigkeit	78
5.4	Wirtschaftliche Aspekte	81
5.5	Systemgrenzen	83
5.6	Vergleich der Forschungsergebnisse	85
5.6.1	Herstellungsdauer	85
5.6.2	Kosten	85
5.6.3	Nachhaltigkeit	86
5.6.4	Qualitative Eigenschaften	86
5.6.5	Fazit	86
6	Aktuelle Herausforderungen für die additive Fertigung im Bauwesen	87
6.1	Aktuelle Herausforderungen der additiven Fertigung im Bauwesen	87
6.1.1	Normgebung	87
6.1.2	Zugbewehrung	88
6.1.3	Materialoptimierung	90
6.1.4	Frischbetondruck	90
6.2	Das Potenzial der additiven Fertigung, konventionelle Betonbauweisen zu ersetzen	91
7	Fazit	94
7.1	Beantwortung der Forschungsfragen	94
7.2	Ausblick	97

Kapitel 1

Einleitung

Die Bauindustrie sieht sich mit einer Vielzahl komplexer Herausforderungen konfrontiert, die durch das Wachstum der Weltbevölkerung und den steigenden Bedarf an nachhaltiger Infrastruktur bedingt sind. Gleichzeitig muss die Baubranche eine Reihe von Komplikationen bewältigen, die von ressourcenintensiven Bauverfahren und erheblichen Umweltauswirkungen bis hin zu begrenzten Kapazitäten und ineffizienten Prozessen reichen.¹ Angesichts dieser vielfältigen Problemlagen und den daraus resultierenden Anforderungen gewinnt der 3D-Betondruck als innovative Technologie zunehmend an Bedeutung. Er bietet das Potenzial, viele dieser Herausforderungen zu adressieren und den Weg zu einer nachhaltigeren Bauweise zu ebnen.

Der Aspekt der Nachhaltigkeit bemisst sich dabei vor allem an einem effizienteren und letztendlich sparsameren Einsatz von Ressourcen. In der Betonindustrie gilt dies in erster Linie für den bis dato sehr hohen Energieaufwand und die damit verbundenen CO₂-Emissionen bei der Zementproduktion, die derzeit für einen Anteil von mehr als 8 % des weltweiten Ausstoßes verantwortlich gemacht wird.² Nicht zuletzt aufgrund dieses hohen Wertes sind die ökologischen Belastungen bei der Herstellung von Zement nicht mehr nur in Fachkreisen bekannt, sondern werden vermehrt in der Politik diskutiert.³

Wissenschaftlich betrachtet, ist die Herstellung von Stahl, bezogen auf die Masse, zwar energieintensiver als jene von Beton.⁴ Letzterem kommt als am häufigsten verwendeter Baustoff im Hoch- und Verkehrswegebau aber eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung globaler Herausforderungen zu.⁵ Aus diesem Grund hat die Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie einen Maßnahmenplan für die Reduzierung des CO₂-Emissionen durch die Zementerstellung erarbeitet. Folgende Maßnahmen sollen unter anderen dabei helfen, das Ziel der Klima-Neutralität für die Wirtschaft und Gesellschaft in Europa bis 2050 zu erreichen.⁶

- Umstellung des Brennstoffmix
- Verringerung des Klinkeranteils im Zement
- Versorgung mit CO₂-neutralem Strom ab 2030
- Carbonatisierung von Betonbauwerken in der Nutzungsphase
- CO₂-Abscheidung, -Nutzung bzw. -Speicherung

Aus den Forschungsarbeiten ergibt sich ein Stand der Technik, der ein breites Spektrum an vielversprechenden Lösungen für zukunftsfähige Betonanwendungen abdeckt. Dazu gehören etwa

¹Vgl. [56] McKinsey & Company, S. 15 ff.

²Vgl. [53] Lord, S. 77 ff.

³Vgl. [99] WWF, S. 28 ff.

⁴Vgl. [69] Ranjbar et al., S. 9 ff.

⁵Vgl. [102] Zunino

⁶Vgl. [90] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie VÖZ

Entwicklungen aus dem Bereich der Betontechnologie, beispielsweise Ultra-Hochleistungsbetone (UHPC) oder selbstverdichtende Betone (SSC), die in Kombination mit der konventionellen Ort betonbauweise Vorteile in Bezug auf Qualität, Lebensdauer, Arbeitssicherheit und Ressourcenschonung bieten.⁷

Ein weiteres Problem der Baubranche liegt in begrenzten Kapazitäten und ineffizienter Produktivität herkömmlicher Bauverfahren.⁸ Die steigende Nachfrage nach Wohnraum, Infrastruktur und anderen Bauprojekten erfordert Lösungen, die nicht nur die Produktivität steigern, sondern zudem nachhaltig und ressourcenschonend sind. Hier setzt der Beton-3D-Druck als vielversprechende Technologie an. So verspricht die Integration von 3D-Druckern in den Betonbau eine erhebliche Steigerung der Produktivität und eine gleichzeitige Materialeinsparung von bis zu 60 %.⁹ Präzision und Flexibilität des 3D-Drucks ermöglichen die Herstellung komplexer und maßgeschneiderter Bauteile, die mit konventionellen Verfahren schwer umsetzbar wären.¹⁰ Der Beton-3D-Druck ist damit ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Schaffung effizienter und ressourcenschonender Bauprozesse und kann einen bedeutenden Beitrag zur Lösung der aktuellen Probleme der Baubranche leisten und diese in eine Ära der Effizienz und Nachhaltigkeit führen.

Die vorliegende Arbeit beleuchtet die hier kurz angerissenen Herausforderungen der Baubranche näher, wobei der Fokus auf der Frage liegt, wie der Beton-3D-Druck als Schlüsseltechnologie dazu beitragen kann, diese Herausforderungen zu bewältigen. Dabei werden nicht nur technologische Aspekte betrachtet, sondern es wird das Potenzial des 3D-Drucks hinterfragt, eine nachhaltige, effiziente und zukunftsweisende Bauindustrie zu gestalten. Für die Arbeit werden Prototypen analysiert, die mit Hilfe des Beton-3D-Drucks hergestellt wurden, und zugleich mit konventionell hergestellten Betonbauteilen verglichen. Bei diesem Vergleich gilt der Fokus der Evaluierung der baubetrieblichen Aspekte. Demnach geht es nicht nur um die technologischen Aspekte des Beton-3D-Drucks, sondern um die Auswirkungen der neuen Herstellungsverfahren auf Bauzeit, Kosten, Qualität und Nachhaltigkeit der aus ihnen hervorgehenden Betonbauteile. Ziel ist es, Erkenntnisse zu gewinnen, wie der Beton-3D-Druck den Bauablauf verbessern kann und welche Herausforderungen in der Praxis auftreten können. Zugleich ermöglicht der Vergleich mit konventionell hergestellten Betonbauteilen das Herausarbeiten von Stärken und Schwächen des Beton-3D-Drucks. Dabei werden qualitative und quantitative Aspekte berücksichtigt, um eine umfassende Einsicht in die baubetrieblichen Auswirkungen und nicht zuletzt in die Potenziale dieser innovativen Technologie zu gewinnen.

1.1 Motivation

Diese Diplomarbeit ist aus der bereits eingangs geschilderter Erkenntnis geboren, wonach die Bauindustrie vor der Herausforderung steht, innovative Lösungen zu finden, um den steigenden Anforderungen an Effizienz, Nachhaltigkeit und Flexibilität gerecht zu werden. In diesem Kontext nimmt der Beton-3D-Druck eine herausragende Stellung ein, da er das Potenzial hat, herkömmliche Bauweisen zu revolutionieren, und zugleich eine Vielzahl von baubetrieblichen Vorteilen bietet.¹¹

Darüber hinaus ist das Thema der Arbeit ein hoch aktuelles. Schließlich stößt die traditionelle Betonbauweise, obwohl bewährt, in Zeiten zunehmender Urbanisierung und globaler Ressourcenknappheit an ökologische, ökonomische und zeitliche Grenzen.¹² Es ist demnach an der Zeit, die bestehenden Verfahren zu überprüfen, weiterzuentwickeln und zugleich den Beton-3D-Druck

⁷Vgl. [35] Hanses, S. 13 ff.

⁸Vgl. [38] Hofstadler, S. 271 ff.

⁹Vgl. [9] Berger, S. 11 ff.

¹⁰Vgl. [6] Automatisierungstechnik, S. 4 ff.

¹¹Vgl. [12] Bos et al., S. 211 ff.

¹²Vgl. [97] Weidner et al.

als neue technologische Möglichkeit auf den Prüfstand zu stellen. Sich wissenschaftlich mit dem Beton-3D-Druck zu befassen und dessen Potenziale auszuloten, ist nicht zuletzt aufgrund von Erkenntnissen sinnvoll und naheliegend, die die Wissenschaft mit Bezug auf die Metallindustrie gewonnen hat:

- Der 3D-Druck verspricht eine nachhaltigere Ressourcennutzung, nicht zuletzt mit Blick auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen.¹³
- Der Ressourceneinsatz kann zudem optimiert werden, weil durch den 3D-Druck Materialverluste erheblich reduziert werden können.¹³
- Die Steigerung der Effizienz durch den 3D-Druck bezieht sich nicht allein auf den Ressourceneinsatz, sondern beinhaltet eine spürbare Beschleunigung der Bauteilherstellung.¹³
- Als innovative Technologie ermöglicht der 3D-Druck, komplexe und individuelle Bauteile in einer bisher unerreichten Präzision zu fertigen.¹³
- Der 3D-Druck eröffnet neue Wege für kreative architektonische Gestaltung und innovative Konstruktionsmethoden.¹⁴

Die vorliegende Arbeit setzt sich daher das Ziel, nicht nur theoretische Erkenntnisse zu generieren, sondern praxisnahe Einblicke in die Anwendbarkeit und Herausforderungen dieser Technologie zu bieten. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit sollen damit dazu beitragen, den Beton-3D-Druck als eine nachhaltige und effiziente Alternative in der Bauindustrie zu positionieren, und einen Beitrag zur Weiterentwicklung dieses vielversprechenden Feldes zu leisten.

1.2 Forschungsfragen

Die vorliegende Diplomarbeit zielt darauf ab, umfassende Einblicke in die Potenziale und Herausforderungen der additiven Fertigung im Betonbau zu gewinnen. Die Forschungsfragen wurden sorgfältig ausgewählt, um Vorteile und aktuelle Hürden dieser innovativen Technologie zu beleuchten und konkrete Erkenntnisse für die baubetriebliche Praxis zu generieren.

1. Welche Vor- und Nachteile haben unterschiedliche additive Fertigungsverfahren im Betonbau mit Blick auf die globalen Herausforderungen?
2. Welche Hürden bei der Praxisumsetzung robotergestützter Bauverfahren gibt es derzeit? Welche Lösungsansätze gibt es dazu?
3. Welche konventionellen Bauverfahren lassen sich schon heute durch welche additiven Verfahren ersetzen? Wie wirkt sich die Substitution auf Faktoren wie Bauzeit, Kosten, Qualität und Nachhaltigkeit des Baubetriebs aus?

Die erste Frage zielt darauf ab, die vielfältigen Aspekte der additiven Fertigung im Betonbau zu analysieren und dabei insbesondere die Auswirkungen auf globale Herausforderungen wie Umweltbelastungen, Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit zu betrachten. Durch eine umfassende Betrachtung der verschiedenen Fertigungsverfahren sollen sowohl die Stärken als potenzielle Schwächen identifiziert werden. Bei der zweiten Forschungsfrage liegt der Fokus auf der praktischen Umsetzung von robotergestützten Bauverfahren, speziell auf der Herstellung

¹³Vgl. [71] Richard et al., S. 202 ff.

¹⁴Vgl. [57] Mechtcherine und Nerella, S. 40-49.

vertikaler Betonbauteile. Durch eine detaillierte Analyse sollen aktuelle Hürden identifiziert und gleichzeitig innovative Lösungsansätze erarbeitet werden, um die Effizienz und Anwendbarkeit dieser Verfahren zu optimieren.

Die dritte Forschungsfrage legt den Fokus auf die praktische Anwendbarkeit von additiven Verfahren im Betonbau. Durch die Gegenüberstellung konventionell hergestellter Stahlbetonsäulen und der 3D-gedruckten Prototypen soll das Substitutionspotenzial für diese konkreten Bauteile ermittelt werden. Dabei sollen nicht nur die technischen Aspekte, sondern ökonomische und ökologische Faktoren betrachtet werden, um eine umfassende Bewertung der Substitutionseffekte zu ermöglichen.

1.3 Forschungsmethodik

Die vorliegende Diplomarbeit widmet sich der systematischen Untersuchung von Beton-3D-Druckverfahren unter Einsatz einer umfassenden empirischen Forschungsmethodik. Dabei bildet eine gründliche Literaturanalyse die Grundlage der Forschungsarbeit, bei der es darum geht, den aktuellen Stand der Wissenschaft im Bereich des Beton-3D-Drucks zu erfassen. Dabei werden wissenschaftliche Arbeiten, technische Berichte und Entwicklungen in der Bauindustrie eingehend untersucht, um eine fundierte Basis zu schaffen.

Um verschiedene Betondruckverfahren zu evaluieren, wurden mithilfe eines Interviewleitfadens (Anhang A) strukturierte Interviews mit Experten aus verschiedenen Schlüsselbereichen geführt, darunter Druckerhersteller, Druckeranwender und Vertreter von Bauunternehmen. Die Interviews zielen darauf ab, die Herausforderungen, Potenziale und Entwicklungen im Bereich des Beton-3D-Drucks zu identifizieren. Die gezielte Auswahl einer mittels konventioneller Schalung errichteten Stahlbetonsäule dient als Basis für den Hauptteil der Forschung. Sie bildet das zentrale Vergleichsobjekt, anhand dessen Prototypen, die im Maßstab nach den Betondruckverfahren Concrete Printing und Selective Paste Intrusion hergestellt wurden, evaluiert werden. Durch den Vergleich dieser experimentellen Modelle mit der konventionell hergestellten Vergleichs-Säule sollen detaillierte Erkenntnisse über Stabilität, Struktur und ästhetische Eigenschaften der Säulen generiert werden.

Die Daten, auf denen die Arbeit fußt, werden demnach durch Interviews, detaillierte Dokumentation der Prototypenherstellung und instrumentelle Messungen gesammelt. Eine umfassende qualitative und quantitative Analyse der gesammelten Daten ermöglicht es, die Stärken und Schwächen der Betondruckverfahren im Vergleich zur konventionellen Bauweise zu identifizieren. Basierend auf den Ergebnissen der Forschung, werden Schlussfolgerungen gezogen, die die Erkenntnisse aus Experteninterviews und Prototypenvergleichen integrieren. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen im Bereich des Beton-3D-Drucks und Empfehlungen für potenzielle Anwendungen in der Bauindustrie.

1.4 Begriffsbestimmungen

3D-Betondruck (3D Concrete Printing) Ein innovatives Verfahren der additiven Fertigung, bei dem Beton schichtweise aufgetragen wird, um Bauteile mit komplexen Geometrien ohne die Notwendigkeit herkömmlicher Schalungen zu erstellen.

Additive Fertigung (Additive Manufacturing, AM) Ein Produktionsprozess, bei dem ein Objekt durch das schichtweise Hinzufügen von Material basierend auf digitalen 3D-Modellen erstellt wird.

Concrete Printing Ein spezifisches 3D-Druckverfahren, bei dem Beton direkt durch eine Düse extrudiert wird, um schichtweise Strukturen zu erstellen.

Selective Paste Intrusion (SPI) Ein 3D-Druckverfahren, bei dem selektiv eine Betonpaste in eine vorgeformte Form oder Struktur injiziert wird, um komplexe Bauteile herzustellen.

Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC, Ultra-High Performance Concrete) Ein Beton mit extrem hoher Festigkeit und Haltbarkeit, der durch spezielle Mischungen und Herstellungsverfahren erzielt wird.

Selbstverdichtender Beton (SCC, Self-Compacting Concrete) Ein Beton, der sich aufgrund seiner besonderen Zusammensetzung selbst verdichtet und keine zusätzliche mechanische Verdichtung benötigt.

Rapid Prototyping Ein Anwendungsbereich der additiven Fertigung, bei dem Prototypen und Modelle schnell hergestellt werden, um Designkonzepte zu testen und zu verifizieren.

Rapid Tooling Ein Anwendungsbereich der additiven Fertigung, bei dem Werkzeuge und Formen schnell hergestellt werden, um die Produktionseffizienz zu steigern.

Direct Manufacturing Ein Anwendungsbereich der additiven Fertigung, bei dem Endprodukte direkt durch 3D-Druck hergestellt werden, ohne den Umweg über traditionelle Fertigungsmethoden.

Additive Repair Ein Anwendungsbereich der additiven Fertigung, bei dem beschädigte Bauteile durch den gezielten 3D-Druck von Material repariert und wiederhergestellt werden.

w/z-Wert (Water-Cement Ratio) Das Verhältnis von Wasser zu Zement in einer Betonmischung, das die Festigkeit und Verarbeitbarkeit des Betons beeinflusst.

DFAB House Ein Projekt, bei dem modernste Technologien wie 3D-gedruckte Schalungen und Smart Dynamic Casting zur Erstellung eines voll funktionsfähigen dreistöckigen Hauses verwendet wurden.

1.5 Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
AM	Additive Manufacturing (Additive Fertigung)
BIM	Building Information Modeling (Bauwerksdatenmodellierung)
CAD	Computer-Aided Design (Rechnergestütztes Konstruieren)
CAM	Computer-Aided Manufacturing (Rechnergestützte Fertigung)
CC	Contour Crafting
3DCP	3D Concrete Printing (3D-Betondruck)
SC3DP	Shotcrete 3D Printing
CEM	Zement nach EN 197-1 Klassifizierung
CNC	Computer Numerical Control (Computergestützte numerische Steuerung)

DfAM	Design for Additive Manufacturing (Gestaltung für die additive Fertigung)
FDM	Fused Deposition Modeling (Schmelzschichtung)
KPI	Key Performance Indicator (Leistungskennzahl)
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
PLA	Polylactic Acid (Polymilchsäure)
PVC	Polyvinylchlorid
RAP	Rapid Prototyping (Schnellprototypenbau)
SCC	Self-Compacting Concrete (Selbstverdichtender Beton)
SLA	Stereolithography (Stereolithografie)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektives Lasersintern)
SPI	Selective Paste Intrusion
STL	Standard Tessellation Language (Standard-Tessellierungssprache, Dateiformat für 3D-Modelle)
UHPC	Ultra-High Performance Concrete (Ultra-Hochleistungsbeton)
w/z-Wert	Wasser-Zement-Verhältnis (Water-Cement Ratio)

Kapitel 2

Konventionelle Konstruktionsweisen im Betonbau

Die etablierten Konstruktionsweisen im Betonbau bilden das Fundament einer Vielzahl von Bauvorhaben weltweit und sind Ausdruck einer bewährten Tradition im Baugewerbe.¹⁵ Die Verwendung von Beton als Baustoff ermöglicht eine breite Palette von Anwendungen und bietet eine solide Grundlage für langlebige und stabile Bauwerke.¹⁵ Diese Arbeit befasst sich eingehend mit den traditionellen Konstruktionsmethoden im Betonbau, nachdem diese sich in verschiedenen Bauprojekten, von Wohngebäuden bis zu industriellen Strukturen, bewährt haben. Dabei werden Schlüsselaspekte, Vorteile und Herausforderungen dieser konventionellen Methoden erkundet und deren Bedeutung im zeitgenössischen Baugewerbe untersucht. Es ist von entscheidender Bedeutung, die Grundprinzipien dieser traditionellen Bauweisen zu verstehen, um die Grundlage für künftige Entwicklungen, Innovationen und die Integration moderner Technologien im Betonbau zu schaffen. Im Betonbau gibt es verschiedene Fertigungsverfahren, darunter:¹⁵

- Ortbetonbauweise: Der Beton wird auf der Baustelle in Schalungen gegossen und vor Ort ausgehärtet.
- Fertigteilbauweise: Bauteile wie Decken, Wände, Balken oder Stützen werden in einer Fabrik oder Werkhalle vorgefertigt und im Anschluss auf der Baustelle montiert.
- Vorspannbetonbauweise: Durch Spannglieder oder Vorspannkabel wird eine Zugspannung im Beton erzeugt. Dadurch können größere Spannweiten und schlankere Bauteile realisiert werden.
- Schalenbauweise: Schalen aus dünnem Beton werden hergestellt und aufeinandergestapelt, um eine tragende Struktur zu bilden. Diese Methode eignet sich vor allem für kleinere und weniger komplexe Gebäude.
- Spritzbetonbauweise: Beton wird mit Druckluft auf eine Fläche gespritzt und verdichtet. Diese Methode eignet sich für nachträgliche Verstärkung von Stahlbetonbauteilen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und für deren Reprofilierung bei einer Instandsetzung.

Je nach Anforderungen und Einsatzzweck können die verschiedenen Fertigungsverfahren miteinander kombiniert werden.¹⁵ Bei einer Mischbauweise werden vorgefertigte Bauteile mit vor Ort gegossenem Beton verbunden, um eine schnellere und effizientere Bauweise zu ermöglichen. Ein Beispiel dafür sind Elementplatten (Filigrandecken), die als verlorene Schalung dienen und mit Ortbeton ergänzt werden.

¹⁵Vgl. [63] Peck

2.1 Baustoff Beton

Beton ist ein langfristig erprobter und in breiter Masse eingesetzter Baustoff, der als monolithisches, gegossenes Material mit hoher Tragkraft in vielen Bereichen des Bauwesens verwendet wird. Dabei besteht Beton traditionell aus Gesteinskörnung, Wasser, Zement und Zuschlagstoffen.¹⁶ Das Verhältnis von Wasser zu Zement und die resultierende Konsistenz des Zementmörtels haben einen erheblichen Einfluss auf die Qualität und Verarbeitbarkeit von frischem Beton.¹⁷ Die Gesteinskörnung stellt mengenmäßig den größten Anteil des Betons und ihre Struktur ist entscheidend für die Betonqualität.¹⁶ Die Gesteinskörnung kann aus gebrochenen oder ganzen Körnern bestehen und ist mineralischen Ursprungs, kann aber Nebenprodukt oder Abfallmaterial der Industrie sein.¹⁶ Wichtig ist, dass die Gesteinskörnung eine bestimmte Kornfestigkeit und eine gute Verbindung mit dem Zementmörtel aufweist, um die Festigkeit des Betons nicht zu beeinträchtigen.¹⁶

Die Korngröße wird je nach Herkunft, Struktur, Dichte und Form der Körner bestimmt und kann variieren.¹⁷ Es gibt verschiedene Anforderungen an die geometrischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften der Korngrößen und die Frostbeständigkeit. Es gibt daher spezielle Gruppen und Zusammensetzungen von Körnungen, deren Formen sich voneinander unterscheiden.¹⁶

Die Sieblinie ist entscheidend für die spätere Qualität des Betons.¹⁷ Diese Kurve wird erstellt, indem die Gesteinskörner durch Siebe mit unterschiedlichen Maschenweiten gesiebt werden, die den Korngrößen entsprechen.¹⁷ Körner mit einer Größe von bis zu 0,125 mm werden als „Mehl“ bezeichnet. Dieses hochwertige Material wirkt sich positiv auf die Verarbeitbarkeit von frischem Beton aus und gewährleistet eine dichtere Struktur, was für Sichtbeton oder wasserundurchlässigen Beton besonders wichtig ist. Allerdings führt dies zu höheren Produktionskosten aufgrund des höheren Zementgehalts.¹⁶

Ein weiteres Schlüsselmaterial im Beton ist der Zement, der in fünf Haupttypen (CEM I-V) unterteilt ist.¹⁶ Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das den Beton zusammenhält. Der Hochofenzement (CEM III) wird verwendet, um Beton mit ultrahoher Festigkeit (UHPC) herzustellen und hat neben einer geringeren Porosität (Schutz vor Flüssigkeitsdurchdringung) viele weitere positive Eigenschaften. Die Produktion erfordert weniger Primärenergie und schont natürliche Ressourcen. Risse aufgrund thermischer Belastungen sind weniger wahrscheinlich, und die Beständigkeit gegenüber Chemikalien und Salzen ist höher.¹⁷

Die Mischung aus Wasser und Zement, der sogenannte w/z-Wert, wird in Abhängigkeit von der Optik und der gewünschten Funktion festgelegt.¹⁷ Der Wert beschreibt das Verhältnis von Wassermasse zu Zement und beeinflusst die Eigenschaften des Betons. Je höher der w/z-Wert ist, desto niedriger ist seine Festigkeit. Das Verhältnis kann zudem die Farbe beeinflussen. Ein niedriger w/z-Wert beispielsweise lässt die Betonoberfläche dunkler erscheinen.¹⁷

Damit Beton aushärten kann (Hydratation), muss er einen w/z-Wert von mindestens 0,4 haben (entspricht 40 % Wasser). Bei einem w/z-Wert von über 40 % kann der Zement das Wasser nicht mehr binden, und die Flüssigkeit tritt aus („Bluten“). Wenn der Zementgehalt zu hoch ist, besteht wiederum die Gefahr von Schrumpfung und schneller Austrocknung.¹⁷

Zusatzmittel sind in flüssiger oder pulverförmiger Form erhältlich oder können als Körner oder Pasten zugesetzt werden. Sie beeinflussen die Eigenschaften von frischem oder gehärtetem Beton durch chemische oder physikalische Prozesse und ändern die Verarbeitbarkeit oder die Luftgehaltsrate.¹⁷ Zusatzmittel beeinflussen den Frischbeton nur geringfügig und können in Bezug auf das Volumen vernachlässigt werden. Gebräuchliche Betonzusatzmittel sind beispielsweise Betonverflüssiger oder Luftporenbildner. Zusatzstoffe wie Pigmente oder Flugasche hingegen

¹⁶Vgl. [35] Hanses, S. 9-28

¹⁷Vgl. [63] Peck, S. 10-33

müssen aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften als Volumenbestandteile berücksichtigt werden.¹⁸

Die Ortbetonbauweise ist eine konventionelle Methode im Bauwesen, bei der Beton vor Ort auf der Baustelle gemischt und gegossen wird und danach aushärtet, um individuelle Bauteile oder ganze Bauwerke zu erstellen. Im Gegensatz zur Fertigteilbauweise, bei der vorproduzierte Bauelemente geliefert und vor Ort montiert werden, erlaubt die Ortbetonbauweise eine flexible und maßgeschneiderte Umsetzung von Bauprojekten.¹⁸

Der Prozess der Ortbetonbauweise beginnt mit der Errichtung einer Schalung, die die äußere Form des zu erstellenden Bauteils definiert. Diese Schalung kann aus verschiedenen Materialien wie Holz, Stahl oder Kunststoff bestehen und wird entsprechend den spezifischen Anforderungen des Bauvorhabens konstruiert. Nach dem Errichten der Schalung erfolgt der Einbau der Bewehrung, meist bestehend aus Stahlstangen oder -matten, um dem Beton zusätzliche Festigkeit und Tragfähigkeit zu verleihen.¹⁸

Anschließend wird der frische Beton in die vorbereitete Schalung eingebracht. Dieser Beton wird zuvor in einer Betonmischanlage oder gegebenenfalls auf der Baustelle selbst gemischt. Nach dem Einfüllen des Betons wird er verdichtet, um Luftblasen zu entfernen und eine homogene Struktur zu gewährleisten.¹⁸ Der Beton wird dann in der Schalung belassen, bis er ausreichend abgebunden und gehärtet ist.

2.2 Schalung

Ähnlich wie eine Kuchenform bildet die Schalung die negative Form eines Betonbauteils. Sie dient als Gussform für den flüssigen Beton. Es ist dabei wichtig, dass die Schalung so dimensioniert ist, dass sie den Druck, der durch das Einbringen des Betons entsteht, aufnehmen kann.¹⁹

Die Schalung besteht typischerweise aus einer lastabtragende Struktur sowie der Schalhaut, welche die Kontaktoberfläche für den Beton bildet. Um sicherzustellen, dass der Beton nach dem Aushärten leicht von der Schalung gelöst werden kann, wird die Schalhaut zuvor mit einem Trennmittel behandelt, etwa mit Öl oder Wachs.¹⁹

Für orthogonale Schalungen von Wänden werden vermehrt Systemschalungen verwendet, die durch sogenannte Schalungsanker zusammengehalten werden, damit sie dem Druck des Betons standhalten können.¹⁹ Bei der Entfernung der Schaltafeln verbleiben Öffnungen im Betonbauteil, und zwar dort, wo zuvor die Schalungsanker waren. Die Anordnung dieser Öffnungen sollte in der Planung berücksichtigt werden, sie können geschlossen oder an das gestalterische Konzept angepasst werden.

Das Schalungsmaterial kann aus verschiedenen Materialien bestehen, die wiederum die Oberfläche des entstehenden Betonbauteils beeinflussen. So können Holzschalungen auf verschiedene Arten bearbeitet werden, um glatte oder raue Oberflächen zu erzielen.¹⁹ Die Wahl des Materials beeinflusst zudem die Saugfähigkeit, die für die Bildung der Betonoberfläche entscheidend ist.¹⁹ Holz entfernt etwa während des Abbindens Wasser und Luft aus dem Beton und trägt zu einer gleichmäßigen Oberflächenqualität bei.¹⁸ Neben den klassischen Holzschalungen gibt es solche mit einer Schalhaut aus Kunststoff, Aluminium oder Stahl, die nicht saugfähig sind. Solche nicht saugfähigen Schalungen können die Bildung von Poren begünstigen und zu einem schnelleren Auftreten marmorierter Oberflächen führen.¹⁹

¹⁸Vgl. [63] Peck, S. 10-55

¹⁹Vgl. [35] Hanses, S. 28-31

Neben dem Material werden Schalungssysteme nach der Konstruktionsart unterschieden. Eines der am häufigsten verwendeten ist dabei das Rahmenschalungssystem.²⁰ Dessen Schalungspaneele bestehen aus einem einzigen Rahmen aus Stahl oder Aluminium, an dem die Schalhaut aus Holz oder Kunststoff befestigt ist. Dieses modulare System eignet sich gut für rechteckige oder flächige Bauteile und ermöglicht eine schnelle Bauweise. Kurven oder Neigungen sind dagegen in der Regel nur mit speziellem Zubehör oder anderen Systemen realisierbar.²⁰

Abbildung 2.1 zeigt eine Luftaufnahme eines eingeschalteten Kellergeschosses. Zum Einsatz kam bei diesem Projekt das modulare Wandschalssystem Maxim des italienischen Schalungsherstellers Interfama. Es wurde eigens für den Wohnungsbau entwickelt. Um Gewicht einzusparen, besteht der Rahmen des Wandschalssystems aus Aluminium, die Schalhaut aus kreuzweise verleimtem Birkenfurnier und einer beidseitigen Beschichtung aus verstärktem Phenolharzfilm.

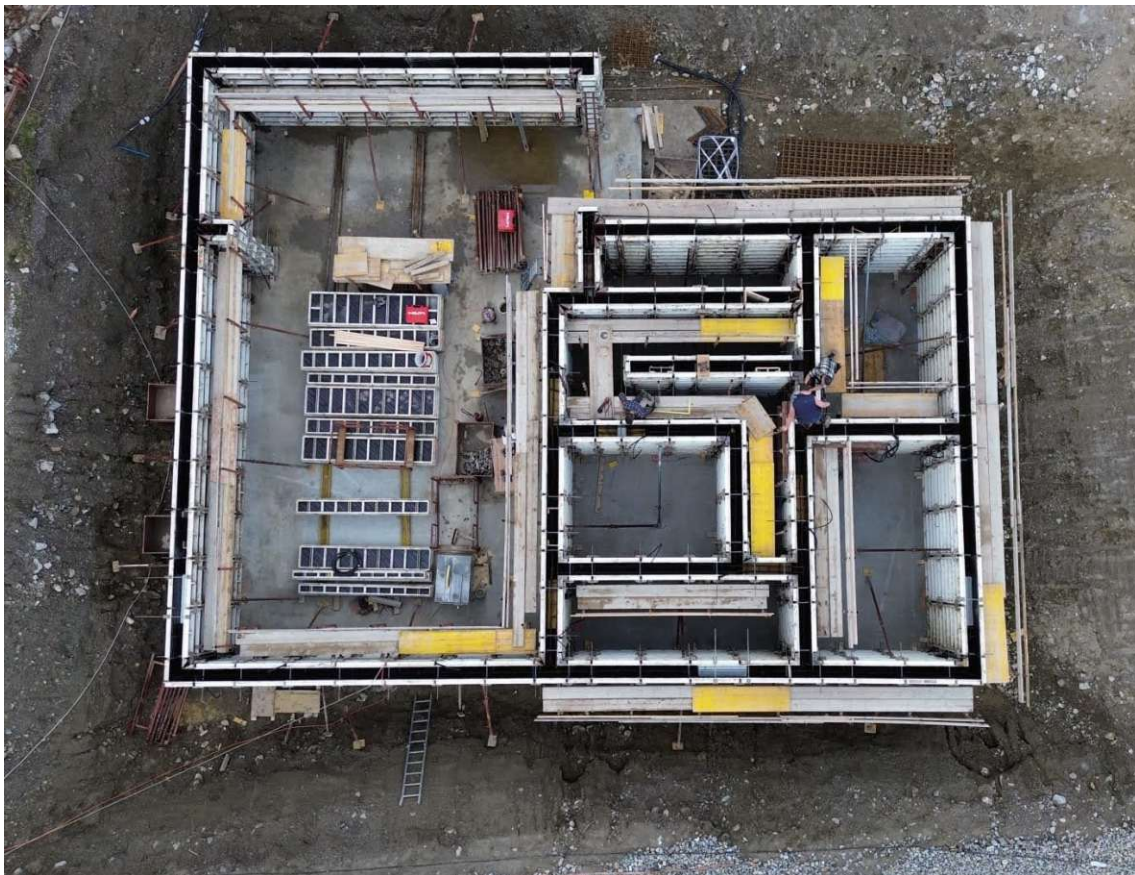


Abb. 2.1: Einsatz eines modularen Schalungssystems für Ort betonwände im Kellergeschoss (Quelle: Eigene Aufnahme)

Die Gesamtstärke der Schalhaut beträgt 15 mm.²¹ Die Beschichtung durch das Kunstharz erhöht die Lebensdauer der Schalhaut und sorgt für besonders glatte Betonoberflächen. Durch die Modularität, ECKelemente und Zwischenmaße können neben linearen Wandabschnitten gesamte Grundrisse in einem Abschnitt geschalt werden. In Abbildung 2.1 sind liegende Elemente in verschiedenen Größen zu erkennen. Die verfügbaren Breiten der Schalungselemente reichen bei diesem System von 20 bis 200 cm.

²⁰Vgl. [35] Hanses, S. 31-32

²¹Vgl. [43] Interfama

2.3 Fertigteilbauweise

Bei der Fertigteilbauweise werden Betonbauteile wie etwa Fertigdecken, Fertigwände oder Fertigsstützen in einer Werkshalle vorproduziert und auf der Baustelle montiert.²² Im Gegensatz zur Ortbetonbauweise, bei der der Beton vor Ort gegossen wird, werden die Betonfertigteile bereits in einem Werk hergestellt und auf der Baustelle nur noch montiert.

Im Prozess der Herstellung von Stahlbetonfertigteilen spiegeln sich die grundlegenden Schritte wider, die bei der Ortbetonherstellung gesetzt werden. Hierzu zählen der Formenbau, die Bewehrung und das Betonieren.²³ Zusätzlich kommt bei der Fertigung von Betonfertigteilen oft eine Wärmebehandlung zum Einsatz, um ein schnelleres Ausschalen zu ermöglichen.

Die Ausschallfrist bei der Herstellung von Betonfertigteilen liegt in der Regel zwischen 14 und 18 Stunden.²³ Innerhalb dieser Zeit muss der Beton eine ausreichende Festigkeit aufgebaut haben, um die erste schwere Belastung zu überstehen, nämlich das Herausheben des Bauteils aus der Form und den Versatz zum Lagerplatz. Die Betondruckfestigkeit von Fertigteilen wird insbesondere auf den Entschal- und Abhebezeitpunkt hin bemessen. Oftmals liegt diese Druckfestigkeit über den Vorgaben der Tragwerksbemessung.

Die erhöhte Druckfestigkeit des Betons hat nicht nur Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Bauteils, sondern wirkt sich positiv auf die Dichtigkeit der Betondeckung aus und erhöht somit die Dauerhaftigkeit des Bauteils. Diese Verbesserungen führen zu einer insgesamt höheren Qualität und Langlebigkeit der Betonfertigteile.²³

Filigrandecken und Filigranwände stellen eine Kombination aus Fertigteilbauweise und Ortbetonbauweise dar. Bei dieser Methode werden im Werk Halbfertigteile hergestellt, die vor Ort mit Frischbeton verfüllt werden. Dies ermöglicht die werkseitige Einbindung von Zugbewehrung und Gitterträgern, die den späteren Verbund mit Ortbeton gewährleisten. Bei der Filigranwand wird die Außenschale in bewehrtem Beton hergestellt und auf der Baustelle mit Ortbeton vergossen. Filigrandecken dienen als untere Schalung und werden mit Ortbeton aufbetoniert. Als vorgespannte Bauteile ermöglichen Filigrandecken große Spannweiten.²²

2.4 Gegenüberstellung von Ortbetonbauweise und Fertigteilbauweise

Ortbeton- und Betonfertigteilbauweise unterscheiden sich grundlegend. Während der Beton bei der Ortbetonbauweise vor Ort gegossen wird, werden die Bauteile bei der Betonfertigteilbauweise bereits im Werk hergestellt und auf die Baustelle geliefert. Dieser Ansatz aus der stationären Fertigungsindustrie ermöglicht nicht nur die Senkung der Lohnkosten, sondern eine Verkürzung der Bauzeit. Diese Verkürzung ergibt sich aus der Entkopplung der Elementproduktion von der Arbeit auf der Baustelle.²⁴

Während auf der Baustelle die Baugrube ausgehoben und gesichert wird sowie die Fundamente hergestellt werden, laufen im Fertigteilwerk bereits parallele Produktionsprozesse für Stützen, Unterzüge und andere Bauelemente. Weil Fertigteilwerke weniger anfällig für Witterungseinflüsse sind als Baustellen, kann eine kontinuierliche und konsistente Produktion gewährleistet werden, und zwar unabhängig von den Wetterbedingungen vor Ort. Ein weiterer Vorteil der Betonfertigteilbauweise ist die höhere Präzision der Bauteile, da sie unter kontrollierten Bedingungen im Werk gefertigt werden.²⁴

Während der große Vorteil der Fertigteilbauweise in der kurzen Bauzeit liegt, die sich daraus ergibt, dass die Bauteile bereits vorgefertigt sind und nur noch montiert werden müssen, bietet

²²Vgl. [35] Hanses, S. 40-58

²³Vgl. [63] Peck, S. 51-52

²⁴Vgl. [63] Peck, S. 35

die Ortbetonweise eine höhere Flexibilität bei der Gestaltung. Der Ortbeton kann an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Zudem ist die Logistik bei schwer zugänglichen Baustellen einfacher zu bewerkstelligen.²⁵

Nachdem beide Bauweisen Vor- und Nachteile haben, hängt die Entscheidung für eine der beiden von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören die örtlichen Gegebenheiten, der Zeit- und Kostenfaktor sowie die gestalterischen Anforderungen.²⁵ Die Konstruktionszeit bei der Ortbetonbauweise ist im Vergleich zur Betonfertigteilterbauweise länger. Der Grund dafür ist, dass die Bauteile direkt auf der Baustelle erstellt werden müssen, was ein höheres Maß an Arbeitsaufwand erfordert.²⁵ Bei der Betonfertigteilterbauweise sind die Möglichkeiten aufgrund der standardisierten Fertigung dafür begrenzter. Für die Vorfertigung von Fertigteilen werden die Pläne bereits zu einem früheren Zeitpunkt benötigt, kurzfristige Anpassungen sind nur begrenzt möglich.²⁵

Um die Stärken beider Herstellungsweisen zu nutzen, kommt eine Hybridlösung zum Einsatz. Sie ermöglicht die effiziente Herstellung komplexer Bauteile im Werk, die dann vor Ort mit Ortbetonelementen kombiniert werden. Dieser Ansatz erlaubt die Aufnahme auftretender Toleranzen und bietet somit eine flexible Lösung.²⁶

²⁵Vgl. [63] Peck, S. 35

²⁶Vgl. [35] Hanses, S. 40

Kapitel 3

Stand der Technik in der additiven Fertigung (AM) mit mineralischen Baustoffen

Grundsätzlich lassen sich Herstellungsprozesse in drei Gruppen unterteilen.²⁷ In der subtraktiven Fertigung werden Bauteile mittels Materialabtrag hergestellt. Dazu zählen beispielsweise der Herstellungsprozess durch Fräsen, Schleifen oder Drehen. Dagegen werden in der formativen Fertigung Bauteile durch Umformung wie beispielsweise Schmieden oder Walzen hergestellt.²⁷ Die additive Fertigung (AM) beschreibt die Herstellung von Bauteilen durch das Auftragen eines zugeführten Materials in Schichten.²⁷ Im Vergleich zur subtraktiven Fertigung fallen bei der additiven Fertigung nahezu keine Abfälle an. Zudem macht das Schichtbauprinzip die Herstellung komplexer Formen ohne Zuhilfenahme von Werkzeugen möglich.

Abbildung 3.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Herstellungskosten und Produktionsmenge bei additiver und konventioneller Fertigung. Während die konventionelle Fertigung hohe Anfangskosten durch Formen und Werkzeuge verursacht, die sich erst bei großen Stückzahlen amortisieren, bleiben die Kosten in der additiven Fertigung über alle Produktionsmengen hinweg relativ konstant. Dies liegt an der Flexibilität der additiven Verfahren, die besonders für kleine Stückzahlen und maßgeschneiderte Bauteile effizient sind. Diese Vorteile sind im Bauwesen, das häufig durch Unikatifertigung und komplexe Strukturen gekennzeichnet ist, besonders relevant.

Zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile gibt es verschiedene methodische Ansätze. Diese können entweder phasenübergreifend auf den gesamten Produktentwicklungsprozess oder auf bestimmte Entwicklungsphasen ausgerichtet sein.²⁸ Einigkeit besteht in der Literatur darüber, dass das Potenzial der AM besonders in der Konzeptfindungsphase hoch ist.²⁹ Allerdings sind konkrete Gestaltungsrichtlinien für spätere Entwicklungsphasen, in denen spezifische AM-Verfahren berücksichtigt werden, nur begrenzt verfügbar.²⁹ Die Ansätze zur Unterstützung früher Entwicklungsphasen setzen dabei in der Regel auf methodischen Vorgehensweisen im Entwicklungsprozess auf, die jedoch in der industriellen Praxis nicht immer vorhanden, erforderlich oder dokumentiert sind.³⁰

Da der 3D-Betondruck eine grundlegend neue Methode darstellt, verfügen Planer und Ausführende noch über kein Wissen aus Langzeiterfahrungen. Es fehlen normative Vorgaben, die für den traditionellen Hochbau gelten. Die bestehenden Normen und Richtlinien sind meist schwierig oder gar nicht anwendbar, was zu einem erhöhten finanziellen Aufwand durch notwendige experimentelle Nachweise führt. Diese experimentellen Nachweise sind erforderlich, um die Widerstandsfähigkeit der gedruckten Bauwerke zu gewährleisten und den Einsatz des 3D-Betondrucks in der Praxis zu legitimieren.³¹

²⁷Vgl. [48] Krause, S. 8

²⁸Vgl. [49] Lachmayer et al., S. 6

²⁹Vgl. [49] Lachmayer et al., S. 47-55

³⁰Vgl. [49] Lachmayer et al., S. 113

³¹Vgl. [31] Grassers, S. 19 ff.

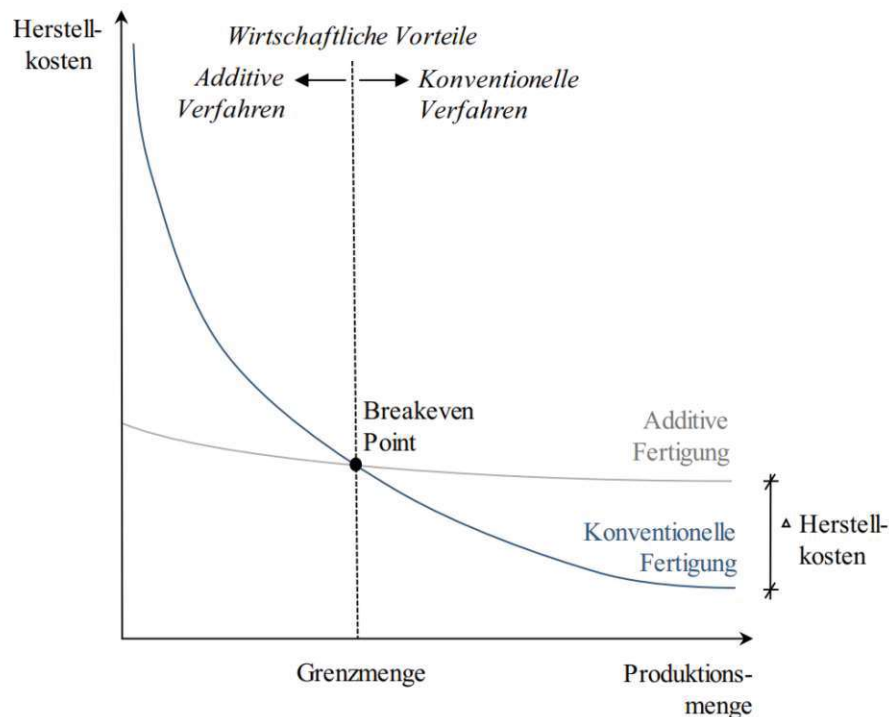


Abb. 3.1: Zusammenhang Herstellungskosten/Produktionsmenge bei additiver und konventioneller Fertigung (Quelle: Krause [48], S. 27)

In der additiven Fertigung mit mineralischen Baustoffen werden verschiedene Druckverfahren eingesetzt, darunter konturfrees Drucken und selektive Zementaktivierung.³² Diese Verfahren ermöglichen die schichtweise Erstellung von Bauwerken, wobei komplexe Geometrien realisierbar werden. Daher findet die additive Fertigung mit mineralischen Baustoffen bereits in verschiedenen Baubereichen Anwendung. Dazu gehört etwa die Herstellung von Prototypen, architektonischen Elementen und individuellen Bauteilen. Gerade weil sich die Branche von der additiven Fertigung eine vielversprechende Zukunft erwartet, wird im Bereich des Beton-3D-Drucks intensive Forschungsarbeit betrieben. Dabei konzentriert sich die Forschung zum einen auf die Entwicklung spezieller Betonmischungen, die den Anforderungen des Druckprozesses entsprechen. Optimierte werden vor allem Eigenschaften wie Fließfähigkeit, Haftung zwischen den Schichten und Aushärtezeiten.³³ Zum anderen wird an der Optimierung der Druckgeschwindigkeit und der Erweiterung der Anwendungsbereiche gearbeitet, um den 3D-Druck als Bautechnologie zu etablieren.³²

Als ein erstes Fazit kann festgehalten werden: Die digitale Entwicklung von Fertigungsprozessen im Bauwesen eröffnet vielfältige Möglichkeiten und revolutioniert die Art und Weise, wie Baukomponenten hergestellt, geplant und implementiert werden. Durch den Einsatz digitaler Technologien können verschiedene Aspekte des Fertigungsprozesses optimiert werden: von der Konzeption und Planung bis hin zur Produktion und Montage. Ein konkretes Beispiel, das diese Möglichkeiten verdeutlicht, ist der Einsatz von 3D-Drucktechnologien im Bereich der Fertigteilherstellung. Sie ermöglicht die Herstellung von Bauteilen in geringen Stückzahlen, und zwar ganz ohne den Einsatz herstellerspezifischer Formen, was einen spürbaren ökonomischen Vorteil speziell für die Baubranche mit sich bringt, in der vermehrt Einzelstücke mit hohem Komplexitätsgrad hergestellt werden.

³²Vgl. [48] Krause, S. 11-22

³³Vgl. [48] Krause, S. 50

3.1 Übersicht 3D-Drucktechnologien

Die 3D-Drucktechnologie ist eine neue Technologie, die sich in den letzten Jahren rasant entwickelt hat. Sie ermöglicht es, Objekte aus einer Vielzahl von Materialien – von Kunststoffen über Metalle und Keramik bis zu Gewebe – zu drucken. In der Industrie kommt der 3D-Druck in erster Linie bei der Herstellung von Prototypen, Werkzeugen und Ersatzteilen zum Einsatz und leistet einen Beitrag dazu, die Produktentwicklung zu beschleunigen, die Kosten zu senken und die Effizienz zu steigern.³⁴ Im Gesundheitswesen wird der 3D-Druck zur Herstellung von Prothesen, Implantaten und chirurgischen Instrumenten eingesetzt. Dies kann dazu beitragen, die Lebensqualität von Patienten zu verbessern und die Kosten des Gesundheitswesens zu senken.³⁵ Im Konsumgütersektor wird der 3D-Druck zur Herstellung personalisierter Produkte, etwa von Schmuck oder Spielzeug genutzt. Dies kann dazu beitragen, die Produktvielfalt zu erhöhen und die Bedürfnisse von Verbrauchern zu erfüllen.³⁶

Gerade weil die Einsatzmöglichkeiten des 3D-Drucks in den unterschiedlichsten Branchen so vielfältig und die damit zu erzielenden Vorteile groß sind, wird viel in die Forschung und Entwicklung dieser Technologie investiert. So wird an der Entwicklung neuer, schnellerer und effizienterer Verfahren gearbeitet, etwa an 3D-Druck mit Licht oder Laser.³⁷ Zudem ist die Entwicklung nachhaltigerer Produktionsmethoden ein weiterer Forschungsschwerpunkt. Dabei geht es beispielsweise um den Einsatz recycelter Materialien oder erneuerbarer Energien, was dazu beiträgt, die Umweltbelastungen durch den 3D-Druck zu reduzieren.³⁸ Nicht zuletzt arbeitet die Forschung auf Materialien mit verbesserten Eigenschaften hin, die wiederum Kosten und Genauigkeit des 3D-Drucks nachhaltig verbessern können.³⁹

Unabhängig davon, worauf der Forschungsschwerpunkt jeweils liegt, wird die Entwicklung der additiven Fertigungstechnologie durch Fortschritte in Materialwissenschaften, Robotik und maschinellem Lernen ständig optimiert.⁴⁰ Das gilt ebenfalls für die Entwicklung und Optimierung von Beton-3D-Druckverfahren, die von neuen Materialien, präziseren Druckköpfen und fortschrittlicher Software profitieren. Dabei fällt auf, dass die meisten Verfahrenstechnologien und Bewegungssysteme, die im Baubereich Anwendung finden, aus anderen Industriezweigen übernommen und für die eigenen Zwecke adaptiert wurden.³⁵ Im Rahmen dieser Adaptierung gilt es, die besonderen Herausforderungen zu berücksichtigen, die die Anwendung in der Baubranche mit sich bringt. Beispielhaft zu nennen sind hier die Größe der Bauteile oder die ständig wechselnden Bedingungen bei der Herstellung auf der Baustelle.³⁵ In jedem Fall führt die Übernahme und Adaptierung von Systemen aus anderen Industriezweigen zu einer breiten Palette von Lösungen für den Beton 3D-Druck, zugleich aber zu mangelnder Einheitlichkeit.

Abbildung 3.2 zeigt die 3D-Druckverfahren im Betonbaubereich, die grundsätzlich in drei große Kategorien unterteilt werden können: selektive, ablegende und spritzende Verfahren. Abbildung 3.2 illustriert, welche Methoden für spezifische Anwendungen verwendet werden, wie die Herstellung wiederverwendbarer Schalung, die Herstellung verlorener Schalung, direkte Bauteilherstellung, industrielle Fertigung und Fertigung vor Ort. In allen drei Kategorien sind in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt worden, die vor allem auf die Entwicklung von Technologie und Materialien zurückzuführen sind.⁴¹ In letzterem Bereich ist die Entwicklung spezieller Betonmischungen ein wesentlicher Faktor, wobei der Fokus nicht allein auf der

³⁴Vgl. [71] Richard et al., S. 16

³⁵Vgl. [48] Krause, S. 17-31

³⁶Vgl. [61] Neef et al., S. 74

³⁷Vgl. [71] Richard et al., S. 23

³⁸Vgl. [50] Lachmayer et al., S. 303

³⁹Vgl. [71] Richard et al., S. 244

⁴⁰Vgl. [50] Lachmayer et al., S. 77

⁴¹Vgl. [96] Weger, S. 14

jeweiligen Zusammensetzung aus Sand, Zement, Wasser und Gesteinskörnung liegt, sondern vor diesem Hintergrund auf Faktoren wie Viskosität, Festigkeit der Mischung und nicht zuletzt der Druckbarkeit.⁴²

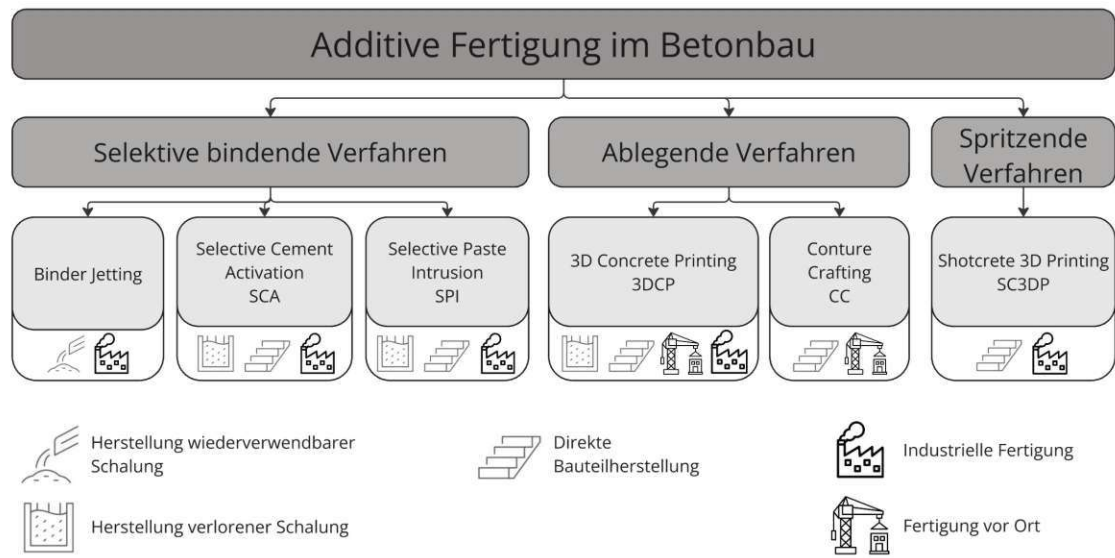


Abb. 3.2: Überblick über die additiven Fertigungsverfahren im Betonbau (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88] und Lowke et al. [54], S. 51)

Eine vielversprechende Entwicklung im Bereich der Beton-3D-Druck-Technologie ist der Einsatz von Robotern zur automatisierten Herstellung von Gebäuden.⁴³ Ein Beispiel dafür ist das Projekt DFAB House, bei dem unter Verwendung modernster Technologien wie 3D-gedruckte Schalung ein vollständig funktionsfähiges dreistöckiges Haus hergestellt wurde.⁴⁴ Abbildung 3.3 zeigt den Innenraum des Gebäudes, das mithilfe von Computerdesign und digitaler Fertigung gebaut wurde. Die fensterseitigen Säulen wurden mit einer dynamischen und flexiblen Schalung hergestellt, die über die Höhe den Querschnitt verändert. Die gegenüberliegende, gekrümmte Wand wird als Mesh Mould Wall bezeichnet. Die Bewehrungsstruktur, die gleichzeitig für die Formgebung der Wand verantwortlich ist, wurde von einem Roboter gefertigt. Abschließend zeigt Abbildung 3.3 die gewichtsoptimierte Decke Smart Slab, die mit 3D-gedruckter Schalung als Betonfertigteile realisiert wurde. Wie dieses Projekt gezeigt hat, ermöglicht der Einsatz von Robotern eine hohe Präzision bei der Herstellung von Betonstrukturen.

Ein weiterer Fortschritt in der additiven Fertigung von mineralischen Baustoffen ist der Einsatz additiver Fertigungsverfahren bei der Herstellung von Schalungsformen.⁴⁵ Die neuen Verfahren ermöglichen es, komplexe Formen und Strukturen effizienter und präziser zu fertigen. Durch die Verwendung 3D-gedruckter Schalungen können demnach die Maßgenauigkeit für den Kunden erhöht und die Montagezeit vor Ort reduziert werden.⁴⁶

3.1.1 Prozesskette der additiven Fertigung

Im Produktionsablauf von additiv gefertigten Produkten gibt es laut Krause [48] drei grundlegende Prozessabschnitte. Demnach beginnt der Prozess mit der Planung und dem Design eines CAD-

⁴²Vgl. [48] Krause, S. 125

⁴³Vgl. [96] Weger, S. 12

⁴⁴Vgl. [23] Dfab House

⁴⁵Vgl. [92] Voxeljet

⁴⁶Vgl. [26] Doka



Abb. 3.3: Das Innere des DFAB-Hauses in Zürich (Quelle: Thrope [82])

Modells, es folgt die Ermittlung der Bauteilkomplexität, die ein wichtiger Indikator für Bauzeit und Nachbearbeitungsumfang ist. Abbildung 3.4 zeigt die allgemeine Prozesskette der additiven Fertigung und deren standardmäßige Unterteilung in drei Phasen: Pre-Process, In-Process, Post-Process.⁴⁷

Die Grundlage der Pre-Process-Phase bilden digitale dreidimensionale Volumenmodelle, aus denen facettierte Oberflächenmodelle abgeleitet werden. Im Gegensatz zur konventionellen Fertigung sind Zwischenschritte wie die Herstellung von Werkzeugen nicht erforderlich. Neben der Gestaltung der Bauteile umfasst diese Phase Simulationen und Optimierungen, um den gestellten Anforderungen gerecht werden und eine geeignete Materialauswahl treffen zu können.⁴⁷ Die Pre-Process-Phase erfordert eine Datenaufbereitung, entweder direkt an der Anlage oder extern über Software. Das dreidimensionale Modell wird in digitale Schichten zerlegt, zudem werden notwendige Zusatz- oder Hilfsgeometrien wie Stützstrukturen erzeugt. Nach diesem Slice-Prozess werden zuerst Prozess- und Maschinenparameter eingestellt, danach die Anlagen für den Druckprozess vorbereitet.⁴⁷ Die Fertigung (In-Process) der Komponenten beginnt unter Berücksichtigung des in der Konstruktionsphase festgelegten Materials. Die im Pre-Process eingestellten Operationen werden umgesetzt, die Fertigungsschritte durch Prozessüberwachungssysteme kontrolliert.⁴⁷

Eine Post-Process-Phase ist bei allen additiven Fertigungsverfahren notwendig, wobei der Aufwand je nach Verfahren variiert. Im Normalfall müssen die gefertigten Bauteile von der Bauplattform getrennt oder Stützstrukturen sowie Pulverrückstände entfernt werden. Zusätzlich sind mechanische Aufbereitungen erforderlich, falls Oberflächenrauheiten reduziert werden sollen.⁴⁷

⁴⁷Vgl. [48] Krause, S. 21-22

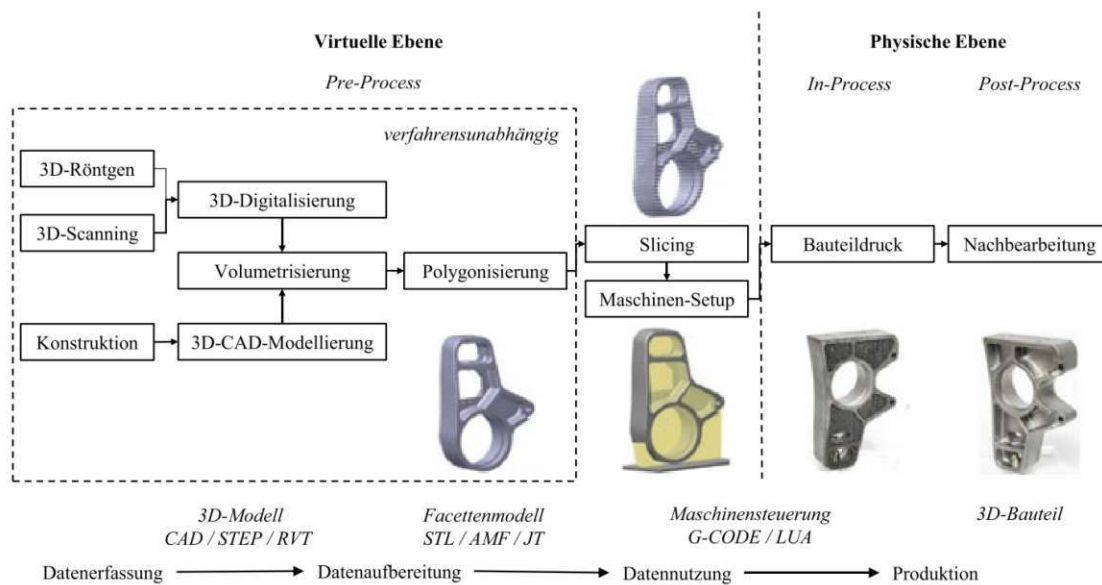


Abb. 3.4: Allgemeine Prozesskette in der Additiven Fertigung (Quelle: Krause [48], S. 21)

Die Post-Process-Phase profitiert zunehmend von der digitalen Entwicklung. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Anlagentechnologie wird der Einfluss manueller Arbeitsschritte auf den additiven Bauprozess reduziert. Beispiele dafür sind die automatisierte Pulverzuführung und das maschinelle Entpacken des Bauteils.⁴⁸

Im 3D-Druckprozess werden einzelne Schritte unterschieden. Der Prozess beginnt mit dem Design des gewünschten Bauteils.⁴⁸ Dafür kann auf 3D-Modellierungssoftware wie beispielsweise Fusion 360 zurückgegriffen oder spezialisierte Software für den Beton-3D-Druck verwendet werden.⁴⁹ Bewährt hat sich in dieser Phase der Einsatz von generativem Design, um unter Zuhilfenahme von KI-Algorithmen und Parametern automatisch optimierte Strukturen zu generieren, die den Belastungsanforderungen entsprechen.⁵⁰ Abgeschlossen wird der Designprozess durch die Vorbereitung der 3D-Druckdatei (G-Code). Bei diesem Schritt kommen Software wie Netfabb oder vergleichbare Tools zum Einsatz.⁴⁹ Die Druckdatei beinhaltet die Anordnung der Bauteile im Druckraum, die Hinzufügung von Stützstrukturen und die Überprüfung auf mögliche Fehler. Am Ende des Designprozesses steht demnach eine digitale Beschreibung des gewählten 3D-Volumens in Form eines CAD-Datensatzes, der mit einer CAD-Software über die STL-Schnittstelle exportiert wird. Im STL-Format ist die Oberfläche des dreidimensionalen Volumenkörpers mittels kleiner Dreiecke dargestellt. Je kleiner dieses Dreiecksnetz gewählt wird, desto höher ist die Genauigkeit des Modells.

Im nächsten Schritt geht es um die Auswahl des geeigneten Betonmischungsverhältnisses, das auf die spezifischen Anforderungen des Druckprozesses und des Bauteils zugeschnitten ist. Falls erforderlich, werden Zusatzstoffe integriert, um die Druckeigenschaften des Betons zu verbessern.⁵¹ Druckparameter wie Druckgeschwindigkeit, Drucktemperatur und die Schichtdicke müssen festgelegt werden. Nach Vorgabe der Schichtdicke wird der Volumenkörper im STL-Format in Scheiben geteilt. Dieser Prozess wird im Zusammenhang mit der additiven Fertigung als "Slicing" bezeichnet. Dünnere Schichten führen zu einer höheren geometrischen Auflösung und somit zu

⁴⁸Vgl. [48] Krause, S. 21-24

⁴⁹Experteninterview

⁵⁰Vgl. [50] Lachmayer et al., S. 90

⁵¹Vgl. [58] Mechtcherine et al., S. 9

einer höheren Bauteilgenauigkeit, während dickere Schichten eine höhere Baugeschwindigkeit ermöglichen.⁵²

Sind all diese Parameter basierend auf dem spezifischen Bauteil und den gewünschten Eigenschaften festgelegt, wird der 3D-Drucker vorbereitet.⁵³ Es geht hier um die Kalibrierung, Reinigung und Überprüfung der Druckdüsen sowie um das Beladen des Druckers mit dem vorbereiteten Betonmischungspulver. Nach der Vorbereitung beginnt der Druckvorgang, der in Echtzeit überwacht wird. So wird sichergestellt, dass das Bauteil gemäß den Spezifikationen erstellt wird und die Druckparameter bei Bedarf während des Druckprozesses angepasst werden können.⁵⁴

Ist der Druckvorgang abgeschlossen, gilt es, Stützstrukturen und überschüssiges Material zu entfernen. Falls notwendig, wird nun die Oberfläche behandelt oder es werden zusätzliche Bearbeitungsschritte für spezifische Designanforderungen gesetzt.⁵⁴ Zu diesem Zeitpunkt werden Qualitätskontrollen durchgeführt, um sicherzustellen, dass das gedruckte Bauteil den erforderlichen Standards und Spezifikationen entspricht. Abgeschlossen wird der Druckvorgang durch die Dokumentation aller durchgeführten Schritte und der Einstellungen für zukünftige Referenzen sowie durch die Analyse von Leistungsdaten, um den Druckprozess kontinuierlich zu verbessern.⁵⁴

3.1.2 Modellierung des Bauteils

Die Produktentstehung gliedert sich typischerweise in die Phasen der Produktentwicklung, der Produktionsvorbereitung sowie der Produktion, die den Beginn des Produktlebenszyklus markiert. Die additive Fertigung greift in verschiedene Bereiche des Entstehungsprozesses eines Produkts ein und wird in vier Hauptanwendungsbereiche unterteilt: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Direct Manufacturing und Additive Repair.⁵⁵

Rapid Prototyping bezieht sich dabei auf die erste Entwicklungsphase, in der wesentliche Informationen für die Produktentwicklung generiert werden. Dies schließt das Design und die Herstellung von Modellen und Prototypen bis hin zu Vorserien ein. Rapid Prototyping wird als „additive Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität, bei denen jedoch spezifische Merkmale ausreichend gut ausgeprägt sind“⁵⁶ definiert. Das Ziel des Rapid Prototyping besteht darin, einfache Modelle zu erstellen, um die Eigenschaften des Produkts frühzeitig zu erkennen und abzusichern. Die additive Fertigung ermöglicht es, Prototypen oder Bauteilmuster schnell verfügbar zu machen, was zu einer verkürzten Entwicklungszeit führt. Für eine reproduzierbare und praxistaugliche Anwendung der additiven Fertigung ist eine rechnergestützte Entwicklungsumgebung erforderlich. Sie umfasst ein Vorgehensmodell zur Konstruktion additiv gefertigter Bauteile, das auf bestehendem Konstruktionswissen basiert. Neben einem Prozessmodell, das eine einheitliche Vorgehensweise ermöglicht, werden relevante Werkzeuge beschrieben. Dazu gehören die Identifikation geeigneter Bauteile, die Auswahl eines Design for Additive Manufacturing (DfAM)-Ansatzes und die Berücksichtigung von Maschinen- und Prozessrestriktionen in Form von Gestaltungsrichtlinien.⁵⁷

Für eine erfolgreiche Adaption der additiven Fertigung als technologisch ausgereiftes Fertigungsverfahren sind geeignete Methoden zur rechnergestützten Validierung der 3D-Geometriemodelle in frühen Entwicklungsphasen notwendig.⁵⁷ Eine besondere Herausforderung besteht darin, die Zuverlässigkeit additiv gefertigter Bauteile frühzeitig abzuschätzen, insbesondere bei der Anwendung bionischer Strukturen, für die Validierungsaspekte zum Teil unklar sind.

⁵²Vgl. [52] Lim et al., S. 266

⁵³Vgl. [48] Krause, S. 129

⁵⁴Vgl. [48] Krause, S. 24-25

⁵⁵Vgl. [49] Lachmayer et al., S.7

⁵⁶Aus [6] Automatisierungstechnik, S.4

⁵⁷Vgl. [49] Lachmayer et al., S.46

Ein fortschrittlicher Ansatz in der Konstruktions- und Designbranche ist das generative Design, bei dem Algorithmen und maschinelles Lernen verwendet werden, um automatisch optimierte und effiziente Designs zu erstellen.⁵⁸ Hier arbeitet der Designer demnach nicht mehr manuell ein Design aus, sondern gibt bestimmte Parameter und Randbedingungen vor. Es ist dann der Algorithmus, der mehrere Iterationen des Designs erstellt. Diese werden anhand vordefinierter Ziele und Anforderungen wie Gewichtsreduktion, Materialminimierung oder Strukturstabilität optimiert.

Im Beton-3D-Druck wird generatives Design verwendet, um materialoptimierte Strukturen zu schaffen. Materialverschwendung wird dadurch verhindert, die Nachhaltigkeit zugleich gesteigert. 3D-Druck und generatives Design wirken demnach optimal zusammen. So macht der 3D-Druck die Herstellung von Strukturen mit komplexen Geometrien möglich, das generative Design nutzt diese Freiheit wiederum, um Formen zu erstellen, die mit herkömmlichen Methoden schwer oder unmöglich zu fertigen wären.⁵⁹ Durch die Berücksichtigung von Belastungen und Kräften kann generatives Design Strukturen schaffen, die optimal auf Anforderungen und Lastverteilungen reagieren. Als Inspiration für effiziente und stabile bionische Strukturen dienen dabei natürliche Strukturen aus dem Tier- und Pflanzenreich.⁶⁰

Dem generativen Ansatz steht das kraftflussoptimierte Modell gegenüber, das auf einer detaillierten Analyse der Belastungen und Kräfte basiert, die auf ein Bauteil wirken.⁶¹ Das Design wird direkt durch den Kraftfluss beeinflusst, der Fokus liegt auf der Reduzierung von Material in Bereichen mit geringer Belastung und der Stärkung von Strukturen in hochbeanspruchten Zonen. Im Wesentlichen bedeutet dies, dass das Bauteil genau dort Material enthält, wo es benötigt wird, gleichzeitig aber leichter und effizienter wird.

Der Hauptunterschied zwischen beiden Ansätzen liegt in ihrer Herangehensweise. So funktioniert das generative Design eher autonom und generiert, basierend auf den vorgegebenen Parametern, eine Vielzahl von Designs, während das kraftflussoptimierte Modell sich stark auf die physikalischen Kräfte konzentriert, die auf das Bauteil einwirken. Beide Methoden können kombiniert werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Dabei fließen die Vorteile der algorithmischen Intelligenz und die Berücksichtigung der Belastungen in den Modellentwurf ein.

3.2 Bewegungssysteme

Für die additive Fertigung mit mineralischen Baustoffen verfolgen Unternehmen und Forschungsinstitute unterschiedliche Ansätze. Neben dem Verfahren selbst, das in erster Linie durch die Druckkopftechnologie bestimmt wird, wird zwischen unterschiedlichen Bewegungssystemen unterschieden.⁶² Bewegungssysteme sind ein wichtiger Bestandteil von 3D-Druckern und für die Bewegung des Druckkopfes über die Bauplattform verantwortlich. Nach dem Konzept von 3D-Druckern aus anderen Industriezweigen wurden die Drucker für die Herstellung von Betonbauteilen entsprechend im Maßstab angepasst. Abbildung 3.5 zeigt Bewegungssysteme, die bei additiven Fertigungsverfahren häufig verwendet werden. Diese Systeme lassen sich in vier Hauptkategorien unterteilen: kartesisch, polar, Delta und Roboterarm.

Im Betonbaubereich gibt es Bewegungssysteme wie einem Roboterarm für die Herstellung von Aussparungen im stationären Umfeld und Großraummanipulatoren für den Druck ganzer Gebäudeabschnitte vor Ort. Gerade für Letzteres, für die additive Fertigung von Gebäudeteilen oder Bauwerken vor Ort, haben Forscher und Hersteller unterschiedliche Systeme entwickelt.

⁵⁸Vgl. [48] Krause, S.18

⁵⁹Vgl. [50] Lachmayer et al., S.13

⁶⁰Vgl. [50] Lachmayer et al., S.168

⁶¹Vgl. [71] Richard et al., S.28

⁶²Vgl. [42] Ingenieur.de

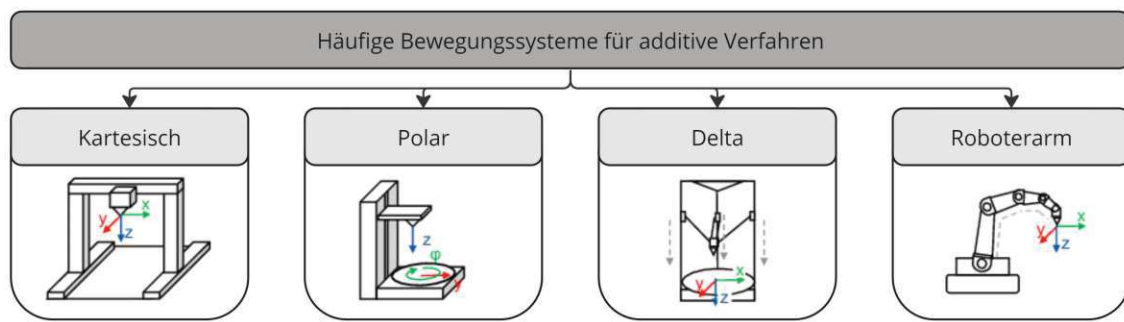


Abb. 3.5: Häufig angewendete Bewegungssysteme in der additiven Fertigung (Quelle: in Anlehnung an Näther et al. [59], S. 23)

Dabei wurden bestehende Systeme aus der stationären, additiven Fertigung im Maßstab angepasst, etwa das Gantry- oder Delta System. Diese werden im Anschluss genauer erläutert. Andere Systeme orientieren sich am Konzept etablierter Baugeräte, beispielsweise einem Kran oder einer Betonpumpe. Die Wahl des Manipulators hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, etwa der Größe des zu fertigenden Bauteils, der benötigten Präzision oder der gewünschten Druckgeschwindigkeit. In der Praxis werden oft mehrere Manipulatoren kombiniert, wie beispielsweise der CyBe RC des niederländischen Herstellers CyBe.⁶³ In jedem Fall erlauben Großraummanipulatoren das Herstellen großer, monolithischer Gebäudeteile. Durch die Herstellung der Struktur direkt vor Ort entfallen der Transport, das Platzieren sowie das Verbinden der einzelnen Fertigteile. Zudem können Einrichtungsgegenstände wie eine Bank oder Badewanne mit dem additiven Verfahren vor Ort mitrealisiert werden. Um aber qualitative Unterschiede und Mängel einzuschränken, muss die Produktionsstätte vor Witterungseinflüssen geschützt sein, vor allem vor starker Sonneneinstrahlung oder starkem Regen.

3.2.1 Gantry-System

Das im 3D-Betondruck am häufigsten eingesetzte Bewegungssystem ist das Gantry-System, das wegen der Nachvollziehbarkeit des kinematischen Konzepts als besonders benutzerfreundlich gilt und für ablegende und selektiv bindende 3D-Druck-Verfahren verwendet wird. Das Gantry-System ermöglicht eine gleichmäßige Druckleistung in der horizontalen Ebene und wird durch einen kubischen Druckbereich beschränkt. Wie beim klassischen 3D-Drucker für Zuhause besteht die Rahmenstruktur aus drei Portalen, die durch Schrittmotoren bewegt werden. Der Druckkopf wird von der Rahmenstruktur gestützt und bewegt sich in Richtung des kartesischen Koordinatensystems.⁶⁴

Im Vergleich zu klassischen 3D-Druckern, die für den stationären Druck in Produktionshallen verwendet werden, spielt bei Großraummanipulatoren für den Beton-3D-Druck auf der Baustelle die Mobilität des Tragsystems eine übergeordnete Rolle. Ein Konzept der Großraummanipulation für den Beton-3D-Druck auf der Baustelle ist der freistehende Portalroboter, kartesischer Roboter genannt. Ein Beispiel dafür ist der Cobod BOD2 des dänischen Unternehmens Cobod, dargestellt in Abbildung 3.6.⁶⁴ Seine Tragstruktur besteht aus einem horizontalen Rahmen, an dem der Druckkopf im zweidimensionalen Bereich bewegt wird. Dieser Rahmen wird wiederum an vier oder mehr Stützen vertikal bewegt.

⁶³Vgl. [21] CyBe

⁶⁴Vgl. [81] Symonenko



Abb. 3.6: Beton 3D-Drucker Cobod BOD2 des dänischen Unternehmens *Cobod* (Quelle: Symonenko [81])

Ein vergleichbares Konzept ist der Portalkran.⁶⁵ Der Unterschied liegt darin, dass dieser einachsiger fahrbar ist und sich im Vergleich zum Portalroboter für linienförmige Bauteile eignet. Für beide Konzepte wird eine entsprechend große Stellfläche benötigt, zudem sind Sonderkonstruktionen zur Befestigung der Stützen bzw. Schienen erforderlich. Die maximal druckbare Gebäudehöhe ist von der Höhe der Stützen begrenzt. Der Transport- und Montageaufwand ist im Vergleich zu anderen Großraummanipulatoren hoch. Allerdings sind Vorteile dieser beiden Konzepte die hohe Steifigkeit und die einfache Steuerung über herkömmliche Softwarelösungen.

3.2.2 Delta-System

Das Unternehmen Wasp stellt unter anderem 3D-Drucker für den stationären Einsatz nach dem Delta-Bewegungssystem her. In einem Versuch hat das Unternehmen das Bewegungssystem im Gebäudemaßstab umgesetzt.⁶⁶ In Abbildung 3.7 ist der 12 Meter hohe 3D-Drucker zu sehen, während dieser ein Gebäude aus einem Lehm-Stroh-Gemisch druckt.

Im Delta-System wird der Druckkopf nicht über bewegliche Portale, sondern an Fixierarmen befestigt. Die Fixierarme können über Schlitten nach oben und unten gefahren werden und positionieren so den Druckkopf. Für die Positionierung verwendet der Delta-Drucker ein ABC- anstelle des kartesischen XYZ-Koordinatensystems. Der wesentliche Vorteil des Delta-Bewegungssystems gegenüber dem Gantry-System ist die erhöhte Druckgeschwindigkeit. Der Druckkopf ist bei diesem System besonders leicht, da er keinen Motor montiert hat, sondern von den Armen

⁶⁵Vgl. [60] Näther et al., S.23

⁶⁶Vgl. [72] Rodgers



Abb. 3.7: Lehm 3D-Drucker Big Delta des italienischen Unternehmens *Wasp* (Quelle: Rodgers [72])

bewegt wird. Der Drucker erlaubt eine hohe Druckgeschwindigkeit und eignet sich aufgrund seines Bauraums besonders für schmale und hohe Bauteile wie beispielsweise Säulen.⁶⁷

3.2.3 Roboterarm-System

Der mehrachsige Roboterarm ist ein weit verbreitetes Bewegungssystem für den stationären Beton-3D-Druck. Forschungsinstitute und Universitäten testen Roboterarme mit unterschiedlichen Druckköpfen und mineralischen Druckmaterialien. Solche Bewegungssysteme ermöglichen einen schnellen und flexiblen Einsatz unterschiedlicher Druckköpfe für größere Projekte wie die additive Fertigung von mineralischen Bauteilen.

Aufgrund des eingeschränkten Bauraums gibt es unterschiedliche Kombinationen mehrerer Bewegungssysteme im Zusammenspiel mit Roboterarmen. Hendrik Lindemann beschreibt in seiner Doktorarbeit über generative Fertigung an der TU Braunschweig etwa eine Anlage für das Shotcrete 3D Printing (SC3DP). Das Bewegungssystem besteht in diesem Fall aus einem sechsachsigen Roboterarm, der an einem Gantry-System mit Dreiachs-Kinematik montiert wird.⁶⁸

Gleich mehrere Kombinationen unterschiedlicher Bewegungssysteme hat das niederländische Unternehmen CyBe im Sortiment, wovon eine in Abbildung 3.8 dargestellt ist. Der CyBe RT besteht aus einem Roboterarm, der sich zusätzlich entlang einer Schiene bewegen kann.⁶⁹ Dadurch eignet er sich für besonders lange Bauteile oder für eine Serienanfertigung ohne Unterbrechung. Für den CyBe RC wird derselbe Roboterarm verwendet, er wird allerdings nicht auf einer Schiene, sondern auf einer fahrbaren Raupenplattform montiert.⁶⁹ Diese kann sowohl über das Gelände einer Baustelle sowie in der Werkshalle bewegt werden. Während des Druckvorgangs wird der Drucker hydraulisch abgestützt.

⁶⁷Vgl. [94] WASP

⁶⁸Vgl. [84] TU Braunschweig

⁶⁹Vgl. [20] CyBe



Abb. 3.8: Beton 3D-Drucker CyBe RC auf einer fahrbaren Raupenplattform (Quelle: Wakefield [93])

3.2.4 Ausleger-System

In einer Forschungsarbeit der Technischen Universität Dresden wurde die mögliche Großraummanipulation mit Hilfe eines Betonpumpen-Verteilmasts untersucht.⁷⁰ Diese Methode kann dem Ausleger-System zugeordnet werden. Durch Vorgabe der Bewegungskordinaten legt der Druckkopf am Ende des Verteilmasts mit der geforderten Genauigkeit den Beton ab. Das Unternehmen Constructions 3D aus Frankreich hat eine Anlage nach dem Vorbild einer Autobetonpumpe entwickelt. Der Maxi Printer⁷¹ ist als schlüsselfertige Lösung für etwa 500.000 Euro erhältlich. Einen mobilen 3D-Drucker namens Karlos hat 2022 das deutsche Unternehmen Putzmeister vorgestellt, das u. a. Betonpumpen herstellt.⁷² Die Kombination aus einer mobilen Betonpumpe auf einem Lkw und Robotertechnik ermöglicht automatisiertes Erstellen von Wänden ohne konventionelle Verschalung.

Ein Ausleger-Bewegungssystem eröffnet in der Regel einen großzügigen Arbeitsbereich, weil der Druckkopf über einen weiten Raum bewegt werden kann.⁷³ Dies ist besonders wichtig, wenn große Bauprojekte umgesetzt werden sollen, etwa Wände, Säulen oder Gebäudekomponenten. Zudem kann der Platzbedarf des Druckers optimiert werden. Durch die Bewegung des Druckkopfs über den Arbeitsbereich hinweg kann der Drucker effizienter aufgestellt werden, was insbesondere bei begrenzten Raumverhältnissen von Vorteil ist.⁷³ Dank dieser Optimierungsmöglichkeit und des großzügigen Arbeitsbereichs können Beton-3D-Drucker mit einem Auslegersystem für große Bauprojekte genutzt werden. Diese Flexibilität ist entscheidend, wenn es darum geht, den Anforderungen verschiedener Bauprojekte gerecht werden zu können.

⁷⁰Vgl. [60] Näther et al., S.8

⁷¹Vgl. [19] Constructions 3D

⁷²Vgl. [67] Putzmeister

⁷³Vgl. [48] Krause, S.128

3.2.5 Polar-System

Beim Polar-Bewegungssystem dreht sich der Druckkopf um einen festen Punkt. Dieser zentrale Punkt wird als Polarpunkt bezeichnet. Nach diesem Polar-System hat der amerikanische Hersteller Apis Cor ein weiteres Manipulationsgerät für den Beton-3D-Druck auf der Baustelle entwickelt.⁷⁴ Abbildung 3.9 stellt den Beton-3D-Drucker von Apis Cor dar. Bei diesem bewegen sich drei Achsen um den Polarpunkt. Eine Achse ist für die vertikale Bewegung verantwortlich, eine zweite für die horizontale, während die dritte Achse für die Rotation um die vertikale Achse sorgt. Das Bewegungssystem ist durch einen zylindrischen Druckbereich begrenzt. Vergleichbar mit einem Kranausleger im klassischen Hochbau wird der Ausleger um die höhenverstellbare z-Achse gedreht. Der Druckkopf ist am ausfahrbaren Ausleger befestigt. Um die mögliche Druckfläche zu maximieren, liegt die z-Achse im Zentrum des Bauwerks. Das Maschinenkonzept schränkt hier die maximal mögliche Bauhöhe ein. Die kompakte Bauweise und das Gesamtgewicht von zwei Tonnen machen das System aber mobiler als einen Portalroboter. Zudem ist der Platzbedarf durch die Platzierung im Zentrum des Gebäudes gering. Das Manipulationsgerät richtet sich automatisch aus und kann auf unebenen Untergründen platziert werden.

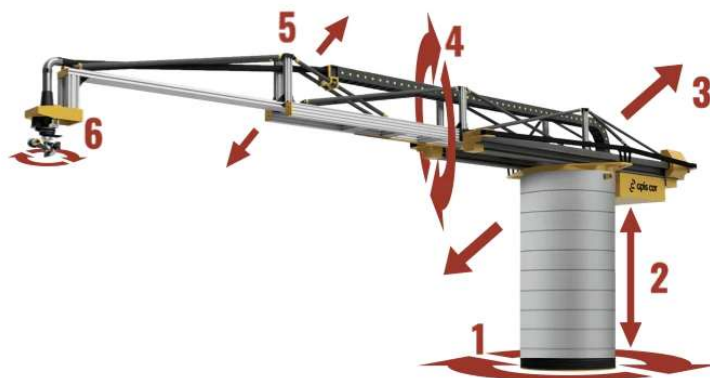


Abb. 3.9: Der Beton-3D-Drucker mit Roboterarm von *Apis Cor* mit sechs Achsen nach dem Konzept eines herkömmlichen Baukrans im Hochbau (Quelle: 3Dnatives [1])

Ein modulares Drucksystem für den parallelen Bau von Gebäuden im gleichmäßigen Raster hat das italienische Unternehmen Wasp entwickelt. Das Prinzip ist vergleichbar mit dem Manipulationsgerät von Apis Cor, der zusätzliche Rahmen aus Stahl und Aluminium führt jedoch zu einem wesentlich steiferen Konzept. Anders als beim Gerät von Apis Cor ist der Ausleger an der z-Stütze fahrbar und nicht die Achse selbst höhenverstellbar. Dadurch sind im Zusammenhang mit der Rasterstruktur die Stützhöhe und damit die maximal mögliche Gebäudehöhe erweiterbar.

3.3 Ablegende Verfahren

Als ablegende oder auf Extrusion basierende Druckverfahren werden additive Fertigungsverfahren bezeichnet, bei denen das Material schichtweise auf einer horizontalen Ebene abgelegt wird.⁷⁵ Beim Beton-3D-Druck gehören die ablegenden Verfahren zu den am häufigsten angewandten. Beton wird dabei in Schichten aufgetragen, die je nach verwendeter Technologie zwischen wenigen

⁷⁴Vgl. [5] Apis Cor

⁷⁵Vgl. [89] Vasilic et al., S.697-701

Millimetern bis zu mehreren Zentimetern mächtig sein können. Zu den bekanntesten ablegenden Verfahren im 3D-Druck von Beton zählen das Schichtbau- und das konturparallele Verfahren.⁷⁶

Bei der additiven Fertigung durch ablegende Verfahren wird das vorgemischte Material durch die Düse eines Druckkopfs an den vorgegebenen Koordinaten auf einer Bauplattform oder einem Fundament extrudiert. Nachdem der 3D-Drucker den Beton in der ersten Ebene an den gewünschten Stellen abgelegt hat, wird der Druckkopf durch das Bewegungssystem in Richtung der z-Achse um die vorgegebene Schichtdicke angehoben und der Prozess beginnt von vorn. Durch die fehlende Stützkonstruktion können 3D-Drucker nach dem ablegenden Verfahren vorwiegend vertikale bis geneigte Bauteile konstruieren.

Abbildung 3.10 zeigt die allgemeinen Verfahrensschritte für das ablegende Verfahren. Diese umfassen den digitalen Vorprozess (a-c) und den physischen Fertigungsprozess (1-4).

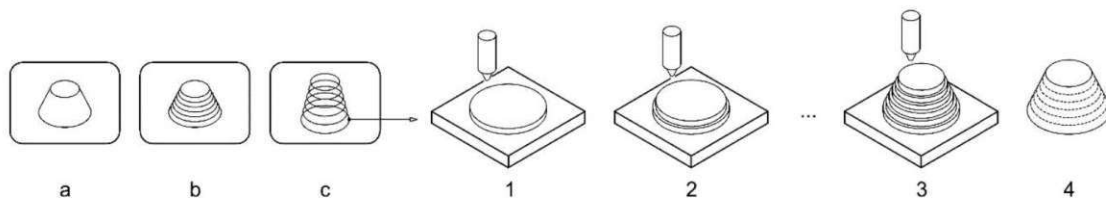


Abb. 3.10: Prozesskette ablegendes Verfahren (Quelle: Henke [36], S. 15)

Auf welche Art die abgelegten Materialschichten bei diesen Verfahren angeordnet werden, hängt von den gewünschten Eigenschaften des gedruckten Objekts ab. Zudem können mit ablegenden Verfahren komplexe Geometrien ohne Einschränkungen durch Formen und Werkzeuge gedruckt werden. Der Einsatz mehrerer Druckköpfe verkürzt die Fertigungszeit, da mehrere Schichten gleichzeitig abgelegt werden können. Ein weiterer Vorteil der ablegenden Verfahren ist die Tatsache, dass die abgelegten Materialschichten nur dort platziert werden, wo sie benötigt werden.⁷⁵

Ablegende Verfahren werden im Bauwesen stationär und vor Ort auf der Baustelle eingesetzt, um Bauteile zu drucken. Dabei ist die Oberflächenqualität von der Betonzusammensetzung sowie vom verwendeten Druckkopf abhängig. So verwenden bekannte Hersteller, etwa Cobod aus Dänemark, Mörtel anstelle von Beton, um die Oberflächenqualität zu erhöhen.⁷⁵

3.3.1 Contour Crafting (CC)

Das ablegende Verfahren Contour Crafting gilt als erstes Verfahren für die Extrusion von Beton im Baumaßstab und somit als Pionierprojekt im Bereich Beton-3D-Druck. Die Entwicklung begann in den 1990er-Jahren in Kalifornien durch den Erfinder Dr. Behrokh Khoshnevis, der als Pionier der Beton-3D-Druck-Technologie gilt.⁷⁷ Beim CC wird das Zementgemisch über die Düse des Druckkopfs extrudiert, wie in Abbildung 3.11 dargestellt. Als Tragwerk für den Druckkopf dient ein Portalkran mit einem Gantry-Bewegungssystem. Die Besonderheit von CC im Vergleich zu anderen ablegenden Verfahren sind die Kellen am Druckkopf, dargestellt in Abbildung 3.12 (links). Diese streifen am extrudierten Frischbeton entlang, was zu einer glatten Betonoberfläche anstelle der Stränge (Rauhen) führt, die bei anderen ablegenden Verfahren entstehen. Das CC-Verfahren zeichnet sich durch den hybriden Druckkopf aus, der zunächst

⁷⁶Vgl. [96] Weger, S. 10

⁷⁷Vgl. [16] CC Corp

gleichzeitig die beiden Randstreifen druckt. Im zweiten Durchgang wird die fachwerkähnliche Aussteifung im Bauteilinneren über die dritte Düse gedruckt. ⁷⁸

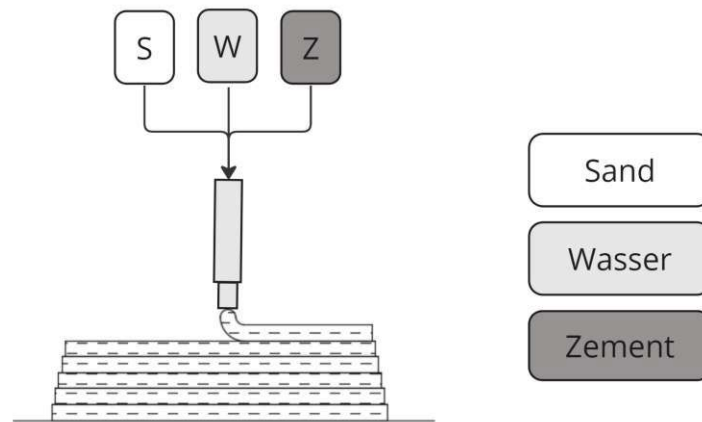


Abb. 3.11: Druckprozess - CC (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])

Wie der Name Contour Crafting bereits sagt, werden mit dem Verfahren keine Vollwände, sondern nur die Konturen der vertikalen Tragstruktur als verlorene Schalung gedruckt. Der innenliegende Hohlraum wird anschließend mit Frischbeton oder teilweise mit dem 3D-Drucker ausgefüllt. ⁸¹ Horizontale Bauteile wie Betondecken oder Unterzüge können mit dem Verfahren nicht realisiert werden. Abbildung 3.12 (rechts) zeigt die mögliche Montage der Fertigteile über den Portalkran des 3D-Druckers. ⁸¹



Abb. 3.12: Hybrid CC-Druckkopf extrudiert parallel drei Düsen (links), CC-Vision zukünftiger Bauprozesse (rechts) (Quelle: CC Corp [16])

2017 hat der Erfinder der CC-Technologie, Dr. Behrokh Khoshnevis, mit der österreichischen Umdasch Group das Unternehmen Contour Crafting Corporation aus der Taufe gehoben, um die patentierte Technologie zu kommerzialisieren. ⁷⁹ Contour Crafting ist ein geschützter Begriff. Über Projekte und Entwicklungen des Unternehmens wurde in den letzten Jahren wenig veröffentlicht.

⁷⁸Vgl. [46] Khoshnevis,

⁷⁹Vgl. [16] CC Corp

3.3.2 3D Concrete Printing (3DCP)

Das Verfahren 3D Concrete Printing (3DCP) wird seit 2005 an der University of Loughborough entwickelt. Dabei wird Zementmörtel aus einer runden Düse ohne seitlich angeordnete Kellen extrudiert. Um eine möglichst ebene Betonoberfläche herzustellen, ist der Durchmesser der einzelnen Stränge deutlich geringer als beim CC, was den Herstellungsprozess verlangsamt.⁸⁰ Dafür ist aufgrund des Fehlens der Kellen am Druckkopf der Druck von Kontur und Füllung mit demselben Druckkopf möglich. Das 3DCP-Verfahren, welches in Abbildung 3.13 dargestellt wird, druckt nur mit einer Düse am Druckkopf.

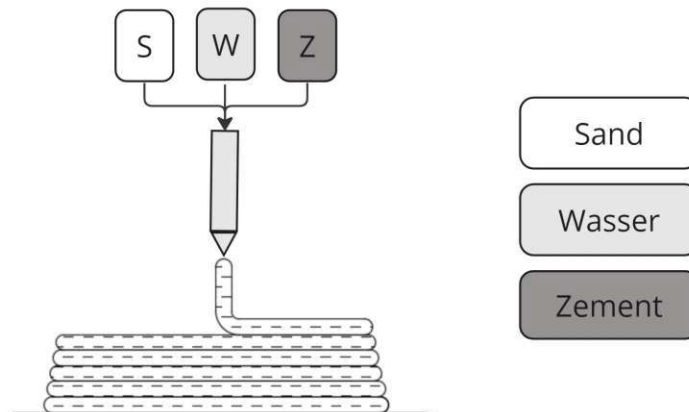


Abb. 3.13: Druckprozess - 3DCP (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])

Das Grundprinzip des 3DCP besteht darin, dass ein spezieller 3D-Drucker, ausgestattet mit einer Betondruckdüse, das Zementgemisch Schicht für Schicht exakt platziert. Die Druckdüse bewegt sich gemäß den digitalen Bauplänen, wodurch präzise Formen und Strukturen entstehen. Die eingesetzten Betonmischungen weisen einen hohen Zementgehalt auf, um den Anforderungen des Druckprozesses gerecht zu werden.⁸¹ Der Großteil der marktführenden Unternehmen im Bereich des Beton-3D-Drucks entwickeln ihre Technologie auf Basis des 3DCP-Verfahrens.

3.4 Shotcrete 3D Printing (SC3DP)

Bei der Herstellung von Betonbauteilen nach dem SC3DP-Verfahren wird Betonmörtel in Lagen über einen Roboterarm auf die Bewehrung oder eine Plattform aufgespritzt, wie in Abbildung 3.14 dargestellt. Nachdem der Beton unter hohem Druck durch eine Düse aufgetragen wird, ist das Shotcrete-Verfahren mit der Verwendung von Spritzbeton vergleichbar. Durch den Druck beim Auftragen des neuen Spritzbetons werden die Lagen miteinander vermischt, es entsteht ein monolithisches Betonbauteil.

Das SC3DP-Verfahren, zu welchem die Grundlagenforschung an der TU Braunschweig betrieben wird, wird in der Literatur oft als „spritzendes Verfahren oder Spritzbetonverfahren“ bezeichnet und damit von den ablegenden Verfahren abgesetzt.⁸¹ Unabhängig davon, unter welchem Label das Verfahren läuft, ist SC3DP doch in jedem Fall eine Form des 3D-Betondrucks, bei der Beton in Schichten auf eine Oberfläche gespritzt wird, um komplexe Formen und Strukturen zu erzeugen.

Die SC3DP-Technologie nutzt die Vorteile der Spritzbetonbauweise, insbesondere die Möglichkeit des Betonierens ohne Schalung und ohne nachträgliches Verdichten, sowie die hohe

⁸⁰Vgl. [52] Lim et al., S. 265

⁸¹Vgl. [89] Vasilic et al., S. 698-701

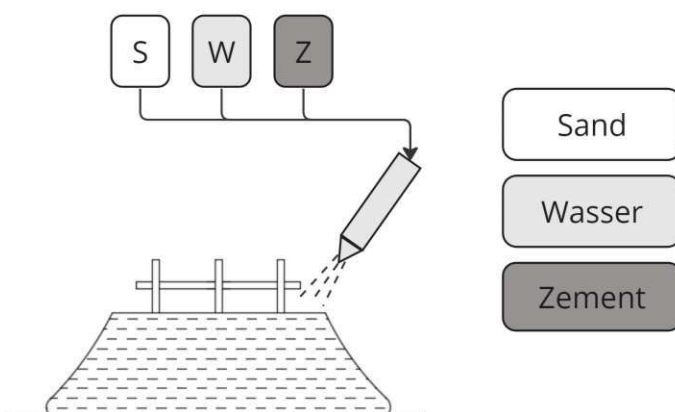


Abb. 3.14: Druckprozess SC3DP (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])

mechanische Verzahnung mit dem Untergrund. Im Gegensatz zu herkömmlichen Betonextrusionsverfahren wird das Material beim SC3DP durch Druckluft beschleunigt, was zu einer höheren Schüttdichte und verbesserten mechanischen Eigenschaften der gedruckten Bauteile führt.⁸²

Ein wesentlicher Bestandteil der SC3DP-Technologie ist die Verwendung von Nassspritzbeton, der vorab gemischt und im Dichtstromverfahren zur Düse transportiert wird. Drucksensoren überwachen den Förderprozess, um eine gleichmäßige Materialzufuhr zu gewährleisten. An der Düse wird das Material durch Druckluft beschleunigt und mit Erstarrungsbeschleunigern vermischt, um die Frühstandsfestigkeit des Betons zu gewährleisten.⁸²

Die Automatisierung des SC3DP-Prozesses erfolgt durch eine digital gesteuerte Robotereinheit, die den Schichtenauftrag übernimmt. Dies ermöglicht eine nahtlose Integration in digitale Entwurfs- und Planungsprozesse und eröffnet neue Möglichkeiten für das Struktur- und Bauteildesign. Die TU Braunschweig verwendet eine Kombination aus einem sechssachsigen Schwerlastroboter und einer CNC-gesteuerten 5-Achs-Portalfräse, die zusammenarbeiten können, um additive und subtraktive Fertigungsverfahren durchzuführen.⁸³

Ein weiterer Vorteil der SC3DP-Technologie liegt in der Entwicklung und Integration prozessabgestimmter High-Tech-Werkstoffe, wie ultrahochfester Beton (UHPC) und Faserbeton, die an spezifische Anforderungen angepasst werden können. Die SC3DP-Technologie erlaubt die Herstellung von Bauteilen mit komplexen Geometrien, einschließlich Überhängen und zweidimensionalen Krümmungen, durch die Steuerung der Robotergeschwindigkeit und des Düsenabstands.⁸⁴

3.5 Selektiv bindende Verfahren

Bei additiven Verfahren auf Basis der selektiven Bindung (im Deutschen als „Partikelbettverfahren“ bezeichnet) werden zunächst die trockenen Materialien als dünne Schicht auf eine Oberfläche aufgetragen. Abbildung 3.15 zeigt die Verfahrensschritte des additiven Schichtbauverfahrens für selektiv bindende Verfahren. Der Prozess beginnt mit dem digitalen Vorprozess, der in drei Schritte unterteilt ist: das Erstellen eines digitalen Modells des Festkörpers (a), die virtuelle Aufteilung des Objektes in gleichmäßige Schichten (b) und die Ableitung ebener Geometrien aus den Schichtvolumina sowie die Übergabe der Schichtinformationen an die Maschine (c).

⁸²Vgl. [89] Vasilic et al., S. 701

⁸³Vgl. [48] Krause, S. 42

⁸⁴Vgl. [84] TU Braunschweig

Im physischen Fertigungsprozess wird zunächst die erste Schicht durch das Ausbringen des formbaren Ausgangsmaterials aufgetragen. Abhängig vom spezifischen Verfahren wird das aufgetragene Material danach mit unterschiedlichen Methoden an den gewünschten Stellen partiell verfestigt (1).⁸⁵ Für mineralische Bauteile eignet sich die Verfestigung durch ein Bindemittel, einen Aktivator oder durch Lasersintern. Nach der selektiven Bindung der aufgetragenen Materialien wiederholt sich der Prozess: die nächste Schicht wird aufgetragen und partiell gebunden. Der Prozess wird abgeschlossen, indem das nicht gebundene Ausgangsmaterial entfernt und der fertige Festkörper gegebenenfalls nachbearbeitet wird (4).⁸⁵

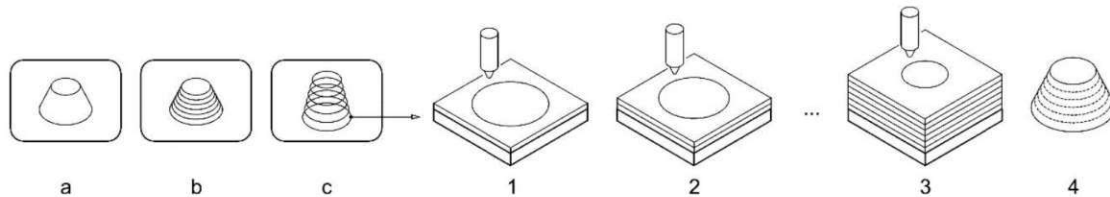


Abb. 3.15: Prozesskette selektiv bindendes Verfahren (Quelle: Henke [36], S. 15)

Die Bauteilgenauigkeit ist bei selektiv bindenden Verfahren von der aufgetragenen Schichtdicke abhängig. Gleich wie bei den ablegenden Verfahren gilt hier, je dünner die Schicht, desto höher die Übereinstimmung mit dem digitalen Modell. Allerdings sinkt mit der abnehmenden Einzelschichtdicke die Druckgeschwindigkeit. Bei selektiv bindenden Verfahren wird vorwiegend trockener Sand gebunden, weshalb das zementgebundene Bauteil nicht aus Beton, sondern Mörtel besteht. Daraus resultieren verminderte Materialeigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Betonbauteilen.⁸⁵ Es sind keine Versuche bekannt, bei denen Bauteile nach dem selektiv bindenden Verfahren mit Größtkorn ≥ 8 mm gedruckt wurden. Es sind keine Beispiele bekannt, bei dem das Verfahren verwendet wurde, um Bauteile an ihrem endgültigen Standort zu drucken, wie dies bei ablegenden Verfahren der Fall ist.⁸⁶ Bis heute einzigartig ist der Druck eines 2,40 x 4 Meter großen und 3,5 Meter hohen Hauses, das komplett in einem Stück gedruckt wurde. Der Monolith wurde vom italienischen Ingenieur Enrico Dini, dem Erfinder des 3D-Druckers von D-Shape, gedruckt und auf der Mailänder Triennale ausgestellt. Für den Druck wurden 35 Kubikmeter trockenes Material benötigt, wobei 90 % davon nach Aushärtung wieder dem Druckprozess zugeführt werden konnten.⁸⁷

Verfahrenstechnisch betrachtet bietet das selektiv bindende gegenüber ablegenden Verfahren einen wesentlichen Vorteil: die geometrischen Gestaltungsfreiheit der Bauteile. Durch die stützende Funktion des nicht gebundenen Materials sind der Auswahl der Geometrie keine Grenzen gesetzt. Drucken ablegende Verfahren nach dem heutigen Stand der Technik vorwiegend vertikale Bauteile, spielen die geometrischen Vorgaben bei der selektiven Fertigung eine untergeordnete Rolle.⁸⁸ Die Verfahrenstechnologie ermöglicht die Herstellung multidimensionaler, filigraner und ineinander verwobener Bauteile.⁸⁸

Bisher realisierte Projekte haben gezeigt, dass mit selektiv bindenden Verfahren nach dem aktuellen Stand der Technik keine Gebäude vor Ort, sondern Bauteile stationär hergestellt werden.⁸⁸ Diese kommen als Fertigteil, verlorene oder wiederverwendbare Schalung zum Einsatz.

⁸⁵Vgl. [75] Scheerer und Curbach, S.301-302

⁸⁶Vgl. [30] Frank, S. 301

⁸⁷Vgl. [73] Rota

⁸⁸Vgl. [30] Frank

3.5.1 Selective Cement Activation (SCA)

Selective Cement Activation ist ein selektiv bindendes, additives Verfahren, bei dem das im Partikelbett aufgetragene Material aus einer Mischung aus einem feinen Zuschlagstoff (z. B. Sand < 1 mm) und Zement als Binder besteht. Über einen Druckkopf, der mit jenem eines Tintenstrahldruckers vergleichbar ist, wird Wasser an den gewünschten Stellen aufgesprüht, wie in Abbildung 3.16 dargestellt. Dadurch reagiert Zement, bildet Zementleim und verbindet die Sandpartikel zu einer stabilen Struktur.⁸⁹ Für die SCA eignen sich verschiedene Bindersysteme, darunter hydraulische und nicht-hydraulische. Hydraulische Systeme, etwa Portlandzement, reagieren mit Wasser und härten aus. Es ist jedoch wichtig, das Partikelbett vor der Aktivierung trocken zu halten, um ungewollte Hydratisierung durch Luftfeuchtigkeit zu verhindern. Nicht-hydraulische Systeme reagieren mit anderen Substanzen und erfordern keine Trocknung vor der Aktivierung.⁸⁹

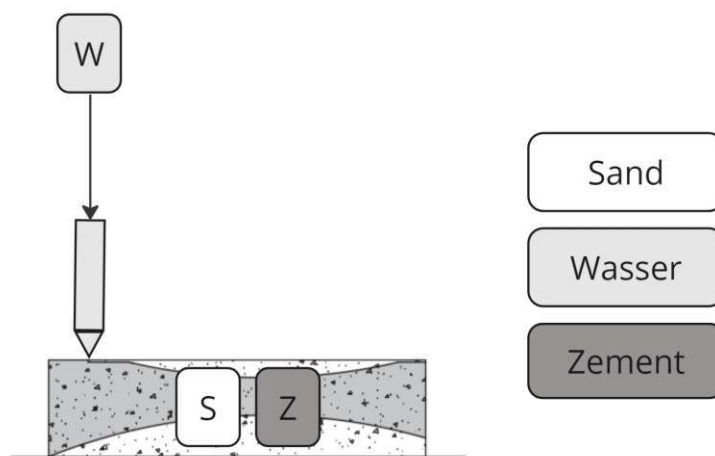


Abb. 3.16: Druckprozess - SCA-Verfahren (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])

Als innovatives additives Verfahren hat SCA eine ganze Reihe von Vorteilen wie die Fertigungsauflösung bei großformatigen Bauteilen.⁸⁹ So ermöglicht das Verfahren die Fertigung komplexer Strukturen mit Hohlräumen und Überhängen, die mit herkömmlichen Methoden nur schwer umsetzbar sind. Dazu kommt ein geringer Materialverbrauch, der sich durch die gezielte Aktivierung mit Wasser ergibt. SCA kann automatisiert werden, was Produktivität und Effizienz steigert.⁸⁹ Diesen Vorteilen stehen allerdings Herausforderungen gegenüber, darunter die Optimierung der Festigkeit des gedruckten Betons, die Reduzierung der Druckkosten und die Vereinfachung der Technologie.⁸⁹ Enrico Dini, Gründer von D-Shape, setzt erfolgreich auf das SCA-Verfahren, wobei nicht-hydraulischer Sorel-Zement als Bindemittel verwendet wird. Projekte wie Möbel, der Radiolaria-Pavillon und das Ferreri-Haus zeugen vom Potenzial dieser Technologie im großformatigen Bauwesen.⁹⁰

3.5.2 Selective Paste Intrusion (SPI)

Selective Paste Intrusion (SPI) ist ein innovatives Verfahren im Bereich des Beton-3D-Drucks, das auf der selektiven Extrusion von speziell formulierten Pasten basiert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Schichtbauweisen setzt SPI auf die präzise Dosierung und Ablagerung von pastösem

⁸⁹Vgl. [55] Lowke et al. S. 51-64

⁹⁰Vgl. [22] D-Shape

Material, wodurch komplexe und maßgeschneiderte Strukturen erstellt werden können.⁹¹ Als Bindemittel verwendet SPI dabei Zementleim, der speziell für den 3D-Druckprozess optimiert ist. Der Zementleim besteht aus einer Mischung von Zement, Wasser und Zusatzmitteln, wobei die genaue Zusammensetzung von der Druckanlage abhängt und auf den jeweiligen Druckkopf abgestimmt werden muss, um das optimale Eindringverhalten zu gewährleisten.⁹¹ Der Druckkopf ist im SPI-Verfahren mit einer Düse ausgestattet, die an den selektierten Stellen eine fließfähige Zementsuspension extrudiert, wie in Abbildung 3.17 dargestellt. Dies geschieht schichtweise, wobei die Dicke der Schichten je nach den konstruktiven Anforderungen variiert werden kann. Dabei muss allerdings sichergestellt werden, dass das Bindemittel die aufgetragene Gesteinsschicht gleichmäßig durchdringt, ohne zur nächsten Schicht durchzufließen. Wird die Schicht unzureichend durchdrungen, kommt es zu einem mangelhaften Verbund zwischen den aufgetragenen Mörtelschichten.⁹²

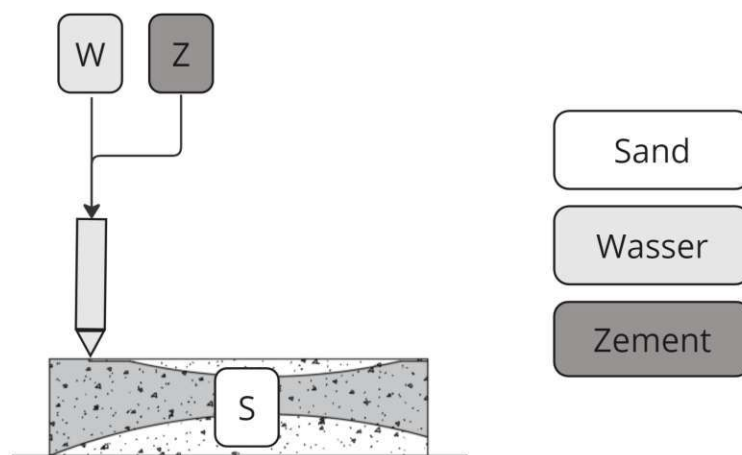


Abb. 3.17: Druckprozess - SPI-Verfahren (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])

Die präzise Dosierung und Ablagerung der Paste ermöglichen eine exakte Kontrolle über Form und Struktur des gedruckten Objekts.⁹² Zudem ist SPI durch die selektive Extrusion äußerst flexibel und präzise. Es ermöglicht die Erstellung komplexer Geometrien und feiner Details ohne die Einschränkungen traditioneller Bauprozesse, was diese Methode besonders geeignet für architektonisch anspruchsvolle Designs macht. Die guten Eigenschaften hinsichtlich Betonfestigkeit sowie Dauerhaftigkeit ermöglichen die Erstellung von komplexen und formoptimierten Strukturen für den Innen- und Außenbereich.⁹³ Deshalb wird Selective Paste Intrusion von der Progress 3D Innovation angewandt, etwa beim Bau von Wänden, Säulen, Fassaden und anderen architektonischen Elementen. Durch die Flexibilität des Verfahrens können maßgeschneiderte Bauteile für spezifische Bedürfnisse und gestalterische Anforderungen realisiert werden.

3.5.3 Binder Jetting

Das selektiv bindende additive Verfahren Binder Jetting bezeichnet ein Verfahren, bei dem das im Partikelbett aufgetragene Material aus einer Mischung aus einem Zuschlagstoff und einem Härter besteht. Abbildung 3.18 stellt das Konzept des Binder Jettings dar. Über den Druckkopf wird ein polymerbasiertes Harz auf den Sand im Bauraum aufgetragen.⁹¹ Das Bindemittel verbindet die Partikel miteinander und formt eine stabile Struktur. Mit diesem Verfahren werden nicht

⁹¹Vgl. [96] Weger, S. 25-28

⁹²Vgl. [96] Weger, S.6

⁹³Vgl. [96] Weger, S. 111

direkt zementgebundene Bauteile gedruckt, in der Praxis wird es allerdings verwendet, um komplexe Spezialschalungen für den Betonbau herzustellen.⁹⁴ Als Spezialschalung wird eine Form bezeichnet, die für ein spezifisches Betonbauteil hergestellt und vor Ort mit Frischbeton ausbetoniert wird.

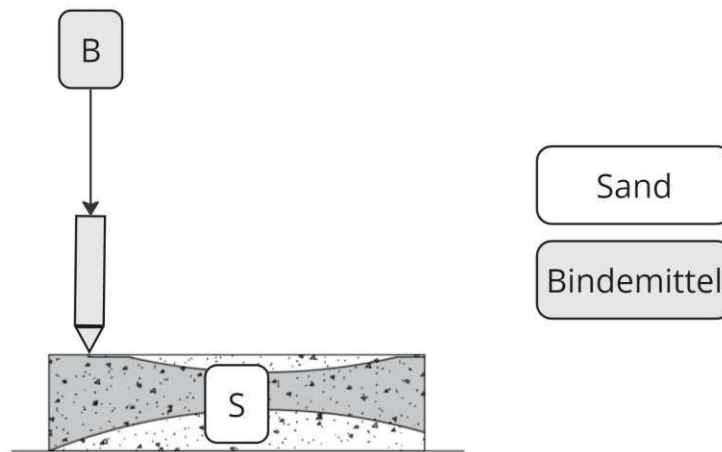


Abb. 3.18: Druckprozess - Binder Jetting-Verfahren (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])

Beim Binder Jetting appliziert der Druckkopf das flüssige Bindemittel schichtweise auf das pulverförmige Substrat, wobei die Schichthöhe zwischen 0,2 und 2 mm variiert. Nach dem Druck sind allerdings Nachbearbeitungsschritte erforderlich. So muss das nicht verfestigte Pulver mechanisch entfernt werden. Zusätzliche Härteprozesse in kontrollierten Umgebungen sind mitunter notwendig. Oberflächenbeschichtungen können aufgetragen werden, um die Struktur zu festigen und die Oberflächeneigenschaften zu verbessern.

Trotz seiner vielversprechenden Anwendungen steht der Binder-Jet-3D-Druck von Beton vor großen Herausforderungen, etwa der Optimierung der Materialien und der Druckgeschwindigkeit. Dennoch deutet die wachsende Zahl von Projekten, die mit dieser Technik verwirklicht wurden und werden, darauf hin, dass dieser 3D-Druckansatz einen bedeutenden Beitrag zur Evolution des Bauwesens leisten könnte.⁹⁵ Dafür sprechen die breiten Einsatzmöglichkeiten des Binder Jettings. So setzt das Münchner Unternehmen Voxeljet bereits seit einigen Jahren auf additiv gefertigte Betonschalungen.⁹⁵ Die mehrfach gekrümmte Spezialschalung verwendet der österreichische Schalungshersteller Doka, und zwar in Kombination mit einer konventionellen Wandschalung für die Herstellung einer Treppenunterseite. Abbildung 3.19 (links) zeigt die fertige Sichtbetonoberfläche nach dem Ausschalen.

In einem zweiten Referenzprojekt fertigte Voxeljet die verlorene Schalung für eine statisch optimierte Betonplatte, die in Abbildung 3.19 (rechts) dargestellt wird.⁹⁵ Die 136 Schalungselemente wurden durch Binder Jetting erstellt. Dabei wurde Sand mit einer durchschnittlichen Korngröße von 140 µm mit Furanharz durch Polymerisation selektiv gebunden. Die jeweils aufgetragene Schichtdicke lag bei 150-300 µm. Das DFAB House sollte zeigen, wie durch 3D-Druck Material eingespart werden kann, wobei das Ziel der Beton-Einsparung von 60 % erreicht wurde. Dafür wurde die Decke nur so stark wie statisch nötig realisiert. Laut den Projektträgern soll die innovative Technologie der Bauindustrie helfen, künftig materialsparender und kompakter zu bauen, indem bereits Funktionen wie Lampenfassungen, Bohrungen und Öffnungen für Sprinkleranlagen integriert werden. Dabei wurde der VX4000 von Voxeljet, der weltweit größte industrielle

⁹⁴Vgl. [96] Weger, S. 25

⁹⁵Vgl. [91] Voxeljet



Abb. 3.19: Mehrfach gekrümmte Treppenunterseite aus Kombination von 3D-gedruckter und konventioneller Schalung hergestellt (links). Verlorene Schalung für eine statisch optimierte Betonplatte (rechts) (Quelle: Voxeljet [92])

3D-Drucker für Sandformen, verwendet, um Schalungselemente von beeindruckender Größe zu drucken. Die 3D-gedruckten Elemente wurden vor Ort mit Polyesterharz infiltriert, beschichtet und zu Schalungen für die sieben Meter langen Deckenelemente zusammengefügt.⁹⁶

3.5.4 Exkurs: Selektives Lasersintern (SLS)

Das Selektive Lasersintern (SLS) ist zu den selektiv bindenden additiven Verfahren zu zählen.⁹⁷ SLS bezeichnet ein Verfahren, bei dem das im Partikelbett aufgetragene Material aus 20 bis 50 μm großen Partikeln besteht. Anstelle eines Binders oder Aktivators werden die Partikel beim SLS durch einen Laserstrahl über einen Umlenkspiegel aufgeschmolzen. Nach einer Abkühlpause wird erneut eine trockene Materialschicht aufgetragen und an den gewünschten Stellen über den Laserstrahl gesintert. Für das Verfahren eignen sich vor allem Kunststoffmaterialien wie Polyamide oder Glas-, metallische und Kohlenstoffpartikel. Der Detailgrad der Bauteile ist bei diesem Verfahren von der Korngröße des aufgetragenen Materials abhängig.⁹⁷ Allerdings erfordert die unzureichende Oberflächenqualität Nachbehandlungen wie Schleifen, Strahlen oder Lackieren. Die Materialeigenschaften von mittels SLS produzierten Bauteilen sind mit jenen aus konventionellen Verfahren vergleichbar. Eingesetzt wird das Verfahren derzeit beispielsweise in der Zahnmedizin oder im Maschinenbau für die Herstellung von Werkzeugen oder sogar Serienprodukten. In der Luft- und Raumfahrt ist das SLS-Verfahren das am häufigsten genutzte additive Verfahren.⁹⁷

Der deutsche Designer Markus Kayser hat in einem Versuchsprojekt, einen 3D-Drucker nach dem SLS-Verfahren entwickelt.⁹⁸ Abbildung 3.20 (rechts) zeigt den Versuchsaufbau in der Sahara in der Nähe des ägyptischen Siwa. Der Laserstrahl wird darin nicht mit Hilfe einer externen Energiezufuhr erzeugt, sondern durch eine Fresnel-Linse, die die Sonnenstrahlen zu einem Laserstrahl bündelt. So erreicht der Laserstrahl Temperaturen zwischen 1400 und 1600 Grad Celsius. Als Ausgangsmaterial wurde kieselsäurehaltiger Wüstensand in die Bauplattform gefüllt. Das linke Bild in Abbildung 3.20 zeigt die aufgetragene Quarzsandschicht, die durch den Laserstrahl selektiv zu Glas gesintert wird. An diesen Prozess anschließend, wird eine neue

⁹⁶Vgl. [24] Dfab House

⁹⁷Vgl. [2] Adamek und Piwek, S. 6-8

⁹⁸Vgl. [45] Kayser

Schicht Wüstensand aufgetragen und der Sinterprozess wiederholt. Im Rahmen der Versuche wurden durch SLS aus Wüstensand u. a. eine Schale sowie eine bionische Struktur hergestellt. Der Exkurs zum Thema SLS zeigt, wie additive Fertigungsverfahren dazu beitragen können, mineralische Bauteile ohne Zugabe von Bindemitteln wie Zement herzustellen.⁹⁸

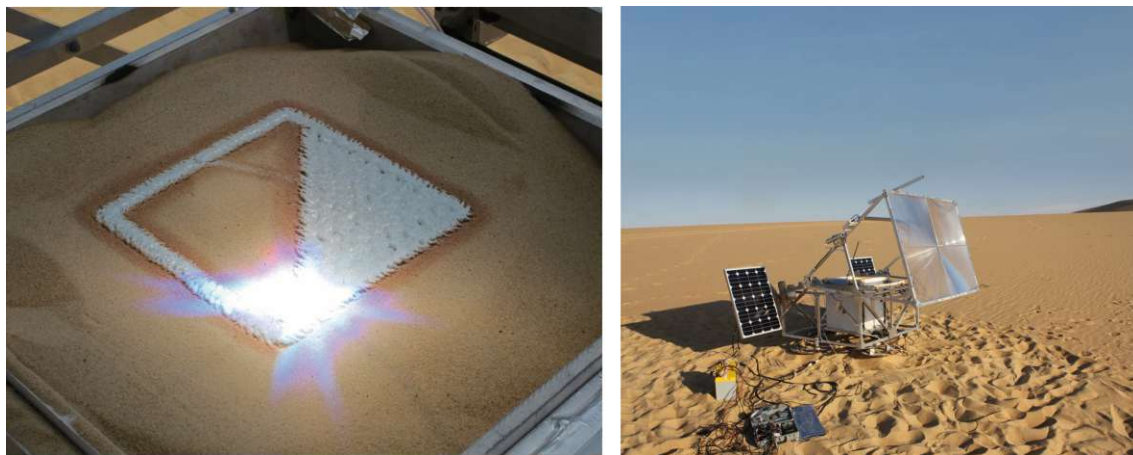


Abb. 3.20: Aufschmelzen von Quarzsand zu Glas durch SLS (links). Versuchsaufbau von *Marus Kayser* in der Sahara (rechts) (Quelle: Kayser [45])

3.6 Marktübersicht nach Fertigungsverfahren und Bewegungssystemen

Der Beton-3D-Druck ist eine innovative Technologie, die sich noch in den Anfängen befindet und derzeit nur von wenigen Bauunternehmen genutzt wird. Das chinesische Unternehmen Win Sun beispielsweise verwendet das 3DCP-Verfahren für die Herstellung von Fertigteilen. Dabei werden verschiedene Elemente in einer Fabrik gedruckt und später auf der Baustelle zusammengesetzt. Ein weiteres Unternehmen, CyBe aus den Niederlanden, kooperiert eng mit der TU Eindhoven und plant die Markteinführung eines vorgemischten 3D-druckbaren Trockenmörtels sowie eines Roboters, der als Drucker fungieren kann. In den USA arbeitet Total-Kustom an der Entwicklung von 3D-Mörtel-Druckern für Fertigteilhersteller, während die schweizerische Imprimere AG ähnliche Geräte entwickelt.⁹⁹ Ein anderer innovativer Ansatz ist die D-Shape-Technologie von Enrico Dini. Diese Technologie nutzt die selektive Bindung, um Konstruktionselemente mittels Sandverfestigung schichtweise zu fertigen. Jede Schicht wird in einem losen Sandbett durch Zugabe eines Bindemittels zusammengepresst und erhärtet, bevor das Bauteil aus dem Sandbett entfernt wird.

Ein bemerkenswerter Meilenstein wurde im Mai 2016 in Dubai gesetzt, als dort das erste vollständig 3D-gedruckte Bürogebäude der Welt eröffnet wurde. Diese Initiative ist Teil der „3D-Printing Strategy“ der Vereinigten Arabischen Emirate, die darauf abzielt, bis 2030 ein Viertel aller Gebäude mittels 3D-Druck zu fertigen. Die Hauptgründe für diese Investitionen liegen in der signifikanten Reduzierung der Produktionszeit und Arbeitskosten. Die Tragstruktur des Bürogebäudes wurde in nur 17 Tagen gedruckt und in zwei Tagen vor Ort zusammengesetzt.¹⁰⁰

Das Unternehmen Cobod aus Dänemark hat mit dem größten 3D-gedruckten Gebäude für Aufmerksamkeit gesorgt. Dabei wurde ein Rechenzentrum in Heidelberg realisiert, das 600 m²

⁹⁹Vgl. [83] Total Kustom

¹⁰⁰Vgl. [10] Bexten

groß und 9 m hoch ist.¹⁰¹ An dem Unternehmen beteiligt sind unter anderem der deutsche Schalungshersteller Peri oder der Schweizer Betonentwickler Holcim Technology, welche die Entwicklung mit ihrem Know-How unterstützen.¹⁰²

Schon ein Überblick zeigt, dass es sich um einen Markt handelt, der rasanten Veränderungen unterworfen ist. Daher kann eine Marktübersicht nur eine Momentaufnahme sein. Bei der Recherche für die vorliegende Arbeit wurde zwischen Unternehmen unterschieden, die Beton-3D-Drucker entwickeln, und solchen, die einen erworbenen Beton-3D-Drucker verwenden. Tabelle 3.1 bietet eine Übersicht über die führenden kommerziellen Hersteller von Beton-3D-Druckern und führt für die derzeit operierenden Unternehmen im Bereich der additiven Fertigung mit mineralischem Druckmaterial Herkunftsland, Bewegungssystem und Fertigungsverfahren an.

Tab. 3.1: Marktübersicht nach Fertigungsverfahren und Bewegungssystemen

Unternehmen	Land	Bewegungssystem	Fertigungsverfahren
WASP S.r.l	IT	Delta, Polar	Ablegend
Constructions 3D	FR	Faltarm-System	Ablegend
Sika AG	CH	Gantry	Ablegend
Yingchuang Building Technique	CHN	Gantry	Ablegend
Cobod International A/S	DK	Gantry	Ablegend
Monolith UK (D-shape)	UK	Gantry	Selektiv Bindend
Betabram	SL	Gantry	Ablegend
Progress 3D Innovation	IT	Gantry	Selektiv Bindend
Mighty Buildings	USA	Gantry	Ablegend
SQ4D	USA	Gantry	Ablegend
ICON Technology	USA	Gantry	Ablegend
Black Buffalo 3D	USA	Gantry	Ablegend
MudBots	USA	Gantry	Ablegend
Apis Cor	USA	Polar	Ablegend
Baumit	AT	Knickarmroboter	Ablegend
XtreeE, the large-scale 3D	FR	Knickarmroboter	Ablegend
Imprimere AG	CH	Knickarmroboter, Gantry	Ablegend
Cybe Construction	NL	Knickarmroboter, Gantry	Ablegend
Hyperion Robotics	USA	Knickarmroboter	Ablegend

Die auf Grundlage einer Marktrecherche erstellte Tabelle 3.1 zeigt, dass die Mehrheit der Unternehmen aus Europa und den USA stammen. Zugleich zeigt sich, dass das am weitesten verbreitete Bewegungssystem für mobile Druckanlagen das Gantry-System ist und für die stationäre Fertigung vorwiegend auf den Knickarmroboter gesetzt wird. Bei den Fertigungsverfahren ziehen die meisten Unternehmen ablegende Verfahren vor. Eine Ausnahme bildet dabei Progress 3D Innovation aus Südtirol, das sich neben dem Pionier D-Shape auf das selektiv bindende Verfahren im kommerziellen Maßstab spezialisiert hat.¹⁰³

Wie bereits angeführt, ist das führende Bewegungssystem bei Beton-3D-Druckern das Gantry-System. Bei diesem System bewegt sich ein Gantry über die Bauplattform, an dessen einem Ende der Druckkopf oder die Düse befestigt ist. Gantry-Systeme eignen sich besonders für Anwendungen mit hohen Lasten.¹⁰⁴ Außerdem bieten sie eine hohe Präzision und Wiederholbarkeit. Vor

¹⁰¹Vgl. [80] Symonenko

¹⁰²Vgl. [18] Cobod

¹⁰³Vgl. [65] Progress 3DI

¹⁰⁴Vgl. [37] HepcoMotion

allem für den Beton-3D-Druck mit hohem Bauvolumen direkt auf der Baustelle hat sich dieses System etabliert. Einen anderen Weg geht das Unternehmen Construction 3D aus Frankreich.¹⁰⁵ Dessen 3D-Drucker MaxiPrinter ähnelt dem Ausleger einer Betonpumpe für die Baustelle. Dieses Bewegungssystem hat sich bereits auf der Baustelle etabliert und ist schneller einsatzbereit als beispielsweise ein Gantry-Portal.

Für die stationäre Fertigung setzen andere Hersteller dagegen auf sechsarmige Knickarmroboter. Für die Bewegungssysteme selbst werden hierfür Industrie-Roboterarme verschiedener Hersteller verwendet.¹⁰⁶ Ein Vorteil gegenüber anderen Bewegungssystemen ist die hohe Bewegungsfreiheit sowie der geringe Platzbedarf, ein Nachteil der eingeschränkte Bauraum, wobei die Bauteilgröße ohnehin durch das maximal mögliche Transportvolumen eingeschränkt ist. Das Unternehmen CyBe aus den Niederlanden stellt Beton-3D-Drucker nach dem Gantry- und dem Knickarmrobotersystem her. Um den Bauraum des Knickarmroboters zu vergrößern, wird dieser auf eine fahrbare Plattform montiert.¹⁰⁷

Das italienische Unternehmen WASP unterscheidet sich mit seinem Delta-Bewegungssystem von den anderen Marktteilnehmern und hat mit dem 3D-Drucker Crane Wasp gezeigt, wie ein Drucker mit Polar-Koordinatensystem eingesetzt werden kann. Als Druckmaterial wurde in diesem Fall allerdings kein zementbasiertes Material verwendet, sondern Erde aus dem direkten Umfeld.¹⁰⁸ Die Projekte, die mit 3D-Druckern mit Polar-Koordinatensystem verwirklicht werden, zu denen der Drucker Frank des amerikanischen Unternehmens Apis Cor gehört, haben runde Formen oder zumindest rund geformte Bauabschnitte. Damit werden bereits die Vorteile dieses Systems gegenüber Druckern mit kartesischen Koordinatensystemen aufgezeigt.¹⁰⁹

¹⁰⁵ Vgl. [19] Constructions 3D

¹⁰⁶ Vgl. [48] Krause, S. 65

¹⁰⁷ Vgl. [21] CyBe

¹⁰⁸ Vgl. [17] Chiusoli

¹⁰⁹ Vgl. [5] Apis Cor

Kapitel 4

Vegleichsanalyse des Beton-3D-Drucks am Beispiel einer Stahlbetonsäule

Die Forschungsarbeit, die in diesem Kapitel beschrieben wird, konzentriert sich auf einen repräsentativen Vergleich zwischen einer konventionell errichteten Stahlbetonsäule und Prototypen, die nach zwei ausgewählten Betondruckverfahren hergestellt werden. Die konventionell errichtete Säule, die als Referenzmodell dient, wird von einem Bauunternehmen aus Südtirol unter Verwendung einer Spezialschalung vom italienischen Schalungshersteller Interfama errichtet. Für die Projektierung und Herstellung dieser Spezialschalung ist der Autor dieser Studie verantwortlich, der für Interfama tätig ist. Im Referenzprojekt werden zwei unterschiedlich hohe Säulen mit gleichem Krümmungsradius hergestellt. Dies ermöglicht die Verwendung derselben Schalung für beide Säulen und damit eine erhebliche Kosteneinsparung. Der Kontext der Säule wurde umfassend dokumentiert, um die Ergebnisse entsprechend einordnen zu können.

Zentraler Teil der Forschung ist die Erstellung von Prototypen im Maßstab, wobei ein Prototyp nach dem ablegenden Verfahren 3DCP und ein weiterer nach dem selektiv bindenden Verfahren SPI entwickelt wird. Die Prototypen dienen als experimentelle Modelle, um die praktischen Auswirkungen der Betondruckverfahren auf Herstellungsdauer, Kosten, Nachhaltigkeit und qualitative Eigenschaften zu untersuchen.

Daten werden durch Interviews, detaillierte Protokollierung der Prototypenherstellung und instrumentelle Messungen gesammelt. Eine umfassende qualitative und quantitative Analyse der Daten ermöglicht es, Stärken und Schwächen der Betondruckverfahren im Vergleich zur konventionellen Bauweise zu identifizieren. Der Fokus der Forschung liegt demnach auf dem Vergleich und der Gegenüberstellung von drei unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Stahlbetonteilen.

Repräsentativ für den aktuellen Stand der Technik für die Herstellung einer Stahlbetonsäule wird zunächst das konventionelle Verfahren mit Schalung näher beschrieben. Dieses Verfahren gilt als Standardlösung für die Herstellung eines vergleichbar geformten Betonbauteils. Es beinhaltet den Einsatz einer Metallschalungen, in die der Beton gegossen wird. Das Verfahren ist bekannt für seine Zuverlässigkeit und Präzision, hat aber Defizite in Bezug auf die Gestaltungsfreiheit, die benötigte Zeit und die eingesetzten Ressourcen für den Bau der Schalung.¹¹⁰ Zudem ist für die ökonomische Rentabilität und den ökologischen Fußabdruck von Schalungen eine gewisse Häufigkeit von Einsätzen erforderlich, während für geometrisch anspruchsvolle Formen – zu ihnen zählt die im Versuch hergestellte Stahlbetonsäule – Spezialschalungen eigens für das jeweilige Bauteil geplant und hergestellt werden.¹¹⁰

In einer solchen individuellen Fertigung liegen die großen Stärken von additiven Verfahren, deren Vor- und Nachteile im Rahmen der Forschung untersucht werden. Der erste Prototyp wird dabei in Zusammenarbeit mit dem italienischen Unternehmen Progress 3D Innovation nach dem SPI-Verfahren im Maßstab 1:13 hergestellt. Die Schalung für die Stahlbetonsäule im Originalmaßstab mit einer Gesamthöhe von 6,67 m würde in drei Elementen gedruckt. Diese würden vor Ort auf der Baustelle verbunden, abgedichtet und ausbetoniert. Das Unternehmen

¹¹⁰Vgl. [96] Weger, S. 2

produziert nach dem aktuellen Entwicklungsstand und gilt für das SPI-Verfahren als eines der weltweit führenden. Bei SPI wird Zementleim auf eine Schicht aus Sand aufgetragen, um eine feste Struktur zu erzeugen. Dieses Verfahren ermöglicht eine hohe Gestaltungsfreiheit und komplexe Formen, es bietet darüber hinaus die Möglichkeit, maßgeschneiderte und individualisierte Bauteile herzustellen. Gleichzeitig stellt SPI allerdings spezifische Anforderungen an das Material und die Nachbearbeitung.¹¹¹

Der zweite Prototyp wird in Zusammenarbeit mit dem deutschen Bauunternehmen Eigner Bauunternehmung im Maßstab 1:3 hergestellt, und zwar nach dem 3DCP-Verfahren. Dabei wird Beton schichtweise durch einen 3D-Drucker aufgetragen, um eine verlorene Schalung für die gewünschte Säulenform zu erstellen. Der Maßstab wurde innerhalb der Systemgrenzen des 3D-Druckers gewählt. Die maximal druckbare Bauteilhöhe liegt bei 2,55 m. Wie beim SPI-Verfahren würde die Schalung im Originalmaßstab mit einer Gesamthöhe von 6,67 m in drei Elementen gedruckt. Diese würden vor Ort auf der Baustelle verbunden, abgedichtet und ausbetoniert.

Die Dimensionierung der Prototypen wurde in Absprache mit den beteiligten Unternehmen festgelegt, um die systemischen Kapazitäten und Grenzen der beiden Verfahren zu demonstrieren. Die Größenwahl beim SPI-Verfahren basierte auf der maximalen Kapazität der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Laboranlage. Die Verwendung dieser Anlage für das Drucken des Modells mittels SPI-Verfahren ermöglichte tiefere Einblicke in den Druckprozess, da direkte Beobachtungen des Verfahrens möglich waren. Diese räumliche Nähe und die kompakte Größe der Anlage unterstützten eine präzise Beobachtung und Analyse der Druckdynamiken sowie der Interaktionen der verwendeten Materialien.

4.1 Die Auswahl des Referenzmodells

Die entscheidende Grundlage für die Aussagekraft dieser Arbeit zu unterschiedlichen Herstellungsverfahren im Bereich des Beton-3D-Drucks bildet die sorgfältige Auswahl eines geeigneten Referenzmodells. In erster Linie wurde nach einem realen Projekt gesucht, um den gewünschten Praxisbezug zu gewährleisten. Dieses Kapitel beleuchtet den Prozess und die Überlegungen, die zur Wahl einer spezifischen Stahlbetonsäule geführt haben. Dabei standen die besonderen Merkmale dieser Säule – ihre geometrisch anspruchsvolle Form und der minimale Einsatz von Schalung – im Fokus. Ziel war es, ein Modell auszuwählen, das nicht nur die Komplexität des 3D-Beton-Drucks widerspiegelt, sondern die Potenziale dieses modernen Herstellungsverfahrens in Bezug auf reale Problempunkte aufzeigt, etwa auf die Ressourceneffizienz und Formfreiheit. Durch die Herstellung von Prototypen für jede der untersuchten Herstellungsmethoden kann der aktuelle Stand der Technik dieser Verfahren im Hinblick auf Designaspekte, Festigkeit, Materialeigenschaften und andere relevante Faktoren sichtbar gemacht und bewertet werden.

Die Stahlbetonsäule, die als Referenzmodell für diese Studie dient, wurde nach sorgfältiger Abwägung verschiedener Kriterien ausgewählt. Ein zentrales Merkmal ist die komplexe, zweifach gekrümmte Form der Säule. Herkömmliche Schalungstechniken stoßen bei solchen Formen an ihre Grenzen, wodurch sich der 3D-Beton-Druck als vielversprechende Alternative präsentiert. Gerade die Wahl eines Modells mit herausfordernder Geometrie ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit der beiden Herstellungsverfahren – konventionell und 3D-Druck – umfassend zu evaluieren. Die begrenzte Verwendung von Schalungsmaterialien führt zu einer Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und trägt somit zur Umweltverträglichkeit des Bauvorhabens bei. Die Auswahl dieses Kriteriums reflektiert den ökologischen Aspekt des Beton-3D-Drucks, der durch die Minimierung von Abfall und den sparsamen Einsatz von Materialien charakterisiert ist.

¹¹¹Vgl. [96] Weger, S. 27

Die gewählte Stahlbetonsäule soll nicht nur als repräsentatives Referenzmodell dienen, sondern als Instrument zur Untersuchung der beiden Herstellungsverfahren in Bezug auf ihre Stärken und Schwächen. Die gezielte Auswahl dieser Säule ermöglicht es, die Möglichkeiten des Beton-3D-Drucks im direkten Vergleich zur konventionellen Bauweise aufzuzeigen.

Bei der gewählten Stahlbetonsäule handelt es sich um die Säule eines Bergbahnprojekts in der Region Trentino-Südtirol (Italien). Im Auftrag der italienischen Seilbahngesellschaft Funivia Pinzolo wurde von April bis November 2023 eine neue Gondelbahn in den Brenta-Dolomiten errichtet, die von Prà Rodont zum Gipfel des Doss del Sabion führt. Die Stahlbetonsäule wurde in der Bergstation der neuen Seilbahn auf 2093 Meter über dem Meeresspiegel errichtet.

Abbildung 4.1 zeigt den Fußgängereingang der Bergstation kurz nach seiner Fertigstellung. Eine Herausforderung waren neben der zentralen Stahlbetonsäule die runden Übergänge zwischen den vertikalen und horizontalen Betonkomponenten, für die ebenfalls Spezialschalungen gefertigt wurden. Die abgerundete Form an der Stirnseite des Eingangs wurde durch einer Negativform aus Polystyrol erreicht. Abbildung 4.1 zeigt die 4 m hohe Version der zwei errichteten Stahlbetonsäulen mit gleichem Krümmungsradius. Die 6,67 m hohe Variante steht zentral im Einfahrtbereich der Gondelbahn, mit der die Besucher die Bergstation erreichen. Trotz der unterschiedlichen Höhe konnten die beiden Säulen mit Hilfe derselben Schalung realisiert werden, was den ökonomischen und ökologischen Aufwand für die Herstellung der Anlage reduziert hat.



Abb. 4.1: Eingangsportal für Fußgänger an der Bergstation der Seilbahn Prà Rodont im Skigebiet Pinzolo - Stahlbetonsäule mit Spezialschalung aus Stahl Version H= 4 m (Quelle: Eigene Aufnahme)

Bei genauerem Hinsehen sind an der Säule in Abbildung 4.1 vertikale Linien in regelmäßigen Abständen zu erkennen. Diese sind darauf zurückzuführen, dass eine Schalhaut aus Blech nicht die komplex gekrümmte Form der Säule abbilden konnte. Mathematisch betrachtet, handelt es sich hierbei um einfache Überlegungen: Bei der Rotation einer Hyperbel um ihre Hauptachse entsteht ein zweischaliges Drehhyperboloid.¹¹² Diese geometrische Eigenschaft stellt höchste Anforderungen an die Schalungsplanung, Arbeitsvorbereitung und Bauausführung. Bei der Kalkulation im Angebotsstadium gestaltet es sich in der Regel schwierig, das wahre Ausmaß der Kosten zu erfassen, da der Arbeitsumfang erst mit der notwendigen Detailplanung annähernd abgeschätzt werden kann.

Ein Beispiel für geometrisch vergleichbare Formen aus Stahlbeton sind Kühltürme für Atomkraftwerke oder Faulbehälter für Kläranlagen. Bei deren Fertigung folgt die Schalhaut nicht exakt der Krümmung, sondern wird polygonal zusammengesetzt. Im Falle der Stahlbetonsäule wurde die Schalhaut in Absprache mit den Bauverantwortlichen in vertikale Blechstreifen unterteilt, die den Querschnitt als Polygon anstelle eines Kreises nachbilden.¹¹³

4.1.1 Generatives Design und kraftflussoptimierter Modellentwurf

Generatives Design ist eine revolutionäre Methode, die auf algorithmischer Evolution basiert. Durch den Einsatz von Algorithmen und künstlicher Intelligenz werden optimierte Strukturen generiert, die herkömmliche Designbeschränkungen überwinden können.¹¹⁴ In der additiven Fertigung ermöglicht diese Herangehensweise die Schaffung komplexer, leichter und dennoch stabiler Strukturen, die mit traditionellen Fertigungsmethoden schwer umsetzbar wären. Mit der zunehmenden Abhängigkeit von digitalen Werkzeugen in Architektur, Ingenieur- und Bauwesen steigt die Gelegenheit, Softwareoptimierungstools in Design und Fertigung zu integrieren. Die Identifizierung der Chancen und Vorteile der Verwendung dieser Tools in der Bauindustrie steht im Vergleich zu anderen Branchen allerdings noch am Anfang.¹¹⁵

Manuelle Methoden der strukturellen Optimierung existieren seit vielen Jahrhunderten, wie etwa die Verwendung von Hängemodellen, die zur Erstellung stabiler Druckstrukturen verwendet werden. Diese manuelle Methode zur Vorhersage optimaler Strukturen wurde erstmals von Hooke im Jahr 1675 verwendet, danach von Antoni Gaudí für hochkomplexe Strukturen übernommen und später von Frei Otto weiterentwickelt.¹¹⁶ Seit den 1960er-Jahren wurden Softwarelösungen in verschiedenen Bereichen entwickelt, um optimale Lösungen für komplexe Probleme zu finden. Insbesondere für die Luft- und Raumfahrt sowie für die Automobilindustrie wurden spezifische Programme entwickelt, die Designs für bestimmte Kräfte oder Lastfälle optimieren können.¹¹⁶

Der Begriff „Optimierung“ wird hier in einem allgemeinen Sinn verwendet, um eine Gruppe von Softwareprogrammen zu umfassen, die Analysen durchführen, generieren, verändern und auf Eingabedaten reagieren, um 3D-digitale Raumobjekte zu erstellen oder zu verändern. Dabei gibt es eine Vielzahl von Tools, die unterschiedliche Funktionen auf unterschiedliche Weise ausführen, was bei nicht-technischen Benutzern Verwirrung stiften kann. Die Herausforderung besteht darin, digitale Werkzeuge effizient zu nutzen, um Daten zu analysieren und Lösungen für Probleme zu entwickeln, die für Designer allein schwer zu bewältigen wären.

Die additive Fertigung bringt je nach Methode spezifische Hardwarebeschränkungen mit sich, die auf die besondere Arbeitsweise dieser Systeme zurückzuführen sind. Eine hohe Druckgeschwindigkeit ist unerlässlich, nicht nur um große Objekte effizient zu fertigen, sondern um eine optimale

¹¹²Vgl. [51] Leopold, S. 102

¹¹³Vgl. [39] Hofstadler, S. 37

¹¹⁴Vgl. [68] Ramesh et al., S. 3

¹¹⁵Vgl. [48] Krause, S. 18

¹¹⁶Vgl. [15] Burry, S. 144

Schicht-zu-Schicht-Bindung zu gewährleisten. Kinematische Systeme stoßen jedoch auf Herausforderungen, wenn es darum geht, bei scharfen Ecken oder plötzlichen Richtungsänderungen eine konstante Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten.¹¹⁷

Ein Zylinder gilt als die geometrisch einfachste Form für eine 3D-gedruckte Säule. Um die Druckbarkeit am genauesten zu bewerten, wäre eine vollständige physikalische Simulation erforderlich, die die Ablagerungsrate, das Materialverhalten und die Aushärtungsrate in einer numerischen Prüfung quantifiziert. Ein solches Tool kann die Test- und Entwicklungszeit erheblich verkürzen und die Erfolgsrate der Produktion erhöhen.¹¹⁷

Abbildung 4.2 zeigt die Frontansicht der neuen Bergstation Prà Rodont. Die Formgebung berücksichtigt nicht nur den Kraftfluss innerhalb der Säule, sondern ihre Funktionalität in Bezug auf die umgebenden Elemente der Infrastruktur. Die Säule steht zentral an der Bergstation und wird von den Gondeln umfahren.

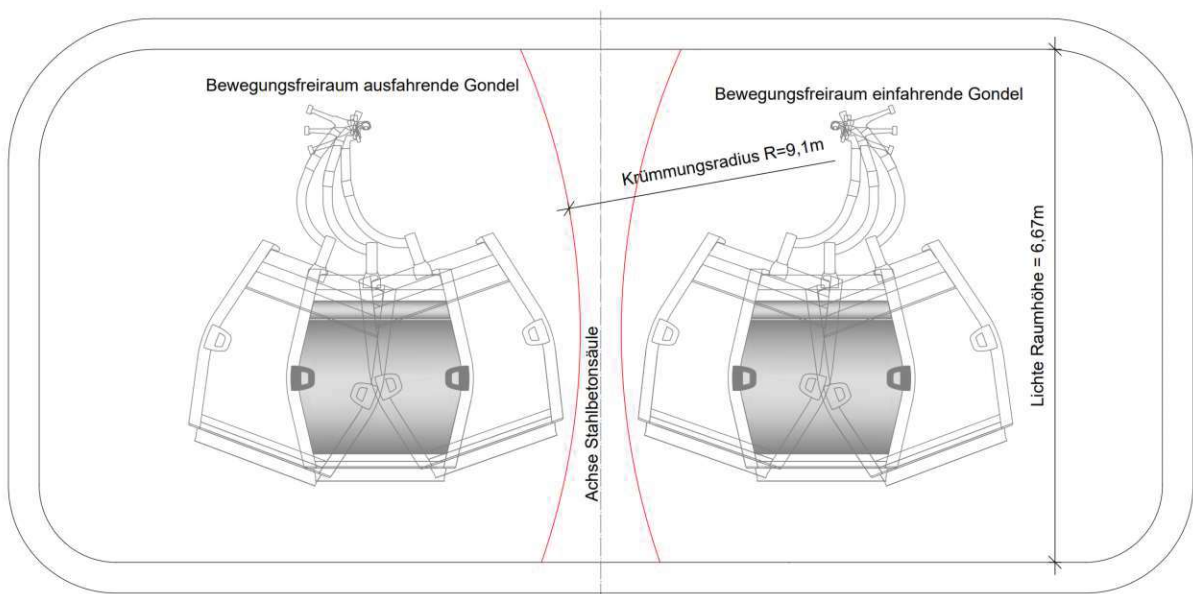


Abb. 4.2: Frontansicht Gondeleinfahrt - Formgebung der Säule unter Berücksichtigung des Bewegungsfreiraums der Gondeln (Quelle: Eigene Darstellung)

Der vorgegebene Abstand zwischen den ein- und abfahrenden Gondeln erforderte eine spezielle Gestaltung, da eine standardmäßige Rundsäule in den Bewegungsfreiraum der Gondeln hineinragen würde und somit die Gefahr einer Kollision bestünde. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Säule in einer doppelt gekrümmten Form entworfen, die eine kompakte und gleichzeitig stabile Struktur gewährleistet. Dieser modifizierte Entwurf ermöglicht es, die Bewegungsfreiheit der Gondeln zu garantieren und gleichzeitig einwirkenden Kräfte abzuleiten. Durch die doppelte Krümmung wird der Kraftfluss innerhalb der Säule optimal gesteuert, was zu einer effizienten Verteilung der einwirkenden Lasten führt. Zusätzlich zur strukturellen Effizienz wurde bei der Gestaltung die ästhetische Integration in die Umgebung berücksichtigt. Die doppelt gekrümmte Form verleiht der Säule ein modernes und ansprechendes Erscheinungsbild, das sich harmonisch in die Architektur der Bergstation einfügt.

Für einen kraftflussoptimierten Modellentwurf gibt es mittlerweile eine Vielzahl von Programmen, die sich eignen. Im Allgemeinen wird auf CAD-Programme (Computer-Aided Design) wie

¹¹⁷Vgl. [4] Anton et al., S. 7

Fusion 360 zurückgegriffen. In der ersten Phase geht es dabei um das Design des Strukturelements und die Optimierung des Materialeinsatzes. Dabei bietet die Formoptimierung von Betonbauteilen mehrere Vorteile, insbesondere bezüglich Effizienz, Materialverbrauch und Leistungsfähigkeit.¹¹⁸ Durch die gezielte Anpassung der Form von Betonbauteilen mit Hilfe von Optimierungstechniken kann der Materialverbrauch reduziert werden. Die Form wird so gestaltet, dass sie genau den Belastungen und Anforderungen standhält, was zu einem effizienteren Einsatz von Beton führt. Durch die Minimierung unnötigen Materials wird nicht nur Beton eingespart, sondern das Gesamtgewicht des Bauteils verringert. Dies ist besonders wichtig bei Strukturen, bei denen das Gewicht eine Rolle spielt, etwa bei mehrgeschossigen Hochbauten.

Durch die Anpassung der Form an spezifische Belastungen und Anforderungen können Betonbauteile ihre Strukturleistung verbessern. Dies umfasst Aspekte wie Festigkeit, Steifigkeit, Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit. Ergebnis formoptimierter Bauteile sind meist komplexe Formen, die mit herkömmlichen Methoden schwer umzusetzen sind. In der Regel werden dafür Spezialschalungen aus Holz oder Stahl hergestellt. Aus ökonomischer Sicht sind die dabei entstehenden Kosten höher als die effektive Einsparung durch Formoptimierung. Meist sind funktionelle oder ästhetische Anforderungen ausschlaggebend für die Herstellung formoptimierter Bauteile.

Ein Beispiel für die praktische Anwendung sind Brückenpfeiler. In diesem Bereich kommen fast ausschließlich Spezialschalungen zur Anwendung und es ist entscheidend, dass die Bauteile den horizontalen und vertikalen Kräften standhalten können. Durch die gezielte Optimierung der Brückenpfeiler und Träger können die Belastungsverteilung verbessert und die Gesamtleistung der Brücke gesteigert werden.¹¹⁸

Abbildung 4.3 zeigt eine Auswahl an Referenzprojekten für additiv hergestellte Stahlbetonsäulen. Sie zeichnen sich durch ihre komplexen geometrischen Strukturen, individuell angepassten Formen und integrierten Funktionen aus.

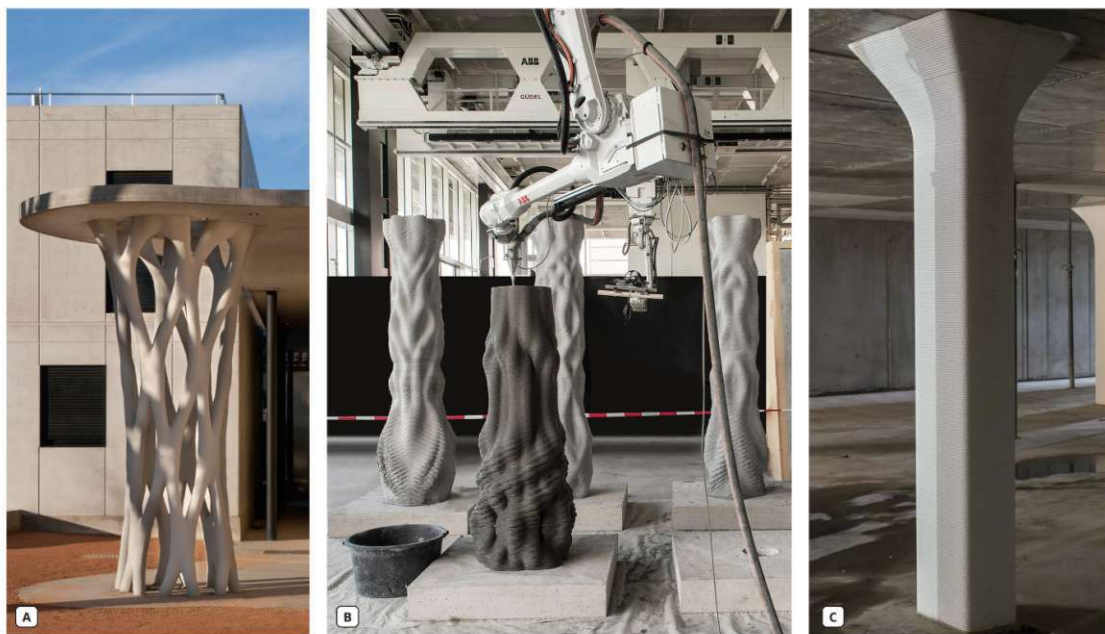


Abb. 4.3: Säulenprojekte: Säule von XtreeE (A) [100], Säulen der ETH Zürich (B) [78], Säule von Affentranger 3DCP (C) [3]

¹¹⁸Vgl. [40] IAAC Blog

Kraftflussoptimierung bezieht sich auf die gezielte Ausrichtung von Bauteilen, um den Weg der auf sie wirkenden Kräfte optimal zu gestalten. Dieser Ansatz berücksichtigt nicht nur die äußeren Lasten, sondern die Kraftflüsse innerhalb der Struktur. Durch die Minimierung von Spannungsspitzen und durch die Schaffung eines gleichmäßigen Kraftflusses können Betonbauteile ihre Tragfähigkeit maximieren und gleichzeitig Materialressourcen schonen.¹¹⁹

Multikriterielle Optimierung berücksichtigt gleich mehrere Kriterien oder Ziele gleichzeitig. Dies können Kosten, Gewicht, Festigkeit, Ästhetik und andere Parameter sein.¹¹⁹ Das System sucht nach Designs, die ein ausgewogenes Verhältnis dieser Kriterien bieten. Durch den Einsatz von Algorithmen können Designer und Ingenieure schnell Iterationen durchführen. Die Generierung neuer Designs und deren Bewertung erfolgt in kürzerer Zeit, was den Entwicklungsprozess beschleunigt.

Abbildung 4.4 zeigt das Rendering der Stahlbetonsäule, die mithilfe der Software Fusion 360 nach dem generativen Designprinzip entworfen wurde. Der Designprozess beinhaltete die Vorgabe der einwirkenden Lasten, um die strukturelle Effizienz der Säule zu maximieren. Die linke Darstellung in der Abbildung illustriert die materialreduzierte Form der Säule, die für die Herstellung mit einem additiven Fertigungsverfahren optimiert wurde. Hier wurde ein bionisches Design gewählt, das natürliche Vorbilder nachahmt, um das Material effizient zu nutzen und gleichzeitig die Stabilität zu gewährleisten. Durch diese Methode konnte signifikant mehr Material eingespart werden, was sowohl ökonomische und ökologische Vorteile bietet. Die bionische Formgebung ermöglicht es, Material nur dort zu verwenden, wo es für die Tragfähigkeit und Stabilität notwendig ist, wodurch das Gewicht der Struktur reduziert wird, ohne ihre Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen. Im Gegensatz dazu zeigt die rechte Darstellung die konventionelle Herstellung der Stahlbetonsäule. Diese Version weist einen gleichbleibenden Querschnitt auf und ist mit einem üblichen Kapitell für die Lastenleitung ausgestattet. Die konventionelle Form ist einfach und folgt traditionellen Bauweisen, die sich durch ihre Robustheit und Verlässlichkeit auszeichnen. Jedoch führt diese Methode in der Regel zu einem höheren Materialverbrauch, da die Säule über ihre gesamte Länge hinweg denselben Querschnitt beibehält, unabhängig von den tatsächlichen Belastungsanforderungen.

Auf die Definition der Anforderung folgt die Modellierung, wobei unter Verwendung von CAD-Software ein virtuelles Modell des Objekts erstellt wird. Dabei werden alle erforderlichen geometrischen Formen und Eigenschaften berücksichtigt, um die optimale Leistung des Modells zu gewährleisten. Als nächster Schritt folgt die Simulation des Modells, um sicherzustellen, dass es den Anforderungen entspricht. Hierbei werden verschiedene Analysetechniken eingesetzt, um den Kraftfluss innerhalb des Modells zu analysieren und zu optimieren. In diesem Fall wird eine FEM-Analyse in Fusion 360 durchgeführt, um die Belastbarkeit des Modells zu überprüfen und den Kraftfluss zu optimieren. Sobald die Simulation abgeschlossen ist, kann das Modell als Volumenkörper digital exportiert und für die Herstellung mit additiven Fertigungstechnologien aufbereitet werden.

4.2 Referenzmodell - Stahlbetonsäule in konventioneller Ortbetonbauweise

Bei der Realisierung der im Rahmen der Forschung als Referenz genutzten Stahlbetonsäule hat sich das ausführende Bauunternehmen für eine speziell angefertigte Schalung aus Stahl des italienischen Schalungsherstellers Interfama entschieden. Zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Arbeit war der Autor für Interfama tätig und für die Projektierung und Herstellung der vorgestellten Spezialschalung verantwortlich.

¹¹⁹Vgl. [49] Lachmayer et al., S. 53-55

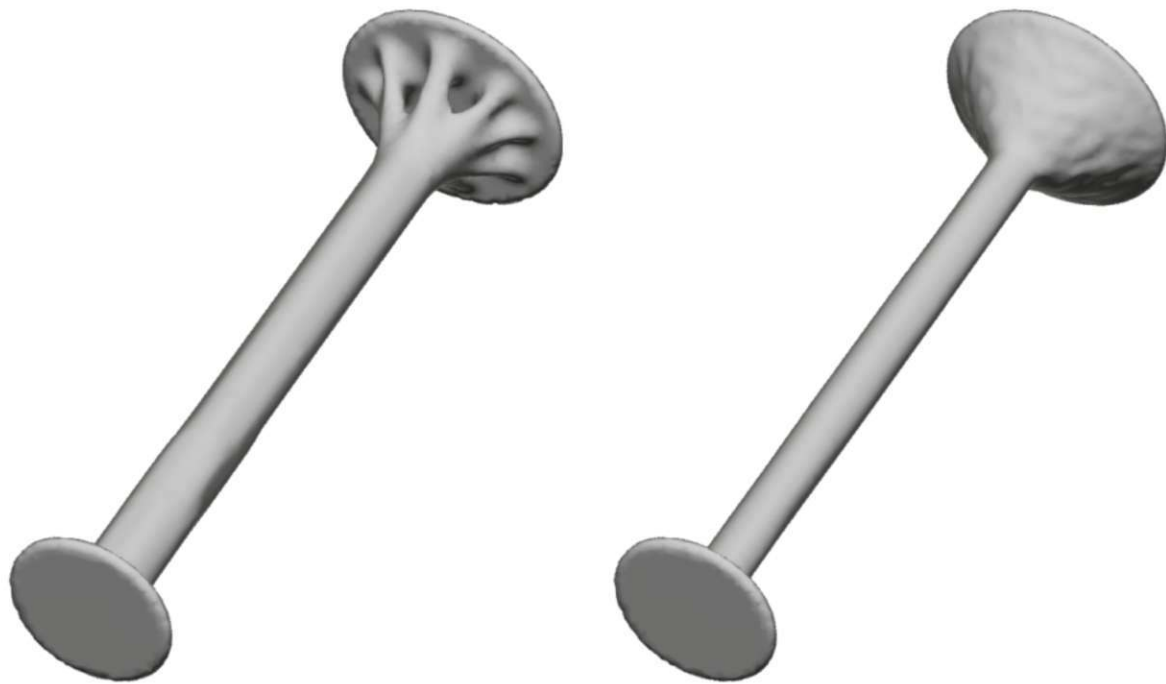


Abb. 4.4: Ergebnis des generativen Designs der Säulenform in Fusion 360 (Quelle: Eigene Darstellung)

4.2.1 Herstellungsprozess der Schalung

Die Planung von Spezialschalungen erfolgt in der Regel auf der Grundlage von 2D-Zeichnungen im Format DWG, die vom Kunden an das Technische Büro des Schalungsherstellers übermittelt werden. Aus diesen Vorlagen wird mit Fusion 360 des Unternehmens Autodesk ein dreidimensionales Volumenmodell erstellt. Fusion 360 ist eine integrierte 3D-Plattform für Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Manufacturing (CAM) sowie Computer-Aided Engineering (CAE) und bietet eine umfassende Lösung für den gesamten Produktentwicklungsprozess, von der Konzeption bis zur Fertigung. Mit Hilfe des 3D-Modells des fertigen Betonbauteils werden dann die spezifischen Anforderungen an die Schalung definiert. In Abbildung 4.5 ist die Prozesskette der Herstellung der Säulenschalung in Stahl mit den tatsächlich aufgewendeten Arbeitsstunden dargestellt.

Im Falle der Referenz-Säule war die zweidimensional gekrümmte Form der Oberfläche nicht mit Blech als Schalhaut realisierbar, weil die Stahlschalung ausschließlich aus Laserteilen gebaut werden sollte. Nach Rücksprache mit den Bauverantwortlichen wurde für eine Realisierung des Querschnitts als Polygon anstelle eines Kreises optiert und die Schalhaut aus insgesamt 30 Blechstreifen hergestellt. Jeder der Streifen schloss einen Winkel von 12° . Die Betonoberfläche übernahm diese Form und stellte ein 30-eckiges Vieleck anstelle eines Kreises als Querschnitt dar. Die einzelnen Schalungssegmente wurden horizontal so unterteilt, dass damit die beiden unterschiedlich hohen Säulen realisierbar waren. Dafür wurden die beiden untersten Elemente bei der Erstellung der kürzeren Säule weggelassen. Der Radius an der Verbindungsstelle entsprach dem unteren Radius der kurzen Stütze, die verbleibende Höhe wurde in der Mitte geteilt. Dabei spielte es keine Rolle, dass die Schalung höher war als der fertige Betonkörper, sofern der Beton

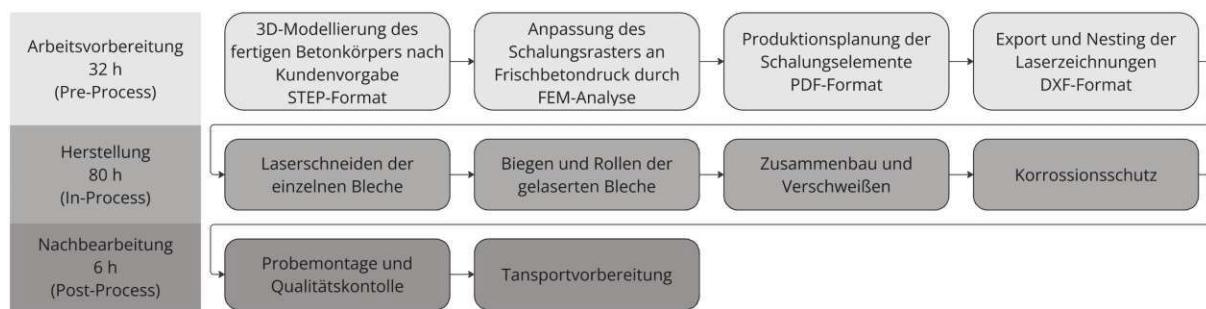


Abb. 4.5: Prozesskette - Konventionelle Herstellung der Säulenschalung aus Stahl (Quelle: Eigene Darstellung)

nur bis zur gewünschten Stelle in die Form gefüllt wird. Problematisch wäre ein zu großer Höhenunterschied zwischen Schalung und Betonoberfläche, da der Zugang mit der Rüttelflasche zum Verdichten des Frischbetons dadurch erschwert würde.

Die von Interfama gefertigten Spezialschalungen in Stahl werden nahezu ausschließlich aus Laserteilen hergestellt. Laserschneiden ermöglicht eine hohe Präzision bei der Bearbeitung von Metallteilen, wodurch komplexe Formen und feine Details mit hoher Genauigkeit und Wiederholbarkeit erreicht werden können. Laserteile haben saubere Schnittkanten ohne Grate, Verformungen oder andere Unregelmäßigkeiten. Dadurch entfällt häufig die Notwendigkeit zusätzlicher Nachbearbeitungsschritte, was Zeit und Kosten spart. Neben diesen Vorteilen wirkt sich die Verwendung von Laserteilen auf die Produktivität der nachfolgenden Arbeitsschritte aus. Die Laserteile für Spezialschalungen sind mit einem Stecksystem geplant. Die Einzelteile können entsprechend dem Produktionsplan nach dem Nut-Feder-Prinzip zusammengesteckt werden. Dadurch entfallen Messarbeiten oder die aufwendige Herstellung von Schweißblehren in der Produktion. Für die Zuordenbarkeit der Einzelteile wird die Planzeichnung vom Laser direkt auf die Elemente graviert. Abbildung 4.6 zeigt die Schweißarbeiten an einem Segment der Säulenschalung.

Fusion 360 ist für die Fertigung mit Lasern oder 3D-Druckern optimiert und bietet hilfreiche Tools an. Durch die Funktion "Nesting" werden etwa alle Laserteile im Modell in die zweidimensionale Ebene gebracht und auf dem Rohblech optimal angeordnet. Die Konturen der 3D-Modelle werden entsprechend ihrer Materialstärke auf unterschiedlichen Blechen sortiert. Von Fusion 360 kann die Zeichnung für die Herstellung direkt an den Laser gesendet werden.

Für die Minimierung des Materialverlusts beim Lasern wurden für die Herstellung der Säulenschalung nur zwei unterschiedliche Materialstärken verwendet: für die Schalhaut ein 3 mm dickes Blech, für die Rippen ein 8 mm dickes Blech.

Darüber hinaus bietet die Software Funktionen für Computer Aided Manufacturing (CAM), mit denen Benutzer Werkzeugwege für die maschinelle Bearbeitung generieren können. Dies umfasst Funktionen wie Werkzeugpfade, Drehen, Fräsen und 3D-Druck. Bei der Planung einer Stahlschalung werden Verbindungselemente wie Schrauben, Muttern oder Bolzen für die spätere Montage auf der Baustelle entsprechend des vorgegebenen Frischbetondrucks bemessen. Solche Elemente sind daher entsprechend der Konstruktionszeichnung hinzuzufügen und es ist zugleich sicherzustellen, dass deren Funktionalität bei der Montage gewährleistet wird. Ergebnis der Planungsarbeit sind schließlich technische Zeichnungen und Dokumentationen der Schalung. Diese umfassen Ansichten, Maße und alle relevanten Details, die für die Fertigung und den Einsatz der Schalung erforderlich sind.



Abb. 4.6: Montage- und Schweißarbeiten an einem Segment der Säulenschalung (Quelle: Eigene Aufnahme)

4.2.2 Herstellungsprozess der Säule auf der Baustelle

Die vorgefertigten Schalungselemente wurden auf der Baustelle montiert. Zunächst wurde eine Seite der Säulenschalung an der zuvor vermessenen Position aufgebaut und durch die dafür vorgesehenen Löcher in der Betonplatte verankert. Die Verbindung der Schalungselemente erfolgte mittels Bolzen und Keilen. Im Vergleich zu Schrauben mit Muttern ermöglichen diese eine schnellere Montage und Demontage und erfordern kein spezielles Werkzeug.

Im nächsten Schritt wurde die Bewehrung installiert. Die Bewehrungsstäbe wurden entsprechend dem Krümmungsradius der späteren Säule gebogen. Nach dem Auftragen von Schalöl wurde die zweite Halbschale der Schalung montiert. Um Luftblasen zu entfernen und eine glatte Sichtbetonoberfläche zu gewährleisten, wurden an der Schalung Außenrüttler angebracht.

Nach der vollständigen Montage der Schalung wurde der Beton in die Form gegossen. Dabei ist es entscheidend, die Konsistenz und Zusammensetzung des Betons genau zu kontrollieren. Für die Referenzsäule wurde ein spezieller Beton mit einem niedrigen Wasser-Zement-Verhältnis und hoher Rohdichte verwendet, um die geforderte Festigkeit und Oberflächenqualität zu erreichen. Der Beton wurde schichtweise eingefüllt und kontinuierlich mit Innen- und Außenrüttlern verdichtet, um Lufteinschlüsse zu vermeiden.

Abbildung 4.7 zeigt die Stahlbetonsäule im eingeschalteten und ausgeschalteten Zustand. Die Kanten des Polygons haben im Frischbeton ihre Spuren hinterlassen und die horizontalen Verbindungen

ungsstellen der Schalung sind deutlich erkennbar. Abbildung 4.7 (rechts) wurde unmittelbar nach dem Ausschalen aufgenommen, als der Beton noch feucht war. Farbunterschiede haben sich während der Austrocknungsphase ausgeglichen, und die Kanten waren nach der Trocknungszeit weniger auffällig.

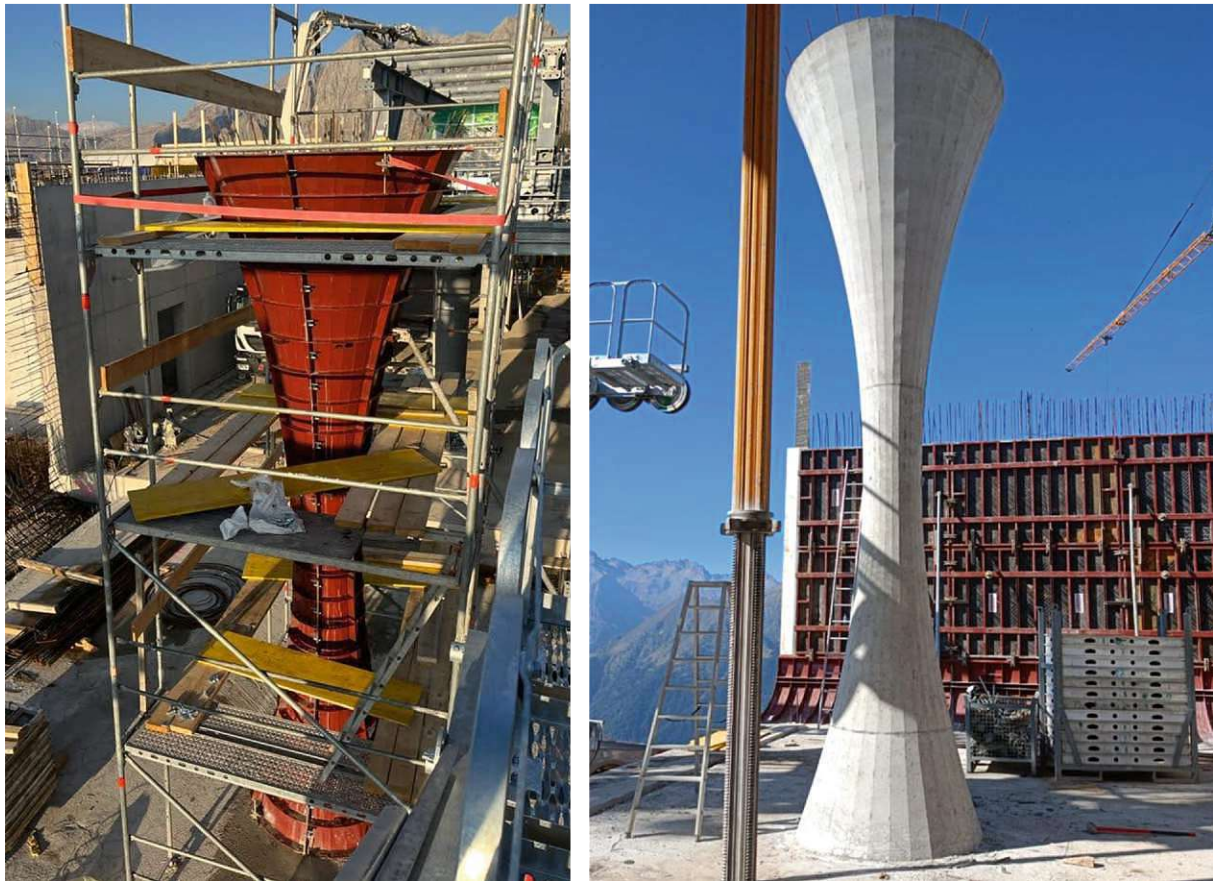


Abb. 4.7: Stahlbetonsäule im eingeschalteten Zustand (links), Stahlbetonsäule nach dem Ausschalen (rechts) (Quelle: Eigene Aufnahme)

4.3 Prototyp 1 – Selective Paste Intrusion (SPI)

Progress 3D Innovation hat in Zusammenarbeit mit Kurt Wohlgemuth einen 3D-Drucker entwickelt, der aus Sand und Zement Objekte formt, die mit herkömmlicher Technik nicht herstellbar wären. Dieses Verfahren, das als SPI- oder Pulverbett-Verfahren bekannt ist, ermöglicht die schichtweise Herstellung von Bauteilen durch Auftragen von Zuschlag auf die Bauplattform. Durch die lokale Zugabe von Zementleim wird der Sand gebunden, ohne dass Stützstrukturen erforderlich sind.¹²⁰

Der 3D-Drucker von Progress 3D Innovation, dargestellt in Abbildung 4.8, ist für den Einsatz in kontrollierter Hallenumgebungen konzipiert, nicht jedoch für Baustellen. Das Unternehmen bevorzugt die Off-Site-Fertigung von Betonfertigteilen, um von deren Vorteilen zu profitieren,

¹²⁰Vgl. [34] Handelskammer Bozen

etwa von der Unabhängigkeit von Witterungsbedingungen, von einer besseren Qualitätssicherung, verbesserten Arbeitsbedingungen und einer effizienteren Prozessplanung.¹²¹



Abb. 4.8: SPI-Anlage der Progress 3D Innovation im Industriemaßstab mit 16 m³ Bauraum (Quelle: Progress 3DI [65])

Bis zum heutigen Entwicklungsstand der Progress 3D Innovation hat das Fertigungsverfahren drei übergeordnete Entwicklungsstadien durchlaufen. So startete der Südtiroler Unternehmer Kurt Wohlgemuth bereits vor mehr als zehn Jahren aus einer Notwendigkeit heraus die Entwicklung eines Beton-3D-Druckers nach dem SPI-Verfahren.¹²² 2021 patentierte Wohlgemuth den ersten 3D-Beton-Inkjet-Druckkopf weltweit. Dabei wird ein Gemisch aus Binder und Aktivator, in diesem Fall Portlandzement mit Wasser, über Düsen selektiv in eine aufgetragene, grobkörnige Sandschicht gespritzt. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jedem Druckvorgang Schicht für Schicht von unten nach oben. Der nicht gebundene Sand übernimmt die Stützfunktion des Bauteils und wird nach Aushärtung des Zements entfernt. Übrig bleibt der im Bindemittel gebundene Sand. Im Vergleich zum Pulverbett-Verfahren im 3D-Metalldruck, bei dem das Material auf der Bauplattform eine durchschnittliche Pulvergröße von 20 bis 50 µm aufweist, ist der Sand beim Beton 3D-Druck entsprechend grob. Das Material im Bauraum kann generell nicht hoch verdichtet werden, wodurch Bauteile eine entsprechende Porosität aufweisen. Für die erforderliche Festigkeit des gedruckten Betonbauteils muss das Eindringverhalten des Zementleims in das

¹²¹Experteninterview

¹²²Vgl. [62] NOI Techpark Südtirol

Partikelbett kontrolliert werden. Dieses ist von der Rheologie des Zementleims in Kombination mit dem Fließwiderstands des Partikelbetts abhängig.¹²³

In einem zweiten Entwicklungsschritt haben Wohlgemuth und die Progress Group gemeinsam einen Druckkopf für ein Verfahren mit Sorelzement entwickelt.¹²⁴ Sorelzement wurde im späten 19. Jahrhundert vom kanadischen Chemiker und Ingenieur Stanislas Sorel entwickelt. Die Hauptbestandteile sind Magnesiumoxid (MgO) und Magnesiumchlorid (MgCl_2). Diese Materialien werden in Pulverform gemischt, können dann in Kontakt mit Feuchtigkeit aushärten und eine feste, zementartige Substanz bilden.¹²⁵

Für das entwickelte Verfahren wird im Bauraum ein Trockengemisch aus Glasschaumgranulat und Sorelzement aufgetragen. Im Gegensatz zum ersten Verfahren Wohlgemuths, dem SPI, handelt es sich hier um das Verfahren der selektiven Zementaktivierung (SCA). Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass das Bindemittel bei der SCA zusammen mit dem Zuschlagstoff auf die Bauplattform aufgetragen wird. Über den Druckkopf wird der Sorelzement durch die Zugabe von Wasser selektiv aktiviert. Im Vergleich zum vorangehenden Verfahren mit Portlandzement und Sand zeichnet sich dieses Verfahren durch die hohe Genauigkeit und Detailtreue aus, die durch die feinen Bestandteile und eine Schichtdicke von 2 mm erreicht wird. Ein nach diesem Verfahren hergestelltes Fassadenelement wird in Abbildung 4.9 dargestellt.



Abb. 4.9: Entpackungsvorgang eines nach dem additiven Verfahren SCA gedruckten Fassadenelements (Quelle: Frank [30])

¹²³Vgl. [96] Weger, S. 5

¹²⁴Vgl. [34] Handelskammer Bozen

¹²⁵Vgl. [96] Weger, Seite 16

Festzuhalten ist allerdings auch, dass Sorelzement im Vergleich zu herkömmlichem Portlandzement eine geringere Druckfestigkeit sowie höhere Kosten aufweist. Außerdem reagiert Sorelzement empfindlich auf Feuchtigkeit, er kann Festigkeit verlieren, wenn er über längere Zeit Nässe ausgesetzt ist. Dies begrenzt seine Verwendbarkeit in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit oder in Anwendungen, bei denen das Material regelmäßig mit Wasser in Kontakt kommt. Aus diesem Grund wurden mit dem Verfahren hauptsächlich Inneneinrichtungen gedruckt. Fassadenelemente, die anhaltender Feuchtigkeit ausgesetzt sein können, müssen dagegen durch eine Oberflächenversiegelung vor Feuchtigkeit geschützt werden.

Den dritten Entwicklungsschritt setzt die Progress Group in Zusammenarbeit mit der FIT AG durch die Entwicklung eines Beton-3D-Druckers im Industriemaßstab mit einem Bauraum von 4 x 2,5 x 1 m. Der Druck erfolgt mittels selektiver Zementaktivierung, wobei ein Zement-Sand-Gemisch schichtweise aufgetragen und durch eine Flüssigkeit aus Bindemittel und Wasser gehärtet wird.¹²⁶ Dabei wird die Software Netfabb genutzt, um die Elemente effizient im Bauraum anzuordnen.¹²⁷

Es ist anzumerken, dass der Einsatz des 3D-Druckers von Progress 3D Innovation derzeit vor allem bei kleinen Losgrößen und bei der Fertigung individueller Stücke wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Ziel ist es, traditionelle Betonherstellungsverfahren durch additive Fertigung zu ergänzen.¹²⁷ Dabei wird von den Entwicklern betont, dass der Drucker voraussichtlich nie auf einer Baustelle eingesetzt wird, sondern als zusätzliches Werkzeug in der Fertigteilindustrie dient.¹²⁸

Im aktuellen Herstellungsverfahren, auf dem der Prototyp für die vorliegende Arbeit basiert, setzt Progress 3D Innovation auf das SPI-Verfahren. Bei der Herstellung wurde Portlandzement als Binder, Wasser als Aktivator und Sand als Aggregat verwendet.¹²⁷ Die reinen Materialkosten für 1 m³ Druckmaterial sind mit jenen von Ort beton vergleichbar. Nach Herstellerangaben liegt der aktuelle Verkaufspreis beim SPI-Verfahren bei ca. 1000 Euro/m³ Bauraum.¹²⁷ Der Verkaufspreis wird bei diesem Verfahren nach Bauraumvolumen berechnet, da die Materialkosten im Vergleich zu den Anschaffungs- und Betriebskosten gering ausfallen. Somit werden die Herstellungskosten pro Bauteil geringer, je besser der Bauraum ausgenutzt wird.

Der für die Industrie entwickelte Beton-3D-Drucker von Progress 3D Innovation ist der weltweit größte seiner Art. Der Bauraum mit einer Länge von 4 m umfasst ein Volumen von 10 m³. Die Auflösung ist direkt von der aufgetragenen Schichtdicke abhängig, die minimal 2 mm beträgt. Die Schichtdicke hängt wiederum von der gewählten Korngröße ab. Außerdem verlängert eine dünne Schichtdicke die Druckdauer. Die Leistung des Druckers wird mit 2 m³/h angegeben.¹²⁷ Somit dauert ein Druckvorgang für die 10 m³ Bauraum bis zu 5 Stunden.

Das vorrangige Ziel der Progress Group bei der Entwicklung ihres Beton-3D-Druckers ist der Vertrieb der Maschine als Komplettlösung für Industrieunternehmen. Als Maschinen- und Anlagenbauer für die Fertigteilindustrie wird die additive Fertigung als Erweiterung der bestehenden Geschäftsfelder gesehen. Für die fertige 3D-Druck-Anlage soll eine Hallenfläche von 600 m² notwendig sein, wobei der Betrieb der Maschine soweit automatisiert werden soll, dass dafür zwei Personen notwendig sind. Durch austauschbare Baukästen soll die Auslastung der Maschine maximiert werden.¹²⁶

4.3.1 Materialzusammensetzung

Anders als bei Beton, kommen beim SPI-Verfahren Zuschlagstoffe mit Korngrößen bis maximal 1,5 mm zum Einsatz. Für das vorliegende Projekt wurde natürlicher Quarzsand vom Typ sabbia

¹²⁶Vgl. [64] Progress 3D Innovation

¹²⁷Experteninterview

¹²⁸Vgl. [30] Frank

silicea essiccata 515 verwendet, der gewaschen, zykloniert und gesiebt wurde. Typ 515 deutet auf eine Korngröße von 0,5 - 1,5 mm hin. In Italien wird dieser Quarzsand aus dem Fluss Po gewonnen und als Zuschlagstoff in Mörtel und Estrich verwendet. Die Dichte des Materials liegt bei 1500 kg/m^3 .¹²⁹ Die Wahl der Korngröße hängt direkt mit der auftragbaren Schichtstärke zusammen, die sich wiederum auf die Druckgeschwindigkeit sowie die Auflösung der Oberflächenbeschaffenheit auswirkt. Im Versuch entspricht die Schichtstärke von 3 mm dem zweifachen Durchmesser des Größtkorns. Alternativ zum Quarzsand kann Blähton als Zuschlagstoff verwendet werden, um eine geringere Dichte sowie einen niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten zu erzielen.¹³⁰

Als Bindemittel wurde kommerziell verfügbarer Portlandzement CEM I 42,5 R verwendet. Ein für das SPI-Verfahren geeigneter Zementleim muss bestimmte Anforderungen erfüllen. So muss er ausreichend fließfähig sein, um von selbst zu versickern und so die Zuschlagstoffe über die gesamte Schichtdicke zu verbinden. Eine zu hohe Fließfähigkeit führt zu unzureichender Konturgenauigkeit. Durch die Zugabe von Additiven wie Fließmittel wird eine langanhaltende Verarbeitbarkeit und ein anschließend schnelles Abbinden des Zementleims erzielt. Die Beeinflussung der Rheologie des Zementleims dient der Maximierung von Formtreue und Schichtverbund.¹³¹

Mit der Prognose von Eindringtiefen setzt sich Weger in seiner Dissertation [96] „Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion – SPI“ detailliert auseinander. Im Rahmen seiner Arbeit stellt er analytische Berechnungsmethoden vor, um die Eindringtiefe vorab zu bestimmen. In Abbildung 4.10 werden zwei Szenarien bildlich dargestellt: (1a–4a) mit vollständigem Schichtenverbund und (1b–4b) mit unvollständigem Schichtenverbund.

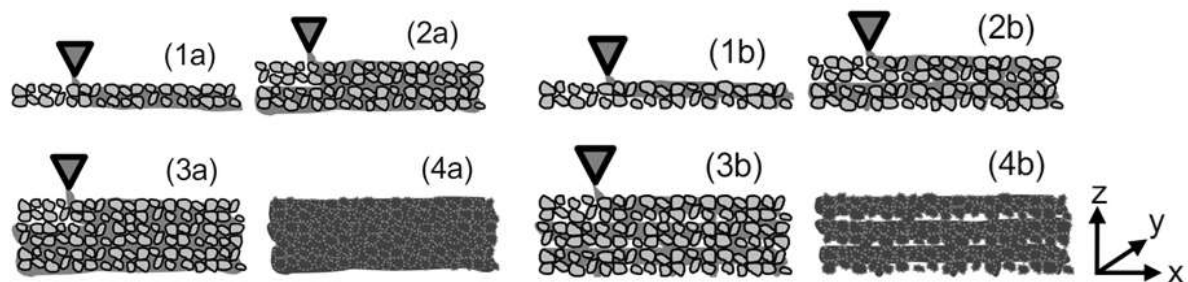


Abb. 4.10: Eindringverhalten des Zementleims beim SPI-Verfahren (Quelle: Weger [96], S. 5)

Im ersten Fall (1a–4a) füllt der Zementleim die Hohlräume des Partikelbetts vollständig aus, was zu einer hohen Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Endprodukts führt. Im zweiten Fall (1b–4b) bleibt der Zementleim teilweise zurück, wodurch ein mangelhafter Schichtverbund und Hohlräume entstehen. In seiner Arbeit konnte Weger eine Druckfestigkeit mit Belastungsrichtung unter 90° zum Schichtaufbau des gedruckten Probekörpers von 78 Mpa nachweisen.¹³²

4.3.2 Herstellungsprozess

Der Herstellungsprozess startet beim 3D-Druck mit der Erstellung des 3D-Modells mit Hilfe eines CAD-Programms. Für die Formgebung diente die Referenz-Stahlbetonsäule in der neuen Bergstation von Pinzolo als Vorlage. Vorgegeben waren der konstante Krümmungsradius der Säule sowie die Gesamthöhe. Dieses Modell wurde an Progress 3D Innovation übermittelt, wo

¹²⁹Vgl. [13] Building&Bricolage

¹³⁰Experteninterview

¹³¹Vgl. [96] Weger S. 6

¹³²Vgl. [96] Weger S.37

das Modell auf eine Gesamthöhe von 50 cm skaliert und in einzelne Schichten geteilt wurde. Das Programm berechnete den Druckpfad sowie die Durchflussmenge. Die Daten wurden daraufhin mittels G-Code an den Drucker übermittelt.

Die Herstellung des Prototyps nach dem SPI-Verfahren erfolgte am Sitz der Progress 3D Innovation in Feldthurns in Südtirol. Im Vergleich zur eigentlichen Stahlbetonsäule mit einer Gesamthöhe von 6,67 m entspricht die gedruckte Höhe einem Maßstab von 1:13. Aufgrund betrieblicher Umstrukturierungen war der Industriedrucker zum gegebenen Zeitpunkt außer Betrieb. Für die Herstellung des Prototyps wurde daher ein Drucker im Labormaßstab verwendet. Dieser Beton-3D-Drucker wird für Versuche in der Entwicklung verwendet, etwa zur Optimierung der rheologischen Eigenschaften des Zementleims.¹³³

Der Herstellungsprozess für das Bauteil nach dem Selective Paste Intrusion-Verfahren, wie es bei der Prototyperstellung verwendet wurde, kann in vier Phasen eingeteilt werden: die Arbeitsvorbereitung, den Druckvorgang, die Aushärtungszeit und die Nachbehandlung.¹³³ Im Gegensatz zum gedruckten Prototyp wird davon ausgegangen, dass mit dem SPI-Verfahren eine verlorene Schalung und nicht ein Massivbetonteil gedruckt wird. Schließlich könnte ein Massivbetonteil nicht der Norm entsprechend bewehrt werden, wäre somit also unzulässig. Aus diesem Grund erscheint eine Gegenüberstellung nicht sinnvoll. Gewählt wurde eine Wandstärke von 3 cm. Da in der Norm nicht anders vorgegeben, kann diese Betonstärke nicht als Betonüberdeckung oder sonstige statische Nutzung angerechnet werden. Die Schale wird vom vorgegebenen Betonkörper nach außen projiziert.

Abbildung 4.11 zeigt die dokumentierten Prozessschritte des Prototypen. Die angegebene Herstellungsdauer in Arbeitsstunden wurde von den gemessenen Daten sowie den Angaben im Experteninterview auf die Originalgröße der Säule umgerechnet. Bei der Bestimmung der Herstellungsdauer wird von einer hohen Auslastung der Druckanlage ausgegangen. Da hauptsächlich Betriebskosten und Abnutzung die Produktionskosten bestimmen, ist der Druckvorgang wirtschaftlicher, je besser der Bauraum ausgefüllt ist.

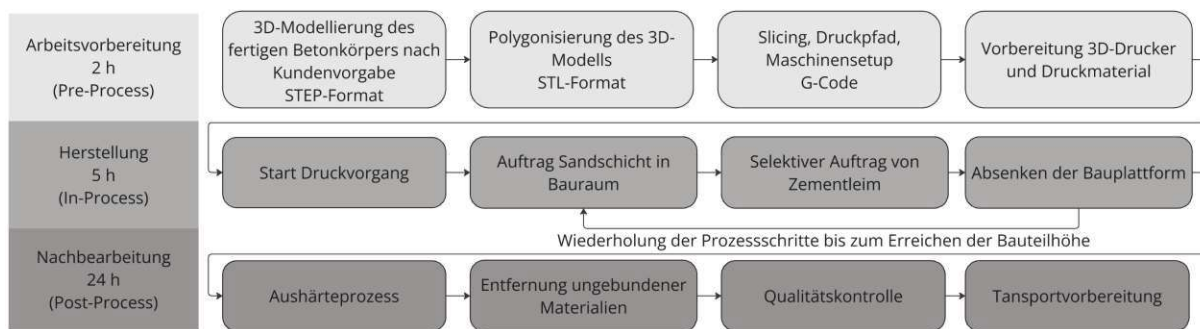


Abb. 4.11: Prozesskette - Herstellung des 1. Prototypen nach dem SPI-Verfahren (Quelle: Eigene Darstellung)

Der verwendete Drucker besteht aus einer Bauplattform, in der der Zuschlagstoff schichtweise aufgetragen wird. Diese Bauplattform ist in der Höhe verschiebbar (z-Achse). Im Vergleich zu gewöhnlichen 3D-Druckern wird die Bauplattform um die Höhe der einzelnen Partikelschicht auf der z-Achse bewegt und nicht der Druckkopf. Dieser wird von einem Gantry-Bewegungssystem entlang der x- und der y-Achse bewegt. Am Druckkopf befindet sich die Düse mit einem Innendurchmesser von 2 mm.

¹³³Experteninterview

Der Druckvorgang startet mit dem Auftrag der ersten Partikelschicht in der Bauplattform. Dies geschieht mittels einer Rolle, die das Material aus einem Vorratsbehälter bezieht. Überschüssiges Material wird über den Rand der Bauplattform geschoben. Die vorgemischte Zementpaste wird von einer Pumpe aus einem Behälter zur Düse gepumpt. Wie bei anderen Druckverfahren auch, startet der Drucker abseits des eigentlichen Modells, um anfängliche Inhomogenitäten oder Druckschwankungen nicht in das Modell einzubeziehen. Der Zementleim wird durch die Düse mit möglichst geringem Druck auf das Partikelbett aufgetragen. Nach dem lokalen Auftragen des Zementleims wird die Bauplattform um die Schichtdicke von 3 mm abgesenkt, die Walze trägt die zweite Layerschicht auf und der iterative Prozess beginnt von vorn. Um die Druckzeit zu halbieren, wurde das Bauteil im Liegen gedruckt. Die Druckhöhe auf der z-Achse entsprach dadurch 21 cm, dem größten Durchmesser, und nicht der Bauteilhöhe von 67 cm. Die Säule wurde aus 70 Schichten von jeweils 3 mm Schichtdicke erstellt. Vergleichbar mit den Jahresringen eines Baumes sind die einzelnen Schichten auf der Betonoberfläche in Abbildung 4.12 (rechts) zu erkennen.

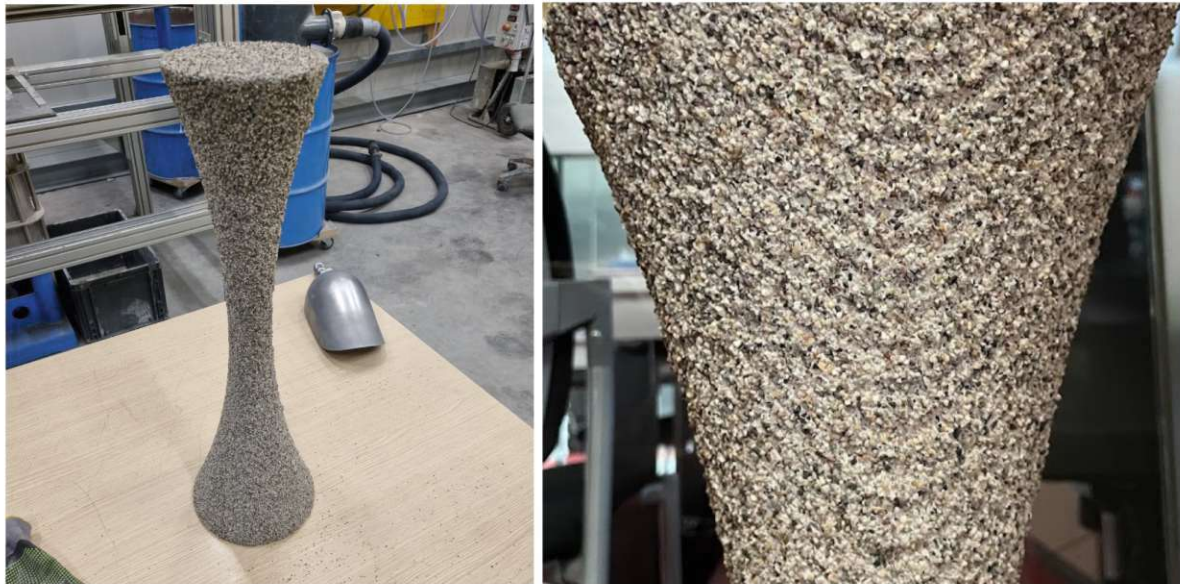


Abb. 4.12: Gedruckter Prototyp nach dem SPI-Verfahren (Quelle: Eigene Aufnahme)

Nach Abschluss des Druckvorgangs musste der Zementleim im Bauraum aushärten. Nach wenigen Stunden konnte der ungebundene Quarzsand aus der Bauplattform abgesaugt und im nächsten Druckvorgang eingesetzt werden. Bei der industriellen 3D-Druckanlage von Progress 3D Innovation soll der Boden des Druckbehälters nach Aushärtung des Bauteils geöffnet werden können, um den ungebundenen Zuschlagstoff nach unten abfließen zu lassen.¹³⁴ In der Nachbehandlung wurden lose oder teilweise gebundene Sandkörner mit einer Bürste vom Bauteil abgetragen. Abbildung 4.12 zeigt die zementgebundene Säule, wobei im Gegensatz zu anderen Bindemitteln eine nachträgliche Oberflächenversiegelung bei Zement nicht notwendig ist.

¹³⁴Experteninterview

4.3.3 Kosten

Bei der Analyse der Kosten bezieht sich diese Arbeit auf den Verkaufspreis des Herstellers bzw. auf den Anschaffungspreis für den Kunden. Der Kunde für die Stahl- bzw. verlorene Schalung ist in allen drei Vergleichsfällen das ausführende Bauunternehmen. Die Progress 3D Innovation entwickelt primär die Produktionsanlage für den Beton-3D-Druck nach dem SPI-Verfahren, ist aber – wie bei Fertigteilen – für den lokalen Markt Hersteller der Endprodukte. Der Einflussbereich bei Beton-Fertigteilen ist dabei durch die Transportkosten begrenzt, der die Betonfertigteile bei Überschreiten einer bestimmten Reichweite weniger wettbewerbsfähig macht. Für 3D-gedruckte Betonbauteile ist dieser Einflussbereich jedoch wesentlich höher, da die Transportkosten im Verhältnis zu den Bauteilkosten geringer ausfallen.

Der Verkaufspreis für 3D-gedruckte Bauteile wird nach Bauraumvolumen berechnet. 1 m³ Bauraum kostet nach Angaben von Progress 3D Innovation 1000 Euro.¹³⁴ Für den gesamten Bauraum von 10 m³ ergibt dies einen Verkaufspreis von 10.000 Euro pro Druckdurchlauf. Da es sich beim verwendeten Druckmaterial um herkömmlichen Zement mit Sand und Wasser handelt, belaufen sich die Materialkosten auf 87 Euro/m³ für C30/37-Beton. Progress 3D Innovation hat für die 3D-gedruckte Schalung in Originalmaßstab einen Verkaufspreis von 7000 Euro geschätzt. Der Verkaufspreis der kleineren Säule liegt bei 6000 Euro. Die Schalung für die 6,67 Meter hohe Stahlbetonsäule würden aus verfahrenstechnischen und transportbedingten Gründen in drei Segmente zu jeweils 2,22 m geteilt. Die anfallenden Schalungskosten für die Realisierung der beiden Stahlbetonsäulen nach dem SPI-Verfahren wurden nach Herstellerangaben auf 13.000 Euro geschätzt. Transportkosten wurden dabei nicht berücksichtigt.

Beim SPI-Verfahren wird die beste Wirtschaftlichkeit erreicht, wenn Bauteile eng gepackt in mehreren Schichten übereinander gefertigt werden. Abbildung 4.13 zeigt den dicht gepackten Bauraum für ein 3D-gedrucktes Modell der Architekturbieniale in Venedig 2016.

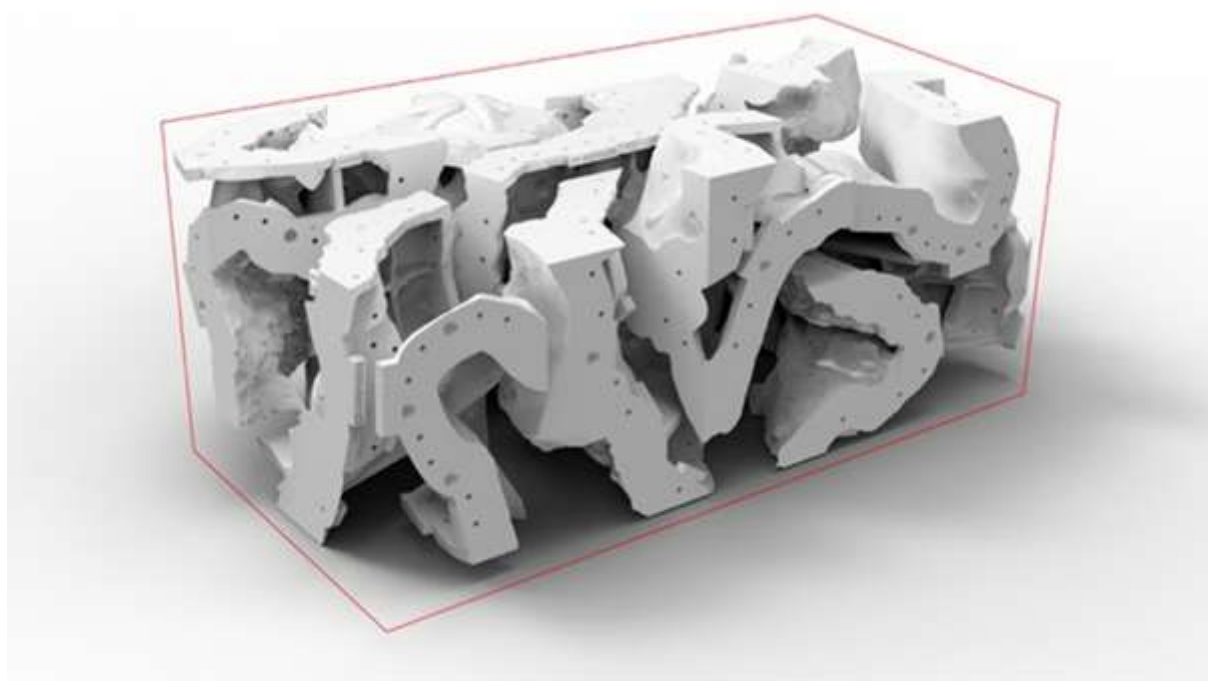


Abb. 4.13: Beispiel für einen optimierten 3D Bauraum für selektiv bindende Verfahren (Quelle: Dillenburger [25])

Ein effizienter Betrieb erfordert demnach mindestens eine dichte Ebene von Bauteilen, um Diskontinuitäten in der Gesamtdauer des Druckvorgangs zu minimieren. Es wird empfohlen, die Höhe des Aufbaus konstant zu halten, um unnötige Kostensteigerungen zu vermeiden. Eine 3D-Nesting-Software übernimmt die Aufgabe des automatischen Übersetzens und Drehens einer Sammlung von 3D-Teilen innerhalb des Druckraums, um den Leerraum zu minimieren und die Qualität sowie die Quantität der gedruckten Teile zu optimieren.¹³⁵

Auf die Herstellungskosten haben die Herstellungszeit und die Bauteilqualität einen enormen Einfluss. Zeit und Qualität müssen daher sorgfältig abgewogen werden, da eine höhere Qualität normalerweise mit einem längeren Herstellungsprozess verbunden ist. Entscheidend sind die gewählten Parameter, insbesondere die Schichtdicke. Geringere Schichtdicken verbessern die Detailgenauigkeit und Oberflächenqualität, verlängern jedoch die Fertigungszeit und erhöhen die Gesamtkosten.¹³⁶

4.4 Prototyp 2 – 3D Concrete Printing (3DCP)

Die deutsche Eigner Bauunternehmung setzt sich seit mehr als fünf Jahren mit dem Thema Beton-3D-Druck auseinander.¹³⁷ Der ursprüngliche Hintergrund der Anschaffung des firmeneigenen Beton-3D-Druckers ist der 3D-Druck von Aussparungen aus Beton. Zur Erhöhung der Produktivität auf den eigenen Baustellen druckt das Unternehmen die notwendigen Aussparungen für Wände und Decken am Tag vor dem Einbau in der Produktionshalle. Die Aussparung wird als verlorene Schalung verwendet, das bedeutet, sie wird ins Bauteil integriert. Die schichtweise Oberflächenstruktur, die beim 3D-Printing entsteht, sorgt für einen guten Verbund zwischen gedrucktem Bauteil und Ort beton.¹³⁸

Konventionelle Aussparungen werden aus Holz auf Maß auf der Baustelle gezimmert. Da keine Aussparung der anderen gleicht, kommen hier die Stärken des 3D-Druckers für kleine Losgrößen zur Geltung. Neben der individuellen Herstellung der Aussparung und deren Montage nimmt der Ausbau nach der Betonage viel Zeit in Anspruch.¹³⁷ Das Schalmaterial fällt im Normalfall als Abfall an. Durch die Verwendung von 3D-gedruckten Aussparungen werden Arbeit und Abfall vor Ort auf der Baustelle eingespart.

Das Tochterunternehmen Eigner Betonmanufaktur produziert Aussparungen und verlorene Schalungen für vertikale und horizontale Bauteile für interne sowie externe Anfragen. Neben den Betonbauteilen entwickelt und vertreibt das Unternehmen Einrichtungsgegenstände wie Weinregale oder Pflanzentröge.¹³⁸

Die Eigner Betonmanufaktur verwendet den Beton-3D-Drucker BauMinator von Baunit. Dieser ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Der österreichische Baustoffhersteller hatte 2015 in einer Kooperation mit der Universität Innsbruck die Entwicklung eines Beton-3D-Druckers gestartet. Heute entwickelt und vertreibt er das Know-how gemeinsam mit dem Drucker und dem zugehörigen Druckmaterial als Komplettpaket. Baunit selbst stellt keine Endprodukte her, sondern vermittelt Endkunden an ihre Partner. Die Eigner Betonmanufaktur ist neben drei österreichischen Unternehmen ein solcher System-Partner.¹³⁹ Im kontinuierlichen Austausch zwischen Anwender und Hersteller wird die verwendete Verfahrens- und Baustofftechnologie angepasst und erweitert.¹³⁷ Die Optimierung und Weiterentwicklung nehmen die Partner zum

¹³⁵ Vgl. [101] Yau und Hsu, S. 1843-1854

¹³⁶ Vgl. [30] Frank

¹³⁷ Experteninterview

¹³⁸ Vgl. [27] Eigner Betonmanufaktur

¹³⁹ Vgl. [8] Baunit

Teil selbst in die Hand. Eine solche Entwicklung ist beispielsweise der farbige Betondruck durch die Zugabe von Farbpigmenten in flüssiger Form oder als Pulver.¹⁴⁰



Abb. 4.14: Beton-3D-Drucker BauMinator des österreichischen Baustoffherstellers Baunit (Quelle: Baunit [8])

Die Komplettanlage für das 3DCP-Verfahren von Baunit ist in Abbildung 4.14 dargestellt und besteht im Wesentlichen aus vier Systemkomponenten. Die Basis für den Beton-3D-Drucker bildet der sechssachsige Industrieroboter ABB IRB 4600-40/2.55 mit einer Traglast von 40 kg. Das theoretisch mögliche Volumen des Roboterarms liegt bei 4,5 m Radius und 2,55 m Druckhöhe. Um die Druckhöhe zu maximieren, wird der Knickarmroboter auf einen Sockel montiert. Für die Vergrößerung des Bauraums sind Fahrachsen in der Ebene oder der Höhe denkbar, wie sie von ABB für die Industrie angeboten und beispielsweise vom niederländischen 3D-Druck-Unternehmen CyBe verwendet werden. Der Industrieroboter von Baunit wird mit der Steuerung IRC 5 kombiniert, womit theoretisch zwei Industrieroboter mit jeweils sechs Achsen angesteuert werden können.¹⁴¹

Die zweite wesentliche Komponente bildet das Materialtransportsystem gemeinsam mit dem Druckkopf. Das Material wird in der Mörtelpumpe gemischt und über ein Schlauchsystem in den Druckkopf gepumpt. Die Mörtelpumpe ist direkt in die Prozesssteuerung der Anlage integriert. Der Druckkopf als Bauteil wird von Baunit an seine Partner vermietet, wodurch die Anwender dank der ständigen Weiterentwicklung der Technologie stets auf die neuesten Entwicklungen zurückgreifen können.¹⁴² Um den zunächst pumpfähigen Mörtel für den 3D-Druck nutzbar zu machen, wird die Rheologie des Materials durch Zugabe von Beschleuniger am Extruder

¹⁴⁰Vgl. [87] Unikum

¹⁴¹Vgl. [76] Schöpf

¹⁴²Experteninterview

angepasst. Durch die finale Zugabe des Beschleunigers und die damit einhergehende Anpassung der Betoneigenschaften sind Überhänge bis zu 70 Grad realisierbar.¹⁴¹ Entscheidend für die Druckeigenschaften ist neben der Technologie im Druckkopf die dritte Systemkomponente: das Druckmaterial. Im Falle von Baunit wird das Material PrintCret 230 verwendet. Technologie und Material müssen für den 3D-Druck aufeinander abgestimmt sein. So ist das 3DCP-Verfahren mit der Lösung von Baunit nur mit dem eigens hergestellten Spezialmörtel möglich. In Kapitel 4.4.1 werden die zusammengetragenen Informationen zur Materialzusammensetzung genauer ausgeführt.

Die vierte Systemkomponente von Baunit ist die Software für die Aufbereitung der Daten. Wie andere Beton-3D-Druck-Hersteller, etwa das italienische Unternehmen WASP oder das niederländische Unternehmen CyBe, wird bei Baunit die CAD-Software Rhino 3D-CAD von McNeel in Verbindung mit Grasshopper als Programmieroberfläche verwendet. Dabei werden auf der Basis der Geometriedaten über die visuellen Programmmodule in Grasshopper die Bahn Daten für die Robotersteuerung erzeugt. Diese werden anschließend in der ABB-Steuerung einer Codeprüfung unterzogen und nach deren Abschluss für die Fertigung bereitgestellt.¹⁴¹

Die Eigner Betonmanufaktur kann auf eine größere Anzahl von Referenzprojekten für den wirtschaftlichen und nachhaltigen Einsatz ihres Beton-3D-Druckers verweisen. Repräsentativ ist eine Tiefgarageneinfahrt in Nördlingen (Deutschland), bei der Eigner Bauunternehmung als ausführendes Unternehmen mitgewirkt hat. Gedruckt wurden Aussparungskörper, um das Eigengewicht der Stahlbetondecke zu reduzieren und Material an Stellen einzusparen, an denen es statisch erlaubt ist. Abbildung 4.15 zeigt den Druckprozess der Aussparungskörper (links) sowie deren positionierung auf der Deckenschalung (rechts). Die Wirkungsweise ist vergleichbar mit Verdrängungskörpern aus Kunststoff. Mit Hilfe der Aussparungskörper lassen sich das Deckengewicht reduzieren und die Spannweite erhöhen. Zudem muss für die Decke weniger Beton hergestellt und zur Baustelle transportiert werden, wodurch der Rohstoffeinsatz verringert und die CO₂-Bilanz des Gebäudes verbessert werden kann. Zum ökologischen Fußabdruck trägt die Tatsache bei, dass die 3D-gedruckten Körper aus Beton im Gegensatz zu Verdrängungskörpern aus Kunststoff die Baustofftrennung bei einem Rückbau erleichtern.¹⁴³



Abb. 4.15: Referenzprojekt - Tiefgarageneinfahrt in Nördlingen (Quelle: EngelsmannPeters GmbH [28])

Aufgrund fehlender Normen wurde vor der Realisierung der Garageneinfahrt von der TU Graz ein Probeträger entwickelt und hergestellt. Im universitätseigenen Labor für Konstruktiven

¹⁴³Vgl. [28] EngelsmannPeters GmbH

Ingenieurbau (LKI) wurde die Tragfähigkeit des Deckenausschnitts in einem Biegeversuch geprüft. Durch die gesetzten Maßnahmen und die Verwendung einer zementreduzierten Betonrezeptur für den Frischbeton konnte das CO₂-Äquivalent im Vergleich zur ursprünglichen Planung um insgesamt 47 % reduziert werden. Das Projekt wurde mit dem Architekturpreis Beton 2023 ausgezeichnet.¹⁴³

4.4.1 Materialzusammensetzung

Für die Erstellung des Prototyps nach dem 3DCP-Verfahren wurde der Spezialmörtel PrintCret 230 von Baunit verwendet. Bei dem verwendeten Druckmaterial handelt es sich nicht um Beton, sondern um Mörtel. Die genaue Materialzusammensetzung ist unbekannt. Bekannt ist allerdings, dass die Mischung aus Zement mit feinkörnigem Kantkorn und Zuschlagstoffen besteht.¹⁴⁴

Auf der Betonoberfläche des Prototyps sind feine Fasern zu erkennen. Die Rohdichte liegt bei 1990 kg/m³ und das Größtkorn misst 2,00 mm.¹⁴⁵ Nach Herstellerangaben ist das Material für Umgebungen mit hoher Wassersättigung ohne Taumittel (Expositionsklasse XF3) geeignet. Das ausgehärtete Material erreicht nach Herstellerangaben eine Druckfestigkeit $f_{ck} > 50$ MPa und eine Biegezugfestigkeit f_{ct} von 9-11 MPa abhängig von der Druckrichtung.¹⁴⁶ Die Biegezugfestigkeit für Standardbeton liegt bei einem Fünftel bis einem Neuntel der Druckfestigkeit.

4.4.2 Herstellungsprozess

Abbildung 4.16 zeigt die dokumentierten Prozessschritte des Prototypen. Die angegebene Herstellungsdauer in Arbeitsstunden wurde von den gemessenen Daten sowie den Angaben im Experteninterview auf die Originalgröße der Säule umgerechnet. Für die Herstellung des Körpers wurde das 3D-Modell übermittelt, das als Basis für das SPI-Verfahren diente. Die STEP-Datei wurde in Rhino auf den Maßstab 1:3 skaliert. Dies entspricht einer Gesamthöhe von 2,22 m. Der Druckbereich in Höhe z wurde von der Eigner Betonmanufaktur maximiert, indem der Roboterarm auf einen Sockel gestellt wurde. In Rhino wird die Säule im Druckraum zusammen mit dem Beton-3D-Drucker dargestellt. Im nächsten Schritt werden die Parameter in Grasshopper eingestellt, einem algorithmischen Modellierungswerkzeug für Rhino. In Grasshopper wird jede Komponente in Form einer Box dargestellt. Der Benutzer kann die verschiedenen Boxen miteinander verbinden und erhält so ein Knotendiagramm, das die Beziehung zwischen den einzelnen Blöcken beschreibt.

Bei Herstellungsmethoden wie dem Beton-3D-Druck mit Roboterarm gibt es aktuell keine Standard-Software. Um den G-Code zu erstellen, ist daher ein Zwischenschritt erforderlich, bei dem das Modell in Polylinien sowie Punkte mit x -, y - und z -Koordinaten dekonstruiert wird, die die Befehle für den Drucker darstellen. Im Gegensatz zu herkömmlicher Software, die die STL-Vorlage in gleiche horizontale Schichten zerlegt, bietet dieses Plug-in die Möglichkeit, die Bewegungen des Extruders auf unterschiedliche Weise zu steuern.

Wie sich die unterschiedlichen Bewegungen des Extruders auf die gedruckte Bauteiloberfläche auswirken, zeigen die gedruckten Säulen nach dem 3DCP-Verfahren in Abbildung 4.17 (rechts). Der erste Prototyp nach diesem Verfahren wurde mit dem Spiralslicer gedruckt. Hier kann zusätzlich zwischen einem kontinuierlichen Anstieg auf der z -Achse und der Erstellung von Schichten mit „Rampe“ unterschieden werden. Der zweite Prototyp wurde mit einem Slicer erstellt, der die Oberflächenstruktur in Abhängigkeit vom Radius des Bauteils ändert. Für den Druck wurde das Modell in ein Polygon mit 100 Ecken umgewandelt, da die Form im

¹⁴⁴Vgl. [87] Unikum

¹⁴⁵Vgl. [31] Grassers, S. 21

¹⁴⁶Vgl. [8] Baunit

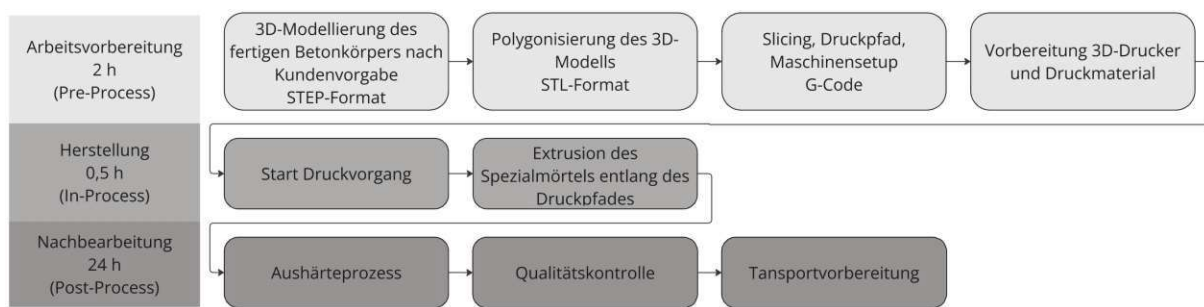


Abb. 4.16: Prozesskette - Herstellung des 2. Prototypen nach dem 3DCP-Verfahren (Quelle: Eigene Darstellung)

kartesischen Koordinatensystem sonst nicht beschreibbar ist. Die Druckhöhe wurde mit 7,5 mm, die Druckbreite mit 20 mm und die Druckgeschwindigkeit auf 300 mm/s eingestellt. Über die Verbindung von Rhino und Grasshopper kann in Rhino eine Druckvorschau simuliert werden. Selbst damit können allerdings nicht alle Einflussfaktoren vorhergesehen werden. So werden bei besonders ausragenden Bauteilen die optimalen Parametereinstellungen durch ein Trial-and-Error-Verfahren bestimmt.¹⁴⁷ Um dem Prototyp mehr Stabilität während des Drucks zu verleihen, wurde das Modell um 180° gedreht. Gesteuert wird der Beton-3D-Drucker durch den in Grasshopper generierten Bewegungspfad, der als G-Code übermittelt wird.

Für den Druckvorgang wurde zunächst das Druckmaterial abgemischt. Dafür wird das Druckmaterial mit der angegebenen Wassermenge in die Mörtelpumpe gegeben und gemischt. Diese Pumpe wurde speziell für den Beton-3D-Druck entwickelt und ist Teil des Komplettpakets. Der darin verwendete Pflugscharmischer ist ein 3D-gedrucktes Bauteil aus Metall.¹⁴⁷ Nach vollständiger Durchmischung nach etwa fünf Minuten kann das Material zum Druckkopf gepumpt werden. Für die Gewährleistung der durchgehenden Homogenität des Materials wird es zunächst in einen Auffangbehälter gepumpt. In einem zweiten Schritt wird der Beschleuniger als Additiv am Extruder beigemischt.¹⁴⁸ Es ist gut erkennbar, wie das austretende Material seine Konsistenz von flüssig zu plastisch verändert. Nach einer letzten manuellen Bestätigung an der Steuereinheit wird der Druckvorgang gestartet. Der Roboterarm bringt sich im durch eine Lichtschranke gesicherten Bereich in Startposition. Als Druckplattform dient eine Europalette mit beschichteter Vielschichtplatte. Wie voreingestellt, startet der Drucker außerhalb der Bauteilgrundfläche mit dem Druck.

Der Druckvorgang der 220 cm hohen Säule dauerte 15 Minuten. Abbildung 4.17 zeigt den Druckvorgang sowie die frisch gedruckten Säulen. Gleich nach dem Druck wurde das Start- und Endstück mit einer Kelle vom Bauteil getrennt. Ansonsten waren keinerlei Nachbehandlungsarbeiten notwendig. Nach dem Druckvorgang wird die Europalette mit dem frisch gedruckten Bauteil mit einem Hubstapler aus dem Druckbereich gebracht, danach wird eine neue Europalette positioniert und der Druck des nächsten Bauteils gestartet. Die Oberfläche der Betonsäule ist zu diesem Zeitpunkt druckfest und etwas klebrig. Die beim Hydratations-Vorgang ausgesetzte Wärme ist klar zu spüren. Das Bauteil in dieser Form und Größe kann nach zwölf Stunden transportiert werden, im Falle der ausgehärteten Säulen mit einem Autoanhänger. Als Schutz wurden zwei Styroporformen zugeschnitten und es wurde etwas Schaumstoff an den Berührungsstellen platziert. Beide Prototypen haben den Transport von Nördlingen (Deutschland) nach Verona (Italien) ohne erkennbare Schäden überstanden.

¹⁴⁷Experteninterview

¹⁴⁸Vgl. [74] Roussel, S. 65



Abb. 4.17: Herstellungsdocumentation 3DCP-Verfahren in der Eigener Betonmanufaktur (Quelle: Eigene Aufnahmen)

4.4.3 Kosten

Die Kostenstruktur beim 3DCP-Verfahren setzt sich aus Materialkosten, Druckkosten einschließlich der Anschaffung und Wartung der Technologie sowie aus Arbeitskosten zusammen, wobei letztere durch die Automatisierung im Druckprozess gering ausfallen. Die Materialkosten bei der Prototypenherstellung sind beim 3DCP-Verfahren im Vergleich zum SPI-Verfahren höher. Dies liegt an der auf den Druckkopf abgestimmten Spezialmischung von Bauput mit hohem Zementanteil. Die Investitionskosten für das Druckpaket BauMinator starten in Abhängigkeit von Größe und Komplexität bei 150.000 Euro.¹⁴⁹ Der Verkaufspreis für die Säulenschalung im Originalmaßstab von 6,67 Metern wurde auf 5000 Euro geschätzt. Wie beim SPI-Verfahren wäre die Schalung herstellungsbedingt in 3 Segmente zu jeweils 2,22 m Höhe geteilt worden.

¹⁴⁹Vgl. [29] Exclusive Bauen & Wohnen

Kapitel 5

Additive und konventionelle Fertigung im Vergleich

Nach der Auswahl der konventionell hergestellten Referenzsäule und der Herstellung der beiden 3D-gedruckten Prototypen als maßstabgetreue Pendant der klassischen Stahlschalung geht es im Folgenden um einen Vergleich der Fertigungsmethoden, wobei sich dieser Vergleich auf die baubetrieblichen Parameter der Forschungsfragen fokussiert.

Abbildung 5.1 stellt die Vergleichsmodelle dar. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden die bei der Erstellung der Prototypen gesammelten Daten und Grundlagen auf das Modell im Originalmaßstab übertragen.



Abb. 5.1: Rendering der Vergleichsmodelle von additiv gefertigten verlorenen Schalungen nach dem 3DCP-Verfahren (links), dem SPI-Verfahren (mitte) und der wiederverwendbaren Schalung aus Stahl (rechts) (Quelle: Eigene Darstellung)

Es wurden ausschließlich die Schalungen miteinander verglichen, da das 3D-gedruckte Material keine Bewehrung aufweist und somit aufgrund der derzeit fehlenden Normgebung nicht statisch angerechnet werden kann. Daher war es notwendig, die Schalung um die Wandstärke nach außen zu vergrößern, wodurch das Bauteil insgesamt an Durchmesser zugenommen hat.

5.1 Herstellungsdauer der Stahlbetonsäule

Während etablierte Schalsysteme auf Lager produziert und bei Bedarf gekauft oder gemietet werden, ist die Herstellungsdauer bei maßgefertigten Spezialschalungen maßgeblich für die Entscheidung des Produktionsverfahrens. So musste beispielsweise das konkrete Projekt der neuen Gondelbahn Prà Rodont im Skigebiet Pinzolo pünktlich zu Beginn der Skisaison in Betrieb genommen werden. In diesem Kapitel werden daher die Herstellungszeiten der Schalungen in konventionellem Stahl mit den im 3DCP- und SPI-Verfahren hergestellten Schalungen untersucht

und verglichen. Die Herstellungsdauer umfasst dabei den Zeitraum vom Start der Projektierung bis zur Auslieferung und ist für die drei unterschiedlichen Fertigungsmethoden in Abbildung 5.2 dargestellt.

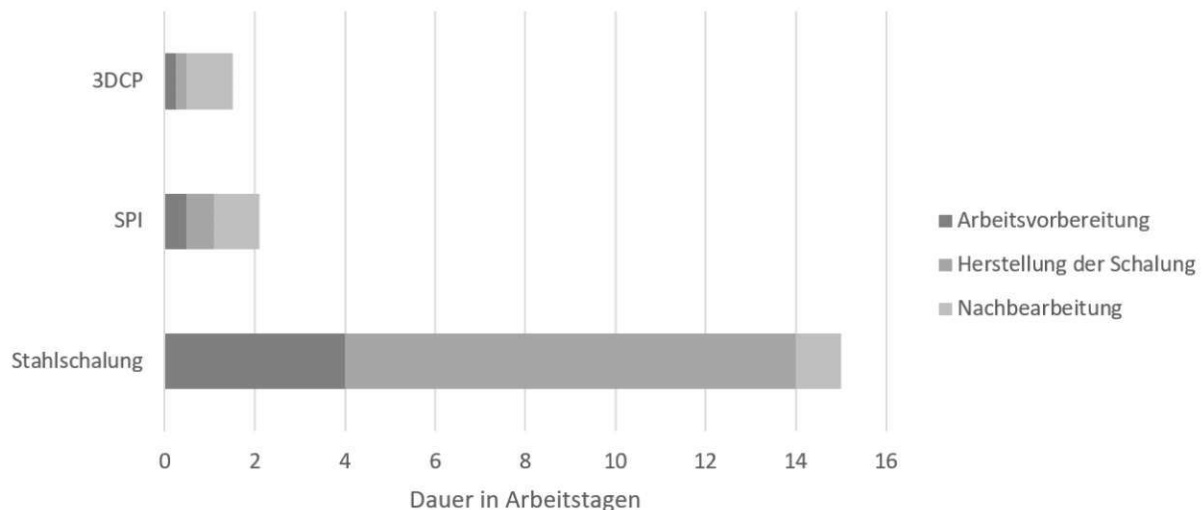


Abb. 5.2: Herstellungsdauer der unterschiedlichen Schalungen in Arbeitstagen [AT]

Im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise zeigt sich für die additiven Verfahren schon in der Arbeitsvorbereitung eine erhebliche Zeitersparnis. Die Planung der Stahlschalung erfolgte unter Verwendung moderner Softwareunterstützung für 3D-Modellierung, automatisierter Blechabwicklung und Nesting. Dennoch waren für das Projekt der vorgestellten Stahlschalung vier Arbeitstage bis zum Produktionsstart notwendig. Dies liegt daran, dass die Produktionsplanung und die notwendigen Blechzeichnungen höchst detailliert erfolgen müssen, um einen Mehraufwand und Improvisation im Produktionsprozess zu eliminieren. Die Herstellung der Stahlschalung vom Lasern der Bleche bis zur Korrosionsbeschichtung nahm zudem insgesamt zehn Arbeitstage in Anspruch.

Unerwartet schnell konnte die Herstellung im 3D-Concrete-Printing-Verfahren abgewickelt werden. Nach einer Vorbereitung des erstellten 3D-Modells in Rhino und Grasshopper würde der effektive Druckprozess der 6,6 m hohen Betonform nur umgerechnet 45 Minuten betragen. Für den Aushärtprozess bis zur Transportfähigkeit mussten weitere zwölf Stunden aufgewendet werden, er kann allerdings über Nacht erfolgen. Werden die gemessenen Daten bei der Herstellung des Prototyps auf die Herstellungsdauer der gesamten Betonschalung nach dem 3D-Concrete Printing-Verfahren im Originalmaßstab hochgerechnet, ergibt dies 1,5 Tage vom Eingang des 3D-Modells bis zur Transportfähigkeit.

Die Arbeitsvorbereitung für das SPI-Verfahren war mit zwei Stunden etwas aufwendiger. Hier wird allerdings nicht ein Bauteil vorbereitet, sondern der gesamte Bauraum. Im Druckprozess selbst, der mit fünf Stunden wesentlich länger dauerte als jener mit dem 3DCP-Verfahren, werden parallel mehrere Bauteile gedruckt. Auf der Grundlage der gemessenen Daten und der Erfahrungswerte des Herstellers wird die Produktion der Betonform im Originalmaßstab vom Eingang des 3D-Modells bis zur Transportfähigkeit auf zwei Tage geschätzt. Was allerdings zu beachten ist: Beim SPI-Verfahren ist die Herstellungsdauer von der Auslastung der Maschine abhängig. Aus wirtschaftlichen Gründen kann es sinnvoll sein bei einer geringen Auslastung den Eingang weiterer Aufträge abzuwarten, um den Bauraum auszufüllen. Eine sehr hohe Auslastung führt zu Wartezeiten im Herstellungsprozess. Die reine Produktionsdauer ist nicht von der

Anzahl oder Größe der gleichzeitig gedruckten Bauteile abhängig, da immer der gesamte Prozess durchlaufen wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Beton-3D-Druck, insbesondere das 3DCP-Verfahren, signifikante Zeiteinsparungen bei der Schalungsherstellung möglich macht. Zudem machen die Möglichkeit der schnellen Projektierung und die reduzierte Wahrscheinlichkeit von Planungsfehlern diese Technologie noch attraktiver. Obwohl sie etwas mehr Zeit in Anspruch nimmt als das 3DCP, bringt die SPI-Methode nicht das Risiko einer Instabilität während des Produktionsprozesses mit sich.

Wie das Ergebnis zeigt, ist das Potenzial moderner Herstellungstechnologien für Betonschalungen schon allein mit Blick auf den investierten Zeitaufwand groß. Die Auswahl der Verfahren sollte allerdings nicht nur mit Blick auf die Arbeitszeit, sondern unter Berücksichtigung der spezifischen Projektanforderungen und wirtschaftlichen Überlegungen erfolgen. Zudem könnte die Entwicklung geeigneter Simulationssoftware für den Herstellungsprozess die Produktionsplanung von Beton-Druck weiter verbessern. Der eigentliche Druckprozess ist beim Beton-3D-Druck im Vergleich zur manuellen Konstruktion von Stahlschalungen äußerst schnell. Die additiven Fertigungsverfahren ermöglichen es, komplexe Schalungsstrukturen unter optimalen Voraussetzungen in einem Zeitraum von nur zwei Tagen zu drucken. So druckt die Eigner Betonmanufaktur die Aussparungskörper spätestens am Tag bevor diese auf der Baustelle eingebaut werden. Die schnelle Herstellungsmöglichkeit hat sich bewährt, da die Bedarfsplanung für Bauteile wie Aussparungen oft sehr kurzfristig erfolgt.¹⁵⁰

Neben der Herstellung der Schalung selbst, die im Zuge der Prototypen dokumentiert wurde, werden potenzielle Auswirkungen des Beton-3D-Drucks auf die Bauzeit vor Ort analysiert. Im Fokus steht die Erörterung von Gesprächen mit Fachleuten, die auf mögliche Herausforderungen hinsichtlich der Schalung und der Frischbetonverdichtung durch den Druckprozess hinweisen. So eignen sich die 20 mm starken Betonkörper, die durch 3D-Druck entstehen, nicht, um dem üblichen Frischbetondruck standzuhalten. Die Schalung aus Stahl wurde etwa für einen Frischbetondruck von bis zu 80 kN/m² konzipiert. Für die Schalungen aus Beton sind demnach zusätzliche Außenschalungen für die Abtragung der anfallenden Lasten erforderlich. Aufgrund der bereits vorhandenen Sichtfläche erfordert die Montage einer solchen Außenschalung aus Stahl oder Holz äußerste Präzision und Sorgfalt in der Ausführung.¹⁵⁰ Alternativ muss die Steiggeschwindigkeit entsprechend Abbildung 5.3 an den maximalen Frischbetondruck angepasst werden, wodurch die Herstellungszeit zunimmt.

Ein weiterer Aspekt, der die Bauzeit beeinflusst, ist die Verdichtungsproblematik. Es ist riskant, den Frischbeton in der gedruckten Schalung durch Innen- oder Außenrüttler zu verdichten. So können die starken Vibrationen zu Rissen in der Betonform führen. Daher wurde in vergleichbaren Projekten selbstverdichtender Beton (SCC) eingesetzt, um auf die Verdichtung verzichten zu können. Allerdings führt der Einsatz von SCC aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit zu einem deutlich höheren Frischbetondruck. Um diesen möglichst gering zu halten, kann die Form in Abschnitten von bis zu 50 cm betoniert werden. Dies führt zu einem längeren Betonierungszeitraum sowie zu erheblichen wirtschaftlichen und logistischen Herausforderungen. Die Notwendigkeit zusätzlicher Schalungen und der Einsatz von SCC bedeuten, dass der Bauzeitplan sorgfältig überdacht und geplant werden muss, um den 3D-Betondruck erfolgreich zu integrieren.

Die Diskussion mit Fachleuten verdeutlicht, dass der 3D-Betondruck nicht nur innovative Möglichkeiten bietet, sondern spezifische Herausforderungen mit sich bringt. Eine präzise Planung und Abstimmung der Bauprozesse sowie gesammelte Erfahrungswerte sind unerlässlich, um die negativen Auswirkungen auf die Bauzeit zu minimieren und die Vorteile dieser Technologie optimal zu nutzen. Die beschleunigte Herstellung von Schalungen durch den Beton-3D-Druck

¹⁵⁰Experteninterview

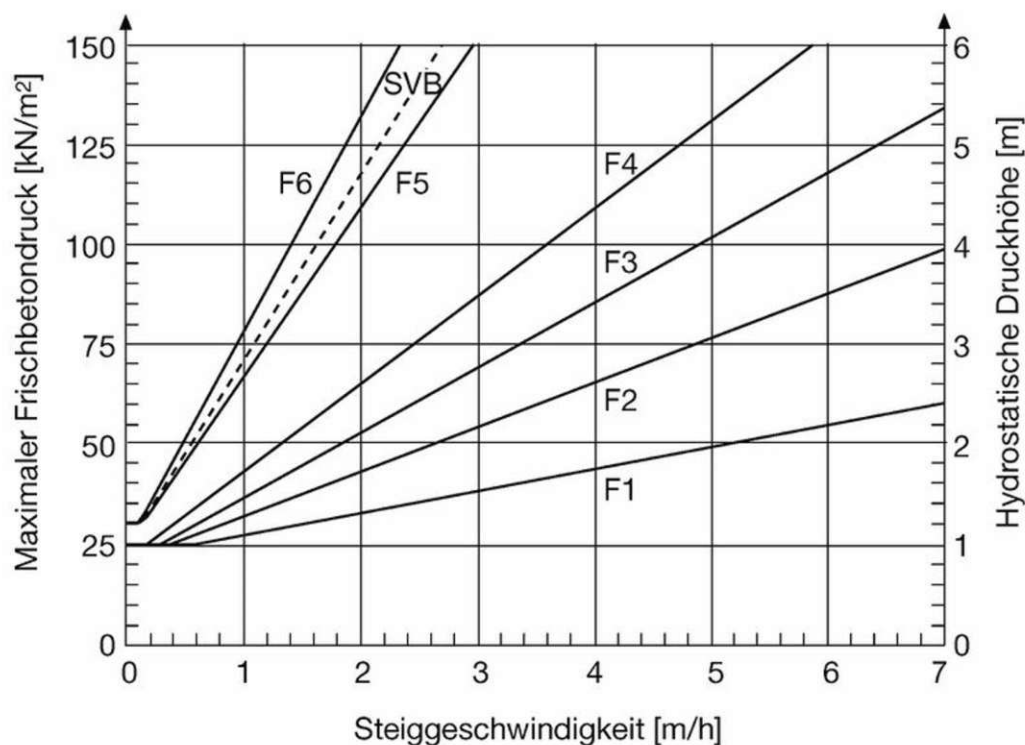


Abb. 5.3: Frischbetondruck in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit und der Konsistenzklasse bei einem Erstarrungsende von sieben Stunden nach DIN 18218 (Quelle: Weber [95])

im Vergleich zur Stahlschalung ist das Ergebnis der digitalen Planung, des automatisierten Fertigungsprozesses, des schnellen Druckprozesses und des geringeren manuellen Aufwands. Diese Faktoren tragen dazu bei, die Lieferzeiten zu verkürzen und somit den Baufortschritt zu beschleunigen.

Die vorliegende Analyse untersucht baubetriebliche Faktoren im Kontext der Herstellungsdauer von 3D-gedruckten Schalungen. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf einem Angebotsvergleich mit der Voxeljet AG, die das Binder Jetting-Verfahren für wiederverwendbare Schalungen einsetzt. Die Lieferzeiten dieser Schalungen korrelieren dabei direkt mit den Verkaufspreisen. Ein Beispiel verdeutlicht diesen Zusammenhang: Für eine Lieferzeit von 15 Arbeitstagen werden 5 Euro pro Liter berechnet. Bei einer längeren Lieferzeit von 25 Arbeitstagen reduziert sich der Preis pro Liter auf 3 Euro. Ein um 10 Arbeitstage längerer Liefertermin führt damit zu einem Preisunterschied von 66 %.¹⁵¹

Das Beispiel zeigt, dass kürzere Lieferzeiten mit höheren Kosten einhergehen. Diese Kosten-Nutzen-Relation verdeutlicht die direkte Verbindung zwischen Zeitersparnis und finanziellen Aufwendungen. Bauunternehmen und Bauherren sollten daher bei der Herstellung von maßgeschneiderten Schalungen nicht nur die Kosten, sondern die Herstellungsdauer in ihre wirtschaftlichen Überlegungen einbeziehen. Für Bauunternehmen bedeutet die Analyse, dass die Auswahl zwischen kürzeren Lieferzeiten und damit verbundenen höheren Kosten oder längeren Lieferzeiten mit reduzierten Kosten eine strategische Entscheidung ist. Während kürzere Lieferzeiten den Bauprozess beschleunigen, müssen die höheren Kosten in Relation zu den Gesamtkosten des

¹⁵¹Experteninterview

Bauprojekts betrachtet werden. Die wirtschaftliche Betrachtung verdeutlicht, dass die Herstellungsdauer von 3D-gedruckten und konventionell hergestellten Schalungen einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten eines Bauprojekts haben kann.

5.2 Geometrische Freiheit und Oberflächenqualität

Beton hat sich nicht nur als funktionaler Baustoff, sondern als vielseitiges Stilmittel etabliert, was im Verlauf seiner Erfolgsgeschichte deutlich wurde. Insbesondere seit dem Brutalismus der 1950er-Jahre hat unverputzter und unverblenderter Beton seinen Platz als weit verbreitetes Architekturkonzept gefunden. Der Begriff Brutalismus leitet sich vom französischen *béton brut* ab, einem von Le Corbusier verwendeten Begriff, mit dem er sichtbar belassenen, rohen Beton beschreibt: Sichtbeton.¹⁵²

Dieser Sichtbeton präsentiert sich heute in vielfältigen Ausprägungen. Seine Oberflächen können durch Bearbeitung des Frischbetons nach dem Aushärten gestaltet werden, sei es durch steinmetzmäßige Bearbeitung, Fräsen, Säuern, Waschen oder Färben. Diese Vielfalt ermöglicht es, Betonoberflächen an die gestalterischen Bedürfnisse und ästhetischen Vorstellungen in unterschiedlichen Baukontexten anzupassen. Die Herstellungstechniken für Struktur- und Texturbetonoberflächen sind äußerst vielfältig. In der konventionellen Betonbauweise mit Schalung ist ihnen doch gemeinsam, dass sie ursprünglich geschaltete Flächen sind, wodurch ihr Aussehen mehr oder weniger stark von der Schalungshaut beeinflusst wird.

2004 hat der Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein (DBV) in seinem technischen Merkblatt für Architekturbeton erstmals eine Klassifizierung für Sichtbetonoberflächen definiert und die zugehörigen technischen und gestalterischen Anforderungen festgelegt.¹⁵³ Die Einführung der Klassifizierung und Nomenklatur erleichterte die Kommunikation zwischen Auftraggebern, Architekten, Planern und Bauausführenden, indem sie einheitliche Bewertungs- und Qualitätsmaßstäbe für Sichtbetonoberflächen schuf. Dabei wurden die Qualitätskriterien vor allem für den traditionellen Schalungsbeton festgelegt. Die Klassen beschreiben und regulieren demnach verschiedene Aspekte, darunter Textur, Porigkeit, Farbtongleichmäßigkeit, Ebenheit, Arbeitsfugen, Schalungsfugen und Schalungsklassen. Die vier Sichtbetonklassen lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen:

- | | |
|------------|--|
| SB1 | Betonflächen ohne oder mit minimalen gestalterischen Anforderungen, typischerweise in Kellern oder vorwiegend gewerblich genutzten (Lager-)Räumen. |
| SB2 | Betonflächen mit moderaten gestalterischen Anforderungen, wie in Treppenhäusern und Nebenräumen. |
| SB3 | Betonflächen mit hohen gestalterischen Ansprüchen, hauptsächlich für den Außenbereich, wie Fassaden an Hochhäusern. |
| SB4 | Betonflächen mit außergewöhnlicher gestalterischer Bedeutung, zum Beispiel repräsentative Bauteile in Hochhäusern. |

Aufgrund ihrer Anwendbarkeit und weiten Verbreitung bei Schalungsbeton hat sich diese Klassifizierung als Standard für Sichtbeton etabliert. Sie gilt heute als allgemein anerkannter Qualitätsmaßstab für die Definition und Bewertung von Betonfertigteiloberflächen.¹⁹ Bei der Gegenüberstellung der Qualität des fertigen Betonkörpers werden die äußeren Eigenschaften betrachtet. Da in allen drei Vergleichsfällen eine Schalung bzw. eine verlorene Schalung hergestellt

¹⁵²Vgl. [32] Hackelsberger, S. 45

¹⁵³Vgl. [77] Schulz, S. 211

wurde, unterscheiden sich die internen Eigenschaften der Bewehrung und des Ortbetons nicht voneinander. Die zusätzliche Betonüberdeckung wirkt sich zumindest positiv in Bezug auf Karbonatisierung und Brandwiderstand positiv aus.¹⁵⁴

Die Beurteilung der Sichtbetonqualität erfolgt anhand festgelegter Standards oder Normen, die die verschiedenen Aspekte der Betonoberfläche definieren und bewerten. Diese Standards können je nach Region und Anwendungsgebiet variieren. In Zusammenhang mit Sichtbeton werden in den allermeisten Fällen glatte Stahlbetonwände angestrebt. Aufgrund der ebenen Beschaffenheit sind kleinste Mängel erkennbar, weshalb die Herstellung solcher Oberflächen besonderes Fachwissen im Betoneinbau erfordert. Um die Oberflächen weniger anfällig für Ungenauigkeiten zu machen, werden die Oberflächen oft nachbehandelt, wobei diese Nachbehandlung vom sogenannten Betonkosmetiker vorgenommen wird.¹⁵⁵

Die Betonoberfläche ist bei konventionellen Herstellungsmethoden das Spiegelbild seiner Schalung. Ist ein Bauteil als Sichtbeton geplant, sind bei konventionellen Schalungsmethoden stets Mehrkosten zu berücksichtigen. Schließlich muss neben der makellosen Schalhaut die Abstimmung der Zuschlagstoffe berücksichtigt werden. Eine gleichmäßige Farbgebung über die gesamte Fläche ist wünschenswert. Dies gilt für die in dieser Studie untersuchte 6,67 m hohe Referenzsäule, die in einem Betontagevorgang betoniert wurde. Für die glatte Oberflächenbeschaffenheit wurde der Beton mit Innen- und Außenrüttlern verdichtet. Aufgrund der sich verjüngenden Form bestand die Gefahr, dass sich aufsteigende Luftblasen an der Innenseite der überhängenden Schalung festsetzen. Durch die Montage von Außenrüttlern an diesen Stellen wurde dieser Gefahr entgegengewirkt.

Die geometrische Form konnte bei der Stahlbetonsäule durch die Verwendung der Stahlschalung nicht so umgesetzt werden, wie von der Projektplanung vorgegeben. Aufgrund der zweifach gekrümmten Form musste die Säule anstelle eines runden Querschnitts als Vieleck realisiert werden. Es zeichnet sich die Kante zwischen einem und dem nächsten Blech auf der Betonoberfläche ab. So zeigt sich schon am Beispiel der Säule, dass Spezialschalungen aus Stahl lediglich eine eingeschränkte Formfreiheit zulassen. Eine vergleichbare Gebäudeform aus Beton sind Faulbehälter für Kläranlagen, die Beispiele für doppelt gekrümmte Flächen darstellen. Die Schalungshaut folgt hier nicht exakt der Krümmung, sondern wird polygonal zusammengesetzt. Diese polygonale Herstellung erfordert die Zustimmung des Bauherrn, da die exakte Krümmung nicht erreicht wird. Allerdings gilt die Vereinfachung der Form als kostengünstigere Lösung, da das Schalen der tatsächlichen Krümmung einen erheblichen Aufwand darstellen würde. Die Versuche der additiven Fertigung haben demgegenüber gezeigt, dass die herausfordernde Form keinen Einfluss auf die Herstellungskosten oder gar die Machbarkeit hat.

Innovationen müssen zunächst den bestehenden Erwartungen und Standards entsprechen, um auf dem Markt akzeptiert zu werden. Das gilt für die schalungsfrei hergestellten Bauteile im 3D-Betondruck, die sich an den Industriestandards der Sichtbeton- und Schalhautklassen messen lassen müssen. Daher investieren Unternehmen erhebliche Zeit und Mühe in die Feinabstimmung und Optimierung der Oberfläche der fertigen Bauteile. So wird eine gleichmäßige Optik etwa durch den Einsatz von Kellen am Druckkopf oder eine robotergestützte Nachbearbeitung erzielt.¹⁵⁶

Die Sichtbetonoberfläche, die mit 3D-gedruckten Schalungen entsteht, wird bereits vom Druckverfahren selbst bestimmt. Die Einflussfaktoren für die Oberflächenbeschaffenheit von 3D-gedruckten Bauteilen aus Beton sind wesentlich geringer als jene von Ortbeton. Wichtige Einflussfaktoren wie die Schalhaut spielen hier keine Rolle. Aufgrund der automatisierten Herstellung bietet der 3D-Druck die Möglichkeit der identischen Reproduzierbarkeit eines Betonbauteils.

¹⁵⁴Vgl. [77] Schulz, S. 123

¹⁵⁵Experteninterview

¹⁵⁶Vgl. [48] Krause, S. 56

3D-gedruckte Oberflächen können je nach Anforderung glatt verputzt oder versiegelt werden. Dabei ist der Verbrauch des Putzmaterials bei der Säule nach dem 3DCP-Verfahren wesentlich höher als bei der Säule nach dem SPI-Verfahren. Aufgrund der Bedeutung der Oberflächenqualität wurden die rohen Betonoberflächen im Rahmen der vorliegenden Arbeit bewertet. Die Oberflächenbeschaffenheit der gedruckten Schalung nach dem 3DCP-Verfahren wird in Abbildung 5.4 (A+B) dargestellt. Im Gegensatz zum Bauteil aus dem SPI-Verfahren ist das 3DCP-Herstellungsverfahren für den Betrachter direkt erkennbar. Gerade bei der Herstellung von Einrichtungsgegenständen machen die gemusterten Oberflächen nicht den Eindruck eines Gegenstands aus Beton.



Abb. 5.4: Oberflächenstruktur - 3DCP (A+B), SPI (C), Schalung aus Stahl (D) (Quelle: Eigene Aufnahmen)

Die Herstellung von verlorenen Schalungen nach dem 3DCP-Verfahren eröffnet kostengünstige Wege für die Schaffung zahlreicher neuer und innovativer Oberflächen. Es besteht die Chance, die Potenziale dieser neuen Technologie zu erkunden und kreativ zu nutzen. Der 3D-Druck ermöglicht eine hohe Gestaltungsfreiheit, besonders für Architekten. Komplexe Entwürfe, die mit herkömmlichen Methoden zu aufwendig oder teuer wären, werden durch den 3D-Betondruck realisierbar.

Das Ergebnis der Oberflächenveränderung wird in Abbildung 5.4 veranschaulicht. So zeigt Abbildung 5.4 (B) die Oberfläche der Säule im klassischen Spiralslicer, während Abbildung 5.4 (A) die wesentlich komplexere Oberflächenbeschaffenheit zeigt. Der Bewegungspfad des Druckkopfs wurde hier in Abhängigkeit mehrerer Parameter wie beispielsweise des Radius gewählt. Beim betrachten der gesamte Säule, entsteht dadurch eine interessante Oberflächenstruktur ohne Beeinflussung der Herstellungskosten. Dabei wird die machbare Bauteilgeometrie durch den Bauraum und die Stabilität des Bauteils selbst bestimmt. Eine vergleichbare Oberfläche mit konventionellen Schalungsmethoden wird beispielsweise durch den Einsatz von Strukturmatrizen erreicht. Diese werden in die Schalung eingelegt und zeichnen sich im Beton als Formen und Profile ab.

Die Oberflächenbeschaffenheit der nach dem SPI-Verfahren hergestellten Säule wird in Abbildung 5.4 (C) dargestellt. An der Oberfläche sind deutlich die einzelnen bis zu 1,5 mm breiten Quarzsandkörner zu sehen, die im Zementleim gebunden wurden. Bei genauem Hinsehen sind zudem Stellen zu erkennen, an denen der Zementleim nach außen stehende Tropfen gebildet hat. Dies passiert, wenn die Rheologie des Zementleims oder die Packungsdichte des Sands nicht den optimalen Werten entsprechen. Die unregelmäßige Sandoberfläche verzeiht im Vergleich zu glattem Sichtbeton kleinere Oberflächenfehler und Unregelmäßigkeiten. Beim betrachten der gedruckte Säule im richtigen Licht, sind die einzelnen Schichten des Herstellungsverfahrens zu erkennen, wobei das optische Erscheinungsbild der Oberfläche an Waschbeton erinnert. Für

die Herstellung einer Waschbetonoberfläche bei konventionellen Schalungsmethoden wird ein Verzögerer auf die Schalhaut aufgetragen. Nach dem Ausschalen wird der nicht vollständig hydratisierte Zementleim abgewaschen, wodurch die verschiedenen Gesteinskörnungen zum Vorschein kommen.¹⁵⁷ Was die gestalterische Formfreiheit betrifft, so können mit Hilfe des SPI-Verfahrens nahezu beliebige Formen erzeugt werden, die genau den auf Papier entworfenen Ideen entsprechen. Dies fördert Innovation und Kreativität im Baubereich erheblich. Selbst im Vergleich zum 3DCP-Verfahren erschließt sich mit diesem Verfahren eine weitere Dimension der Formfreiheit.

Die Gegenüberstellung der nach den unterschiedlichen Herstellungsverfahren hergestellten Bauteile zeigt, dass im Bereich der Oberflächenstandards die glatte Sichtbetonoberfläche, die heutzutage als maximales Qualitätsmerkmal gilt, mit den additiven Verfahren nicht realisierbar ist. Im Bereich der freien Formgebung ist das selektiv bindende Verfahren von Progress 3D Innovation derzeit unübertroffen. Die Möglichkeiten, die sich mit diesem Verfahren eröffnen, zeigt das in Abbildung 5.5 dargestellte Referenzbauteil aus dem Ausstellungsraum von Progress 3D Innovation, eine integrale Doppelwand, die in einem Stück gedruckt wurde. Auf der rechten Abbildung der Innenwand ist die Öffnung für eine Installationsleitung zu sehen, die zwischen die beiden Wandschalen führt. Abbildung 5.5 (mitte) zeigt die Verbindungsstreben der Wandschalen. Bei genauem Hinsehen sind die einzelnen Schichten des Druckverfahrens zu erkennen. Abbildung 5.5 (rechts) zeigt die Außenfassade, die teilweise glattgeschliffen wurde.



Abb. 5.5: Referenzbauteil Progress 3D Innovation - Integrale Doppelwand mit Außenfassade und Leitungskanal (Quelle: Eigene Aufnahmen)

Als Alternative zu den vorgestellten Schalungsvarianten der Stahlbetonsäule könnte zum Erreichen der in der Projektplanung definierten Vorgaben eine Schalung nach dem Binder Jetting-Verfahren in Frage kommen. Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung einer glatten Betonoberfläche, die höchsten Anforderungen entspricht, und ist zudem imstande, die geometrischen Vorgaben der Planung zu erfüllen. Ähnlich wie beim SPI-Verfahren wird dabei die Schalhaut

¹⁵⁷Vgl. [35] Hanses, S. 44

mit einer Stärke von ca. 21 mm gedruckt. Die so entstehende Schalung ist wiederverwendbar. Der Sand wird nicht mit Zement, sondern mit kalthärtendem Furanharz gebunden. Die Standardschichthöhe beträgt 300 μm und wird nach dem Druck tiefeninfiltiert. Die kraftabtragende Schalungsstruktur würde in diesem Fall, wie bei den verlorenen Betonschalungen, konventionell hergestellt, um Kosten zu sparen.¹⁵⁸

5.3 Nachhaltigkeit

In diesem Kapitel wird die Materialeffizienz im Kontext der additiven Fertigung und deren ökologische Bewertung untersucht. Die Ökobilanzierung ist ein quantitatives Bewertungsverfahren, das die Stoff- und Energieflüsse von Bauprodukten, -systemen oder -prozessen bilanziert. Diese Analyse kann je nach Fragestellung für das Werk, für einzelne Lebensabschnitte oder über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts durchgeführt werden. Die internationalen Standards zur Erstellung von Ökobilanzen sind in ISO 14040 und ISO 14044 festgelegt.¹⁵⁹

Abbildung 5.6 stellt jeweils 1 m^2 der zu vergleichenden Schalungsvarianten dar. Für die nachfolgende Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis, LCA) werden die eingesetzten Materialien analysiert, die für die additive bzw. konventionelle Fertigung eingesetzt wurden. Bei der wiederverwendbaren Schalung gehören dazu die abgebildeten Stahlrippen. Die in Tabelle 5.1 dargestellten Ökoindikatoren der verwendeten Produkte wurden der BauBook-Datenbank entnommen.¹⁶⁰ BauBook ist eine Webplattform und liefert validierte Baustoffdaten für die Berechnung von Energie- und Ökologiekennzahlen. Die vordefinierten Kennwerte aus der Plattform wurden für die verwendeten Materialien unter Berücksichtigung der Materialzusammensetzung und Massendichte ausgewählt.

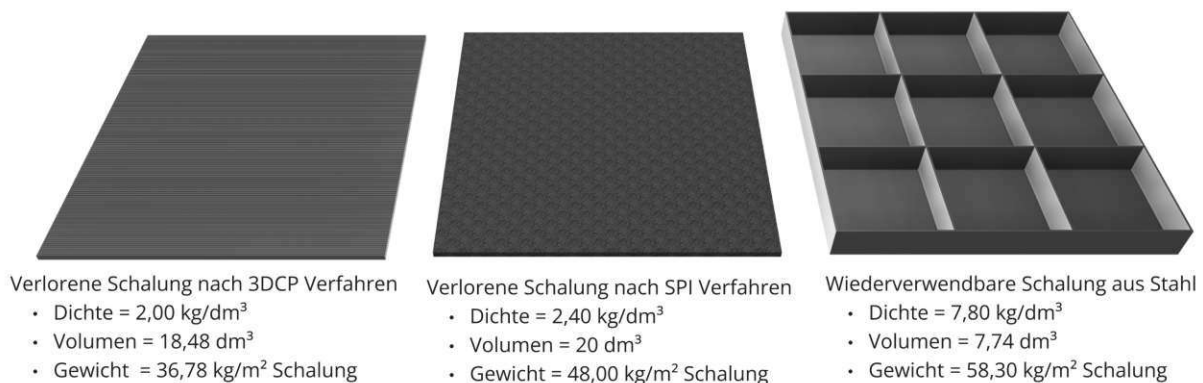


Abb. 5.6: Masse pro Quadratmeter der drei unterschiedlichen Schalungsvarianten (Quelle: Eigene Darstellung)

Die verlorene Schalung nach dem 3DCP-Verfahren weist eine gemessene Dichte von 2000 kg/m^3 auf. Als Referenzmaterial für das Druckmaterial von Baumit wurde das Material "Zement- und Zementfließestrich" mit der gleichen Dichte von 2000 kg/m^3 herangezogen. Die zugehörigen Ökoindikatoren sind in Tabelle 5.1 abgebildet. Die verlorene Schalung nach dem SPI-Verfahren weist eine Massendichte von 2400 kg/m^3 auf. Entsprechend diesem Wert wurden die Ökoindikatoren für Normalbeton herangezogen, der dieselbe Massendichte aufweist. Die Indikatoren für

¹⁵⁸Experteninterview

¹⁵⁹Vgl. [86] Umweltbundesamt

¹⁶⁰Vgl. [7] BauBook

die wiederverwendbare Schalung aus Stahl beziehen sich auf Stahl der Festigkeitsklasse S235, der im konkreten Projekt verwendet wurde. Die Werte in Tabelle 5.1 zeigen deutlich höhere Ökoindikatoren des Stahls relativ zu den zementgebundenen Baustoffen. Im Vergleich zum Normalbeton sind die Werte des Zementestrichs deutlich höher, was auf den höheren Zementgehalt zurückzuführen ist. Die Zementherstellung weist einen hohen Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß auf. Angaben von Beyond Zero Emissions zufolge ist die Zementindustrie für 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich.¹⁶¹

Tab. 5.1: Ausgangsdaten für Öko-Indikatoren aus der Webplattform BauBook (Datenquelle: BauBook [7])

IBO Materialbezeichnung	GWP	AP	PEI
	[kg CO ₂ equ./kg]	[kg SO ₄ /kg]	[MJ/kg]
Stahl S235	1,710	0,00674	24
Normalbeton	0,092	0,000181	0,691
Zementestrich	0,151	0,000315	1,34

Als erster Indikator wird in Abbildung 5.7 das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) für 1 m² Referenzfläche der Schalungsvarianten gegenübergestellt. GWP ist eine Kennzahl, die die Fähigkeit eines Gases, Wärme in der Atmosphäre zu speichern, im Vergleich zu Kohlendioxid (CO₂) darstellt. Sie wird verwendet, um den Beitrag verschiedener Treibhausgase zum Klimawandel zu bewerten. Die GWP-Werte basieren auf einem bestimmten Zeitrahmen, in der Regel 20, 100 oder 500 Jahre, wobei der GWP-Wert für CO₂ standardmäßig als 1 festgelegt wird. Andere Gase werden entsprechend bewertet. Ein GWP von 25 für ein bestimmtes Gas bedeutet, dass dieses Gas über einen bestimmten Zeitraum 25-mal so wirkungsvoll in der Erwärmung der Erdatmosphäre ist wie CO₂.¹⁶² Die Verwendung des GWP ermöglicht es, die unterschiedlichen Auswirkungen verschiedener Treibhausgase zu vergleichen und sie in sogenannten CO₂-Äquivalenten auszudrücken. Dies erleichtert die Analyse von Treibhausgasemissionen und die Entwicklung von Strategien zur Reduzierung des Klimaeinflusses verschiedener Substanzen.

Die wiederverwendbare Schalung aus Stahl weist ein 20-mal höheres Treibhauspotenzial auf als die zementgebundenen Lösungen. Es entspricht demnach dem Treibhauspotenzial von 20 additiv gefertigten Schalungen in Zement. Aus ökologischer Sicht ist die Stahlschalung also erst bei mehr als 20 Einsätzen den additiv gefertigten Schalungen zu bevorzugen. Ein identischer Trend zeigt sich im Verhältnis von Versauerungspotenzial (Acid Potential, AP) und nicht erneuerbarem Primärenergiegehalt (PEI ne).

Besser schneidet die Stahlschalung in Bezug auf die Ressourcennutzung ab. Während der Stahl der Spezialschalung nach der Herstellung wieder durch Recycling in den Stoffkreislauf zurückgeführt wird, verbleiben die verlorenen Schalungen bis zum Rückbau an das Bauteil gebunden. Die dafür aufgewendeten Rohstoffe werden dem Stoffkreislauf entzogen und müssen durch neue Primärrohstoffe ersetzt werden. Solange die gedruckte Betonhülle dem Bauteil nicht funktional angerechnet werden kann, werden durch die Verwendung einer verlorenen Schalung mehr Rohstoffe gebunden als eigentlich erforderlich. Das Diagramm in Abbildung 5.7 zeigt die Entsorgungslast der verwendeten Rohstoffe beim Erreichen der Lebensdauer. Während die Schalung aus Stahl zu 100 % recycelt werden kann (Verwertungspotential 1), liegt das Verwertungspotential für

¹⁶¹Vgl. [53] Lord, S. 77

¹⁶²Vgl. [85] Umweltbundesamt

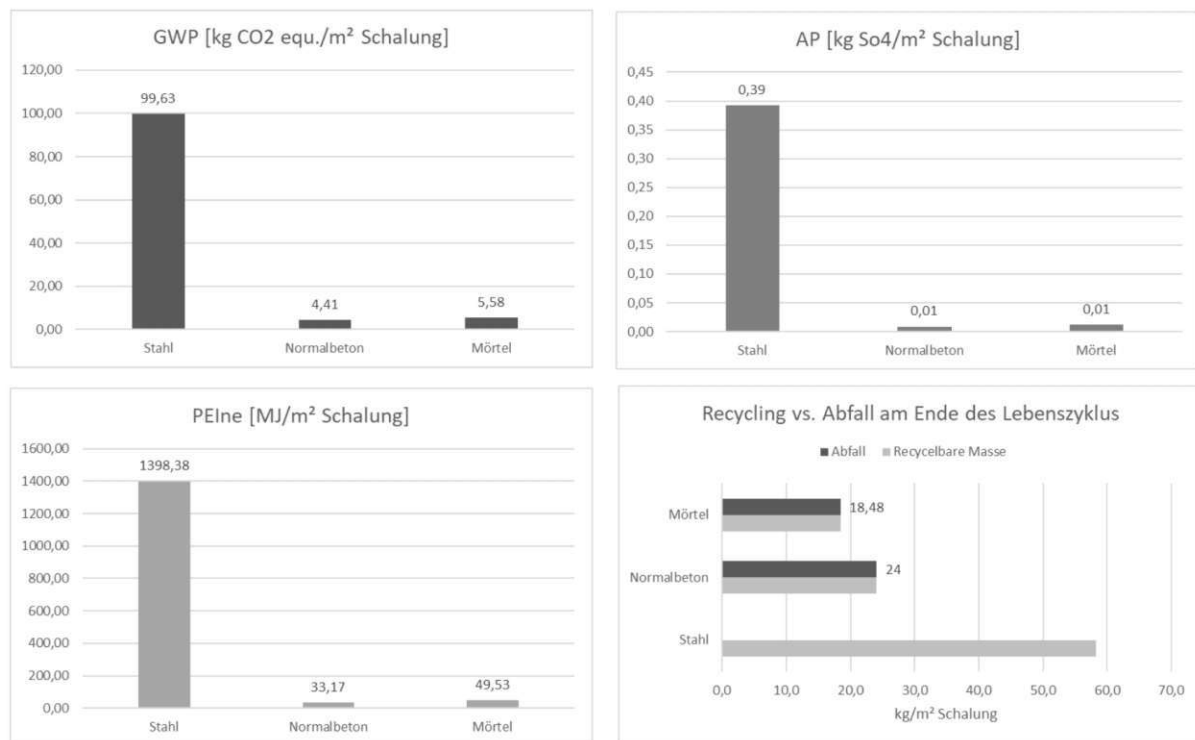


Abb. 5.7: Ökobilanz der unterschiedlichen Schalungsvarianten pro 1 m² Schalung

Normalbeton nach BauBook bei maximal 2.¹⁶³ Somit fallen schätzungsweise 50 % des gedruckten Materials beim Rückbau als Deponieabfall an.

Die Experteninterviews haben ergeben, dass es Bedenken bezüglich der Lebensdauer der 3D-gedruckten Schalung für den Außenbereich gibt. Für vergleichbare Mörtel- und Estrichzeugnisse wird eine maximale Lebensdauer von 50 Jahren angegeben.¹⁶⁴ Aufgrund fehlender Langzeiterfahrungen können speziell für das verwendete Druckmaterial keine genauen Angaben gemacht werden. Auf der Grundlage der Daten ist jedoch anzunehmen, dass die gedruckte Hülle nicht die theoretische Lebensdauer der Stahlbetonsäule von 100 Jahren erreicht.¹⁶⁴ Die Untersuchung zur Langzeitbeständigkeit von 3D-gedruckten Betonstrukturen zeigt, dass diese unter bestimmten klimatischen Bedingungen erhebliche Schwächen aufweisen. Bei der Installation in Riom, einer Region mit rauem alpinen Klima, traten beispielsweise sichtbare Anzeichen von Abnutzung an den gedruckten Betonelementen auf. Diese Probleme wurden durch die Einwirkung von Frost-Tau-Zyklen verstärkt, die die Porosität des gedruckten Betons beeinflussten und zu sichtbaren Rissen führten.¹⁶⁵ Abbildung 5.8 zeigt die Dokumentation der aufgetretenen Mängel in Riom nach zehn Monaten.

Somit wären aufgrund der verlorenen Schalung vorzeitige Sanierungsarbeiten notwendig, bei denen die verlorene Schalung aus dem 3D-Drucker als Deponieabfall anfällt. Die Gespräche mit Anwendern des Beton-3D-Druckers haben Probleme mit der Dauerhaftigkeit des gedruckten Materials bei direkten Witterungseinflüssen bestätigt. Durch Oberflächenversiegelung oder Betonimprägnierung kann die Lebensdauer des 3D-gedruckten Materials verbessert werden. Bei der verlorenen Schalung nach dem SPI-Verfahren besteht das Problem einer vorzeitigen

¹⁶³Vgl. [41] IBO, S. 13

¹⁶⁴Vgl. [41] IBO, S. 9

¹⁶⁵Vgl. [4] Anton et al., S. 12



Abb. 5.8: Rissbildung durch Frost-Tau-Zyklen an Säulenbasis, Säulenschaft und Säulenkapitell (Quelle: Anton et al. [4], S. 12)

Sanierung gemäß den Ökoindikatoren dagegen nicht. Entsprechend den Materialkennwerten und der Zusammensetzung wurde das Druckmaterial als Normalbeton eingestuft, der wie Stahlbeton eine theoretische Lebensdauer von 100 Jahren aufweist. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Einschätzungen allgemeiner Natur sind und stark von den spezifischen Druckmaterialien und Herstellungsprozessen abhängen.

Die Bauteilerzeugung mittels additiver Fertigungsverfahren bietet den grundlegenden Vorteil, Material nur dort zu platzieren, wo es aufgrund von Belastungen benötigt wird. Diese grundlegende Eigenschaft erlaubt es, Bauteile unter optimaler Materialausnutzung zu konstruieren.¹⁶⁶ Ein Beispiel hierfür wäre die Fertigung von Betonwänden, die exakt die für ihre statische Belastung erforderliche Dicke aufweisen. Gleichzeitig können durch die geometrische Anordnung von Hohlräumen im Wandquerschnitt lokal veränderliche Eigenschaften erzeugt werden. In Forschungsprojekten zu sogenannten Gradientenbetonen wird untersucht, wie Materialeigenschaften innerhalb des Bauteils je nach lokalen Anforderungen theoretisch stufenlos verändert werden können.¹⁶⁷ Die geometrische Differenzierung im Inneren des Bauteils eröffnet zudem die Möglichkeit, Haustechnik direkt zu integrieren. Diese Integration kann nicht nur die ästhetischen Aspekte verbessern, sondern die Energieeffizienz der Gebäude erhöhen.¹⁶⁶ Im Gegensatz dazu sind konventionelle Betonarbeiten entsorgungsintensiver. Bei der Verwendung von Systemschalungen verbessert sich die Bilanz aufgrund der häufigen Anwendungen deutlich. Ein Ansatzpunkt für Materialeffizienz ist die Wiederverwendbarkeit.¹⁶⁸ Beispielsweise ist die Verwendung wiederverwendbarer Schalungen ein effizientes Verfahren, da es die Menge des benötigten Materialinputs reduziert und somit Ressourcen schont.

5.4 Wirtschaftliche Aspekte

Im Rahmen der baubetrieblichen Faktoren ist eine umfassende wirtschaftliche Analyse der Schalungstechnologien von entscheidender Bedeutung. Dieses Kapitel widmet sich der wirtschaftlichen Gegenüberstellung von Stahlschalungen, Schalungen nach dem 3DCP-Verfahren und dem SPI-Verfahren. Insbesondere wird die Rentabilität dieser Schalungsoptionen in Abhängigkeit von der Stückzahl betrachtet.

Die Verwendung von Stahlschalungen, die wiederverwendbar sind, geht mit höheren Anfangsinvestitionen einher. Für die in dieser Arbeit untersuchten Säulenschalung liegt der Verkaufspreis bei 15.000 Euro¹⁶⁹. Aufgrund der Wiederverwendbarkeit können diese Kosten auf mehrere Bau-

¹⁶⁶Vgl. [31] Grassers, S. 19

¹⁶⁷Vgl. [48] Krause, S. 36

¹⁶⁸Vgl. [11] Biebeler S. 14

¹⁶⁹Experteninterview

teile verteilt werden, um die Rentabilität zu steigern. Diese steigt linear mit der Anzahl der wiederverwendeten Schalungen. Im konkreten Bauprojekt der Bergstation Prà Rodont wurden mit derselben Schalung zwei Stahlbetonsäulen mit unterschiedlicher Höhe realisiert, was wegen der gleichbleibenden Krümmung der Säule möglich war. Die Anschaffungskosten der Schalung pro realisierte Säule betragen somit 7500 Euro und weichen nicht wesentlich vom angegebenen Verkaufspreis von Progress 3D Innovation ab, der für die Schalung der Säule im Originalmaßstab mit 7000 Euro¹⁷⁰ angegeben wurde. Abbildung 5.9 zeigt, dass die Stahlschalung im Vergleich zur SPI-Schalung ab drei Stück in der Anschaffung wirtschaftlicher ist.

Die Schalungen, die durch das 3DCP-Verfahren hergestellt werden, sind mit 5000 Euro¹⁷⁰ pro Stück im Vergleich zu Stahlschalungen kostengünstiger, allerdings als verlorene Schalungen anzusehen. Damit sinkt die Rentabilität relativ zur Stahlschalung, je mehr gleiche Bauteile mit letzterer hergestellt werden. Der Break-even-Punkt mit der Stahlschalung ist hier bei einer Herstellung von drei Bauteilen mit derselben Schalung erreicht. Im konkreten Projekt mit zwei Säulen wäre eine Schalung nach dem 3DCP-Verfahren in der Anschaffung kostengünstiger gewesen als die gewählte Stahlschalung.

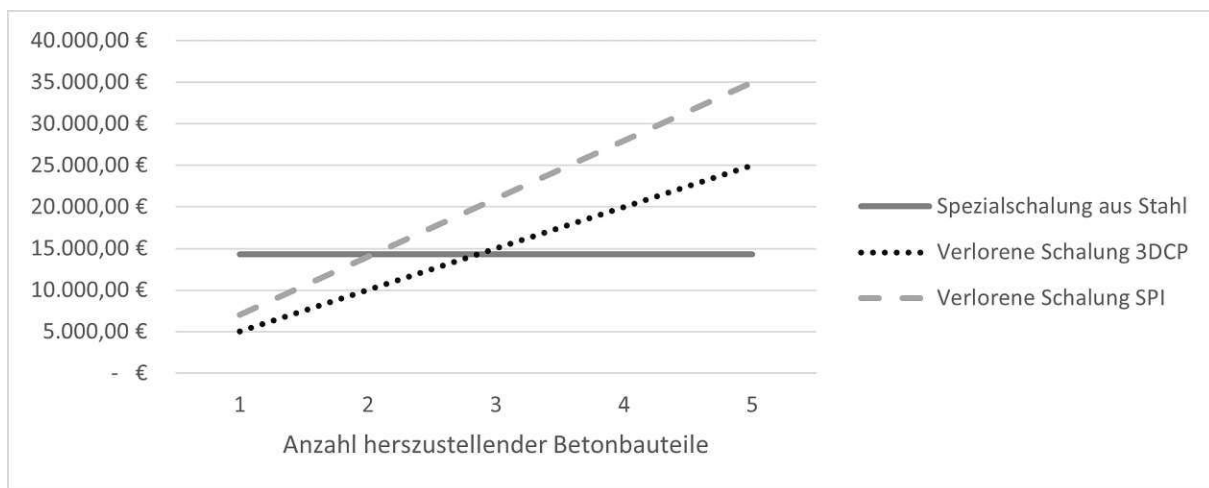


Abb. 5.9: Kostenentwicklung nach Stückzahl gleicher Betonbauteile

Einen zentralen Einfluss auf die Kosten hat die Lieferzeit. Eine kürzere Lieferzeit, wie sie beispielsweise bei Voxeljet gegen Aufpreis angeboten wird, erhöht die Kosten erheblich. Zudem beeinflusst die Stückzahl maßgeblich die Rentabilität. Schließlich werden die Fixkosten für die Einrichtung und Produktion bei einer höheren Stückzahl auf eine größere Anzahl von Bauteilen verteilt, was die Kosten pro Bauteil senkt. Der über Email angefragte Richtpreis für eine wiederverwendbare Schalung nach dem Binder Jetting-Verfahren belief sich bei der Voxeljet auf 50.000 Euro.¹⁷⁰ Wie bei den verlorenen Schalungen handelt es sich hierbei lediglich um ein Offset von 21 mm des fertigen Betonbauteils. Eine komplette Schalung nach dem Binder Jetting-Verfahren wäre wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. Die äußere Schalung würde von einem Schalungshersteller oder dem Bauunternehmen selbst konstruiert.

Ein ausschlaggebender Grund für die die Anschaffung einer im Vergleich kostenintensiven Gussform kann die hohe Oberflächenqualität sein. Eine solche Schalung garantiert schließlich eine glatte Sichtbetonoberfläche, die den normativen Standards entspricht. Im Vergleich zur Schalung aus Stahl kann mit einer Form nach dem Binder Jetting-Verfahren zudem ein runder Querschnitt anstelle eines Vielecks realisiert werden. Die Rentabilität im Vergleich zur 3DCP-Form wäre

¹⁷⁰Experteninterview

allerdings erst bei der erforderlichen Realisierung von elf gleichen Bauteilen erreicht, jene im Vergleich zur SPI-Form bereits bei acht. Das SPI- und das Binder Jetting-Verfahren haben einen vergleichbaren Aufbau, was das Maschinensetup betrifft. Den Richtpreis von 1 m³ Bauraum gibt Progress 3D Innovation im geführten Experteninterview mit 1000 Euro an.¹⁷¹ Die Voxeljet AG, die mit einer wesentlich geringeren Auflösung von 300 µm arbeitet, gibt den Richtpreis mit 3000 Euro/m³ an.¹⁷¹ Dieser Vergleich zeigt die Auswirkungen einer höheren Auflösung auf die Herstellungskosten durch additive Verfahren. Je dünner die einzelnen Schichten, desto länger die Produktionsdauer. Am Ende ist es die erforderliche Stückzahl an gleichen Bauteilen sowie die erforderliche Oberflächenqualität, die die Mehrkosten bei der Anschaffung durchaus rechtfertigen können.

Die Erkenntnisse, die in der vorliegenden Diplomarbeit zu den Kosten gewonnen wurden, werden durch die Berechnungen im Paper **A Cost Model for Additive Manufacturing in Construction**¹⁷² zum Thema Kostenmodell im Beton-3D-Druck gestützt. Darin werden die Baukosten für den Beton-3D-Druck im Vergleich zur konventionellen Bauweise untersucht. Die Fallstudie zeigt, dass die Baukosten für den 3D-Druck von vertikalen Gebäudeteilen vor Ort auf der Baustelle 20 % über den Herstellungskosten in konventioneller Ortbetonbauweise liegen. Die Erhöhung der Baukosten durch den 3D-Druck kann durch Vorteile gerechtfertigt werden, die diese innovative Technologie bietet. Ein entscheidender liegt in der Überwindung der geometrischen Beschränkungen, die bei traditionellen Bauprozessen existieren. Der 3D-Druck ermöglicht die Realisierung von Bauwerken mit hoher geometrischer Komplexität, was zu architektonischer Vielfalt und kreativer Gestaltungsfreiheit führt. Werden die Vorteile der Formfreiheit von den Planern nicht ausgeschöpft, bleiben die wirtschaftlichen Einsparungen aus.

Ein weiterer bedeutender Vorteil ist die Automatisierung des Bauprozesses durch den 3D-Druck. Diese Automatisierung führt zu einer Effizienzsteigerung, da der Einsatz von Arbeitskraft und damit einhergehende Kosten minimiert werden und der Bauprozess präzise und reproduzierbar wird. Dies trägt nicht nur zur Zeitersparnis bei, sondern reduziert das Risiko von Fehlern im Bauprozess. Darüber hinaus führen ein reduzierter Ressourcenverbrauch und eine Minimierung von Materialverschwendung zu einem ökologisch nachhaltigeren Bauansatz. Diese Vorteile gewinnen an Relevanz, insbesondere vor dem Hintergrund der aktuellen Herausforderungen in der Bauindustrie.¹⁷³

Die wirtschaftliche Gegenüberstellung zeigt, dass die Entscheidung für eine bestimmte Herstellungsvariante einer Ortbetonschalung letztendlich von verschiedenen Faktoren abhängt. Während Stahlschalungen eine hohe Anfangsinvestition erfordern, bieten sie langfristig Rentabilität bei entsprechender Wiederverwendung. 3DCP-Schalungen sind dagegen kostengünstiger, solange die Stückzahl gering bleibt. Das SPI-Verfahren bietet schließlich einen Kompromiss zwischen den beiden. Allerdings beeinflusst die Entwicklung der Produktionsverfahren und Materialkosten die Wirtschaftlichkeit dieser Technologien stetig.

5.5 Systemgrenzen

Im 3D-Betondruck bestimmen die Größe des Druckers und das Volumen des Bauraums die maximalen Abmessungen der herstellbaren Bauteile. Im SPI-Verfahren beträgt das Bauraumvolumen 4 x 2,5 x 1 Meter. Diese Dimensionen setzen klare Grenzen für die Größe der in einem Druckvorgang herstellbaren Bauteile. Bei der Herstellung größerer Strukturen ist es erforderlich, die Bauteile in mehreren Segmenten zu drucken, die dann vor Ort auf der Baustelle miteinander

¹⁷¹Experteninterview

¹⁷²Vgl. [70] Re et al.

¹⁷³Vgl. [47] Kloft et al., S. 222

verbunden werden. Der Verbindungsprozess umfasst typischerweise das Verkleben oder mechanische Verbinden der Segmente, das Abdichten der Fugen und das Ausbetonieren der Schalung, um eine monolithische Struktur zu schaffen. Diese Vorgehensweise ähnelt der Handhabung von Halbfertigteilen im traditionellen Bauwesen.

Im 3DCP-Verfahren wird das Bauraumvolumen durch einen Druckradius von 4,5 m und eine maximale Druckhöhe von 2,55 m definiert. Diese Parameter legen einen zylindrischen Druckbereich fest, innerhalb dessen der Druckvorgang erfolgen kann. Bei diesem Verfahren müssen Bauteile, die die Abmessungen des Bauraums überschreiten, in Segmenten hergestellt werden. Diese Segmente werden anschließend auf der Baustelle verbunden, abgedichtet und ausbetoniert.

Die Druckbereiche der beiden Verfahren sind für die Stahlbetonsäule mit einer Höhe von 6,67 m ausreichend, da die Schalung ohne Unterteilungen ohnehin die zulässige Transporthöhe überschreiten würde.

Traditionelle Betonbauteile enthalten Stahlbewehrung, um Zugkräfte aufzunehmen. Die Anlagen, die für die untersuchten 3D-Druckverfahren verwendet wurden, bieten aktuell jedoch keine Möglichkeit zur Integration von Bewehrung. Aufgrund der geringen Zugfestigkeit und des spröden Versagensverhaltens von unbewehrtem Beton sind die Einsatzbereiche solcher gedruckten Bauteile ohne Bewehrung begrenzt. Dies schränkt insbesondere die Anwendung in tragenden Konstruktionen ein, in denen Zugkräfte eine wesentliche Rolle spielen.

Als aktuelle Lösung wird in einigen Projekten eine kommerzielle Bewehrung direkt in die 3D-gedruckte Schalung eingebaut. Nach dem Einlegen der Bewehrung wird das Bauteil mit Ort beton ausbetoniert, um die Anforderungen an Zug- und Druckfestigkeit zu erfüllen. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Vorteile des 3D-Betondrucks, wie flexible Formgebung, mit der notwendigen strukturellen Stabilität zu kombinieren, die durch die Bewehrung erreicht wird. Aufgrund der fehlenden Bewehrung kann eine tragende Konstruktion wie eine Stahlbetonsäule nicht als Vollfertigteile eingesetzt werden. Die Festigkeit und Transportierbarkeit der Säule als Vollfertigteile nach dem SPI-Verfahren sind jedoch gewährleistet.

Die DIN EN 1992 basiert auf der Annahme kontinuierlicher, monolithischer Strukturen, wie sie bei konventionellen Stahlbeton- und Spannbetontragwerken vorliegen. 3D-gedruckte Strukturen bestehen aus übereinander liegenden Schichten. Die Schichtgrenzen weisen anisotrope mechanische Eigenschaften auf, die durch Faktoren wie die Intervallzeit zwischen den Schichtaufträgen, die Höhe der Druckdüse und die Oberflächenfeuchtigkeit beeinflusst werden. Darüber hinaus fehlt bei 3D-gedrucktem Beton die Verdichtung. Diese Unterschiede führen zu einer reduzierten Dichte und Festigkeit, insbesondere an den Schichtgrenzen, die in der EN 1992 derzeit nicht berücksichtigt werden.¹⁷⁴

Die Wiederverwendbarkeit von 3D-gedruckter Schalung aus Beton stellt eine interessante Möglichkeit dar, die Vorteile des 3D-Drucks mit wiederverwendbarer Schalung zu kombinieren. Theoretisch wäre es möglich, eine 3D-gedruckte Betonschalung wiederzuverwenden, indem eine Trennschicht zwischen der Schalung und dem ausgegossenen Beton aufgetragen wird. Diese Trennschicht könnte verhindern, dass die Schalung dauerhaft am Beton haftet, sodass sie nach dem Aushärten des Betons entfernt und erneut verwendet werden könnte. In der Praxis gestaltet sich dies jedoch als problematisch, da Beton als Material schwer und spröde ist und beim Entfernen leicht beschädigt werden kann. Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung von Schalungen aus recycelbarem Material. Forscher der ETH Zürich druckten eine 3 bis 5 mm dicke Schalung für die Säulen des Eggshell Pavillon. Zur Reduzierung des Frischbetondrucks wurde die Schalung mit schnell abbindendem Beton ausgegossen. Diese Schalung kann für zukünftige Formen recycelt werden.¹⁷⁵

¹⁷⁴Vgl. [98] Wolfs et al.

¹⁷⁵Vgl. [14] Burger et al.

5.6 Vergleich der Forschungsergebnisse

Dieses Kapitel fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchung der unterschiedlichen Herstellungsverfahren für Stahlbetonsäulen zusammen. Die Methoden umfassen die konventionelle Fertigung mit einer Spezialschalung aus Stahl, das 3DCP-Verfahren und das SPI-Verfahren. Die Ergebnisse werden anhand von Herstellungsdauer, Kosten, Nachhaltigkeit und qualitativen Eigenschaften gegenübergestellt.

5.6.1 Herstellungsdauer

Die konventionelle Methode benötigt die längste Zeit, hauptsächlich aufgrund der aufwendigen Planung und Fertigung der Schalung. Das 3DCP-Verfahren ist am schnellsten, gefolgt vom SPI-Verfahren, bei dem die Herstellungsdauer von der Auslastung der Maschine abhängig ist (Tab. 5.2).

Tab. 5.2: Herstellungsdauer der unterschiedlichen Verfahren

Herstellungsverfahren	Herstellungsdauer (Tage)	Bemerkungen
Stahlschalung	14	Planung und Produktion der Schalungselemente
3D Concrete Printing (3DCP)	1,5	Vorbereitung, Druckprozess und Aushärtezeit
Selective Paste Intrusion (SPI)	2	Vorbereitung, Druckprozess und Entpacken

5.6.2 Kosten

Die konventionelle Stahlbetonschalung erfordert eine hohe Anfangsinvestition, die sich jedoch bei häufiger Wiederverwendung amortisiert. Das SPI-Verfahren bietet geringere Kosten pro Einheit, das daraus entstehende Produkt ist als verlorene Schalung für einmalige Anwendungen konzipiert. Das 3DCP-Verfahren stellt einen wirtschaftlichen Kompromiss dar (Tab. 5.3).

Tab. 5.3: Kosten der unterschiedlichen Verfahren

Herstellungsverfahren	Anschaffungskosten pro Einheit (€)	Bemerkungen
Stahlschalung	15.000	Hohe Anfangsinvestition, rentabel bei Wiederverwendung
3D Concrete Printing (3DCP)	5.000	Kostengünstiger, aber als verlorene Schalung nicht wiederverwendbar
Selective Paste Intrusion (SPI)	7.000	Kosteneffizient bei kleineren Stückzahlen und hohen geometrischen Anforderungen

5.6.3 Nachhaltigkeit

Das 3DCP-Verfahren verbraucht weniger Material, erfordert jedoch einen hohen Energieverbrauch und führt zu höheren CO₂-Emissionen aufgrund des hohen Zementgehalts. Das SPI-Verfahren ist hinsichtlich Materialverbrauch und Energieeffizienz ausgewogener, während die konventionelle Methode durch ihre Wiederverwendbarkeit Vorteile aufweist. Zu berücksichtigen ist die Lebensdauer der mit dem 3DCP-Verfahren gedruckten Schalhaut. In Experteninterviews und dem Artikel von Anton¹⁷⁶ wurde über Rissbildung durch Einwirkung der Umgebungsbedingungen berichtet. Bei witterungsgeschützten Bauteilen sind hingegen keine Mängel aufgetreten. Durch Oberflächenversiegelung oder Imprägnierungen kann die Dauerhaftigkeit des gedruckten Materials verbessert werden. (Tab. 5.4)

Tab. 5.4: Nachhaltigkeit der unterschiedlichen Verfahren

Herstellungsverfahren	Materialverbrauch	Energieverbrauch	CO ₂ -Emissionen
Stahlschalung	Hoch	Hoch	Hoch
3D Concrete Printing (3DCP)	Gering	Mittel	Gering
Selective Paste Intrusion (SPI)	Gering	Gering	Gering

5.6.4 Qualitative Eigenschaften

Die konventionelle Methode bietet die beste Oberflächenqualität, jedoch eingeschränkte Designflexibilität. Das 3DCP- und das SPI-Verfahren bieten hohe Designfreiheit und gute strukturelle Eigenschaften, wobei die Oberflächenqualität des 3DCP-Verfahrens etwas geringer ist. Eine glatte Sichtbetonoberfläche mit rundem Querschnitt für das Referenzprojekt wäre mit einer im Binder Jetting-Verfahren gedruckten Schalhaut möglich (Tab. 5.5).

Tab. 5.5: Qualitative Eigenschaften der unterschiedlichen Verfahren

Herstellungsverfahren	Oberflächenqualität	Dauerhaftigkeit	Designfreiheit
Stahlschalung	Hoch	Hoch	Gering
3D Concrete Printing (3DCP)	Mittel	Gering	Mittel
Selective Paste Intrusion (SPI)	Mittel	Mittel	Hoch

5.6.5 Fazit

Die Untersuchung zeigt, dass jede Methode ihre Vor- und Nachteile hat. Die konventionelle Stahlbetonschalung ist bei wiederholter Nutzung wirtschaftlich, bietet jedoch weniger Designflexibilität. Das 3DCP-Verfahren punktet mit schnellen Produktionszeiten und hoher Designfreiheit, ist jedoch energieintensiv. Das SPI-Verfahren stellt einen ausgewogenen Ansatz dar, der Kosten, Nachhaltigkeit und Designflexibilität vereint. Zukünftige technologische Fortschritte könnten die Effizienz und Umweltauswirkungen des 3D-Drucks weiter verbessern, wodurch eine stärkere Integration dieser Methoden in die Bauindustrie zu erwarten ist.

¹⁷⁶Vgl. [4] Anton et al., S. 12

Kapitel 6

Aktuelle Herausforderungen für die additive Fertigung im Bauwesen

Der Beton-3D-Druck gilt als wegweisende Technologie im Baubereich, er steht allerdings vor einer Vielzahl von Herausforderungen, die eine breite Anwendung und Integration in die Bauindustrie behindern. Diese Herausforderungen wirken sich auf die Möglichkeit aus, konventionelle Fertigungsmethoden durch innovative additive zu ersetzen.

6.1 Aktuelle Herausforderungen der additiven Fertigung im Bauwesen

Die Herausforderungen erstrecken sich dabei über verschiedene Aspekte, deren Palette von fehlenden Normen über die Integration von Zugbewehrung und die Optimierung von Materialien bis zu spezifischen technischen Hürden reicht. Werden diese Herausforderungen angegangen, eröffnen sich innovative Lösungsansätze, wie etwa das Beispiel der integrierten Bewehrungstechnik durch das drahtbasierte Verfahren Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) zeigt. Technische Hürden, etwa die Anpassung der Druckparameter während des laufenden Prozesses, erfordern innovative Lösungen, wobei Fortschritte in der Sensortechnologie und Echtzeitüberwachung bereits heute eine präzisere Kontrolle des Druckprozesses ermöglichen. Die Integration von künstlicher Intelligenz könnte schließlich dazu beitragen, automatisierte Anpassungen vorzunehmen und so die Effizienz und Qualität der gedruckten Strukturen zu steigern.

6.1.1 Normgebung

Die mangelnde Normgebung ist ein zentrales Problem im Bereich des Beton-3D-Drucks, weil sie eine Standardisierung von Verfahren, Materialien und Qualitätskontrollen behindert. Ohne klare Normen stehen Planer, Ingenieure und Baufirmen vor Unsicherheiten bezüglich der Konformität mit bestehenden Baustandards.¹⁷⁷ Vor diesem Hintergrund wird die Forderung nach der Entwicklung umfassender Normen verständlich, die die gesamte Prozesskette des Beton-3D-Drucks abdecken und die Grundlage für sichere und zuverlässige Bauwerke legen sollen. Erst ein solches Normenwerk würde zudem ein zweites derzeit bestehende Problem lösen: jenes der Haftungsfrage, die bei der Verwendung von Druckern anstelle von Menschen für bestimmte Bauaufgaben auftreten kann. Derzeit ist die Unsicherheit rund um den 3D-Druck im Bauwesen demnach groß und solange Gesetze und Vorschriften nicht klar definiert sind, ist es unwahrscheinlich, dass der 3D-Druck einen signifikanten Einfluss auf den Bausektor haben wird. Deshalb wirken besonders die Hersteller von Beton-3D-Druckern aktiv bei der Erarbeitung von Vorschriften mit, wie aus den Experteninterview mit den Verantwortlichen der Eigner Betonmanufaktur hervorgegangen ist. So prüft das Unternehmen etwa gemeinsam mit Universitäten die Brandschutzsicherheitsklasse

¹⁷⁷Vgl. [57] Mechtcherine und Nerella, S. 283

3D-gedruckter Aussparungen. Die bisher durchgeführten Versuche haben dabei gezeigt, dass die Aussparungen der höchsten Brandschutzklasse entsprechen.¹⁷⁸

Dieses Beispiel zeigt, dass die Einführung des 3D-Betondrucks im Hochbau von einer ganzen Reihe von Forschungsfragen begleitet wird. Diese zu beantworten, macht eine umfangreiche Beteiligung verschiedener Akteure erforderlich, weil es aufgrund der innovativen Herstellungsmethode bei den Planern und Bauausführenden an Langzeiterfahrung fehlt. Kombiniert mit der bestehenden spezifischen Normenlücke macht dies die Anwendung der generellen normativen Vorgaben im Hochbau oft schwierig, was zu zusätzlichen finanziellen Aufwendungen für experimentelle Nachweise führt.¹⁷⁹ Als Beispiel kann hier die bereits genannte Tiefgarageneinfahrt in Nördlingen herangezogen werden. Um deren Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu testen, musste ein Deckenausschnitt prototypisch umgesetzt und am LKI der TU Graz einem Biegezugversuch unterzogen werden.

In Zusammenarbeit mit der Firma Baunit entwickelte das Institut für Tragwerksentwurf (ITE) der TU Graz eine einachsige gespannte Decke mit Auskragung, die mit Hilfe der in 3D-Druck-Technik hergestellten Aussparungskörper realisiert wurde. Das experimentell geprüfte Tragsystem wurde von der Firma Eigner Bau umgesetzt. Insgesamt wurden 168 Betonsegmente hergestellt und auf der Baustelle zu 48 länglichen Aussparungskörpern mit Längen von 2,10 m bis 6,40 m zusammengefügt.¹⁸⁰

Die erfolgreiche Umsetzung dieses Projekts demonstriert nicht nur die Praxistauglichkeit des Beton-3D-Drucks im Bauwesen, sondern zugleich die Möglichkeit, innovative Designs unter Berücksichtigung der Normen zu realisieren. Solche experimentellen Anwendungen sind entscheidend für die Entwicklung und Akzeptanz neuer Bautechnologien, zugleich aufwendig und teuer.

6.1.2 Zugbewehrung

Neben der Normgebung ist die Materialoptimierung eine der wichtigsten Herausforderungen, wenn es um die Etablierung der mineralischen additiven Verfahren geht. Dabei wurden in den letzten Jahren zahlreiche Verfahren zur additiven Fertigung von unbewehrten Betonbauteilen entwickelt. Nun steht die Herstellung definierter statisch-konstruktiver Bauteile im Fokus dieser innovativen Fertigungsmethode. Die Integration von zugfesten Materialien ist dabei entscheidend, um Zugkräfte abzutragen und gegebenenfalls ein duktilen Versagen der statisch wirksamen Betonbauteile sicherzustellen.¹⁸¹ Die Herausforderung besteht darin, Bewehrungselemente zu integrieren und gleichzeitig die Flexibilität und Effizienz additiver Fertigungsmethoden zu bewahren. Ziel ist die Entwicklung kombinierter additiver Fertigungsmethoden für Betonbauteile mit integrierter Bewehrung, die Formfreiheit bieten und einen guten Verbund zum umgebenden Material herstellen können.¹⁸¹ Die Vorteile der Stahlarmierung von Betonteilen sind naheliegend. Beton und Stahl bilden einen robusten mechanischen Verbund, besitzen ähnliche Wärmeausdehnungskoeffizienten und haben sich über Jahrzehnte in der Praxis bewährt. Zur Vermeidung von Bewehrungskorrosion werden textile Bewehrungskonzepte wie Glas- oder Kohlefaserarmierung als vielversprechende Alternativen zum traditionellen Stahl betrachtet.¹⁸¹ In aktuellen Forschungsprojekten werden speziell für diese Konzepte Bewehrungslösungen entwickelt und ihre Potenziale im Kontext der additiven Fertigung eingehend untersucht.¹⁸²

Die kombinierte additive Fertigung ermöglicht eine lastpfadgerechte Bewehrungsführung und vermeidet den Einsatz von konstruktiver Montagebewehrung, was zu weniger statisch nicht

¹⁷⁸Experteninterview

¹⁷⁹Vgl. [31] Grassers

¹⁸⁰Vgl. [44] ITE-TU Graz

¹⁸¹Vgl. [57] Mechtcherine und Nerella, S. 285-286

¹⁸²Vgl. [48] Krause, S. 71

erforderlichem Material führt. Dadurch lassen sich komplexere und leistungsfähigere Bauteilstrukturen entwickeln.¹⁸³ Eine große Herausforderung besteht in der Sicherstellung des Verbunds zwischen Beton und Bewehrung, der durch verschiedene Ansätze wie die Steuerung der Betonkonsistenz, den Einsatz von Verbundmörtel oder die Verwendung mineralisch gebundener Karbonfaserbewehrungen verbessert werden kann.¹⁸⁴

Es besteht Forschungsbedarf in der kooperativen Abstimmung und Zusammenführung der einzelnen kombinierten additiven Prozessschritte, insbesondere im Einbringen von Bewehrungselementen in den automatisierten Fertigungsprozess von Betonbauteilen. Ein Beispiel für eine solche Bewehrungstechnik ist das drahtbasierte Verfahren WAAM. Bei diesem Verfahren wird das Metall als Bewehrung mit Hilfe der Lichtbogentechnik lagenweise verschweißt und das Bauteil so additiv aufgebaut. Der mögliche Ablauf einer solchen Kombination wird in Abbildung 6.1 dargestellt. WAAM bietet die benötigte geometrische Freiheit für das SPI und ermöglicht dabei hohe Baugeschwindigkeiten sowie die Verwendung einer Vielzahl funktionaler Materialien wie Stahl oder Titan.¹⁸⁵



Abb. 6.1: Studie zu einem kombinierten Herstellungsprozess aus WAAM und SPI (Quelle: Straßer et al. [79])

Zunächst wird mit dem WAAM-Verfahren ein vorstehender Bewehrungsstab auf einer Oberfläche oder einer vorherigen Schicht gedruckt. Anschließend wird eine Schicht aus Aggregatpartikeln auf die Oberfläche aufgebracht und der Zementleim auf den dafür vorgesehenen Bereichen abgelagert. Der Zementleim bedeckt dann die Aggregatpartikel, dringt in das Partikelbett ein und kommt mit der Bewehrung im Partikelbett in Kontakt. Diese Verfahrensschritte werden wiederholt, bis das tragende Betonbauteil fertiggestellt ist und nach dem Aushärten ausgegraben werden kann. Dennoch gibt es noch einige Herausforderungen für den hybriden Prozess hinsichtlich der Frisch- und Festbetoneigenschaften. WAAM erzeugt hohe Temperaturen, was zu einer starken Wärmeleitung in das Partikelbett und den Zementleim führt. Infolgedessen verdunstet Wasser aus dem Zementleim, was sich nachteilig auf seine rheologische Leistung, sein Eindringverhalten in das Partikelbett und schließlich auf die Zementhydratationsreaktion auswirkt. Zusätzlich sind die hohen Baugeschwindigkeiten des WAAM-Prozesses immer noch niedriger als die Möglichkeiten

¹⁸³Vgl. [89] Vasilic et al., S. 715

¹⁸⁴Vgl. [74] Roussel, S. 164

¹⁸⁵Vgl. [79] Straßer et al.

des SPI. Daher sind Untersuchungen erforderlich, um festzustellen, ob eine Kombination von SPI und WAAM sinnvoll ist.¹⁸⁶

6.1.3 Materialoptimierung

Von Anfang an war die Optimierung der druckbaren Betonmischung eine bedeutende Herausforderung. Um den Fluss durch die Druckdüse zu gewährleisten, muss der Beton pumpfähig bleiben und darf bei kurzen Unterbrechungen nicht aushärten. Gleichzeitig sollte er nach Erreichen des Bestimmungsorts nicht mehr verrinnen und eine stabile Bindung mit der zuvor aufgetragenen Schicht eingehen. Die Pumpbarkeit erwies sich als besonders problematisch, doch in der Zwischenzeit wurde eine effektive Methode gefunden. Diese besteht darin, den Beton im Bereich des Druckkopfs mit Beschleunigerflüssigkeit zu vermischen.¹⁸⁷

Zusätzlich zu den genannten Herausforderungen spielt die Verbaubarkeit des Betons eine entscheidende Rolle. Der 3D-Betondruck erfordert eine Mischung, die schnell aushärtet. Trotzdem sollen die Schichten untereinander einen ausreichenden Verbund aufweisen. Die präzise Kontrolle von Rheologie, Extrudierbarkeit, Baubarkeit, Pumpbarkeit und Festigkeit ist entscheidend für die Qualität der gedruckten Strukturen.¹⁸⁷

Ein weiterer Aspekt ist die Umweltverträglichkeit der Betonmischung. In Anbetracht der steigenden Nachfrage nach nachhaltigen Bautechnologien ist die Entwicklung einer umweltfreundlichen Betonmischung von großer Bedeutung. Dies könnte den Einsatz von recycelten Materialien oder die Reduzierung des Zementgehalts beinhalten, um den ökologischen Fußabdruck zu minimieren.¹⁸⁸ Grundsätzlich erfordert die Weiterentwicklung des 3D-Betondrucks eine ganzheitliche Herangehensweise, die Aspekte wie Materialzusammensetzung, Trocknungszeit, Umweltverträglichkeit und Druckbarkeit berücksichtigt.

6.1.4 Frischbetondruck

Die Berücksichtigung des Frischbetondrucks ist entscheidend für die Stabilität von 3D-gedruckten Schalungen während der Betonage. Dabei spielt die Geometrie der Schalungselemente eine zentrale Rolle: Längliche, gerade Elemente weisen eine geringere Fähigkeit zur Druckaufnahme auf im Vergleich zu runden oder organisch geformten Strukturen, die durch ihre Form Druckkräfte effizienter verteilen können. Die Schichtdicke hat einen wesentlichen Einfluss: Ein doppelagiger Druck erhöht die Belastbarkeit der Struktur im Vergleich zu einlagigen Schichten signifikant.¹⁸⁹

Neben der Geometrie sind Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit maßgebliche Faktoren, die die Festigkeit der gedruckten Strukturen beeinflussen. Schwankungen in diesen Bedingungen können die Druckbelastbarkeit erheblich beeinträchtigen. Zusätzlich zeigt sich eine Variabilität in der Qualität des Druckmörtels, die zu Unterschieden in der Belastbarkeit der gedruckten Elemente führt.¹⁸⁹

Ein weiterer kritischer Parameter ist die Layerzeit, also die Zeitspanne, die der Drucker benötigt, um zur gleichen Stelle zurückzukehren und die nächste Schicht aufzutragen. Diese Zeit muss sorgfältig gesteuert werden, um die Widerstandsfähigkeit der Schalung zu gewährleisten. Eine zu kurze Layerzeit kann zu einem Kollaps der Struktur führen, da der Beton nicht ausreichend Zeit hat, um eine frühe Festigkeit zu entwickeln und die Last nachfolgender Schichten zu tragen. Im Gegensatz dazu kann eine zu lange Layerzeit die Verbindung zwischen den Schichten schwächen.

¹⁸⁶Vgl. [79] Straßer et al.

¹⁸⁷Vgl. [48] Krause, S. 50-65

¹⁸⁸Vgl. [33] Han et al., S. 12

¹⁸⁹Experteninterview

Die Layerzeit wird durch die Verfahrensgeschwindigkeit des Druckkopfes geregelt und muss präzise angepasst werden, um eine stabile und homogene Struktur sicherzustellen.¹⁹⁰

Zur Erhöhung der Tragfähigkeit der gedruckten Schalungen werden während des Druckvorgangs Wandanker manuell in die Struktur integriert. Diese Verstärkungen erhöhen die Fähigkeit der Schalung, den Frischbetondruck aufzunehmen. In Laborversuchen, wie sie von Peri 3D Construction durchgeführt wurden, konnte eine 3 Meter hohe gedruckte Schalung in einem Zug mit Frischbeton gefüllt werden und einem Druck von 68 kN/m² standhalten. Konventionelle Wandschalungssysteme werden für einen Frischbetondruck von 60 bis 100 kN/m² konzipiert. Diese praktischen Erfahrungen und Laboruntersuchungen zeigen, dass hohe Frischbetondrucke erfolgreich bewältigt werden können, wenn die Druckprozesse sorgfältig geplant und optimiert werden.¹⁹⁰

6.2 Das Potenzial der additiven Fertigung, konventionelle Betonbauweisen zu ersetzen

Die revolutionäre Technologie des Beton-3D-Drucks hat zweifellos das Potenzial, die Bauindustrie zu transformieren. Trotzdem stehen der großflächigen Verwendung noch erhebliche Hürden im Weg, die von normativen Vorgaben bis zur Integration von Zugbewehrung reichen.

Das Fehlen von auf den Beton-3D-Druck im Bauwesen zugeschnittenen Normen und Vorschriften ist eine der größten aktuellen Herausforderungen. Die bestehenden Bauvorschriften sind auf konventionelle Bautechniken ausgerichtet und müssen aktualisiert werden, um den einzigartigen Anforderungen des Beton-3D-Drucks gerecht zu werden. Dies beinhaltet Fragen der Langzeitstabilität und Qualität, die sorgfältig adressiert werden müssen, um das Vertrauen der Baugemeinschaft zu gewinnen. Ein weiterer kritischer Punkt ist das Fehlen einer etablierten Methode zur Integration von Zugbewehrung in 3D-gedruckten Beton. Die Zugfestigkeit ist entscheidend für die Tragfähigkeit von Betonbauteilen, weshalb die Brücke zwischen 3D-Drucktechnologie und bewährten Zugbewehrungsmethoden geschlagen werden muss. Dies erfordert nicht nur technologische Innovation, sondern eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschern, Ingenieuren und Regulierungsbehörden.

Trotz dieser Hürden haben sich Hersteller und Anwender dem Beton-3D-Druck verschrieben und sammeln derzeit wertvolle Erfahrungen durch die Herstellung von Referenzprojekten und Designermöbeln.¹⁹¹ Die einzigartigen Möglichkeiten dieser Technologie zeigt etwa der Stuhl mit dem Namen Chair N° One aus Abbildung 6.2, der das Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen Progress 3D Innovation und Studio Oberhauser ist. Unter 4000 internationalen Bewerbungen um den Red Dot Award im Jahr 2022 wurden nur 38 mit dem Award in der Kategorie “Best of the Best” ausgezeichnet.¹⁹¹ Wie das Beispiel verdeutlicht, bietet der Beton-3D-Druck im derzeitigen Stadium seiner Entwicklung einen experimentellen Raum, um Techniken zu verfeinern, Materialien zu testen und die Grenzen der Technologie auszuloten. Insbesondere die Herstellung von Aussparungen mit einem Beton-3D-Drucker, die die Eigner Betonmanufaktur für den Eigengebrauch sowie für Mittbewerber erfolgreich vormacht, zeigt vielversprechende Ergebnisse und deutet auf die erfolgreiche Substitution konventioneller Methoden hin.

Von den Erfahrungen der Möbelherstellung kann die Bauindustrie profitieren. Die Branchenübergreifende Forschung und Entwicklung im Bereich des 3D-Drucks schafft eine Grundlage für künftige Anwendungen im Bauwesen. Mit einem klaren Blick auf die Herausforderungen und die fortlaufende Innovationsbereitschaft könnte der Beton-3D-Druck schon bald einen festen Platz in

¹⁹⁰Experteninterview

¹⁹¹Vgl. [66] Progress 3DI



Abb. 6.2: Der in 3D-Betondruck hergestellte Chair N° One ist aus einer Zusammenarbeit von Progress 3D Innovation und Studio Oberhauser entstanden. (Quelle: Progress 3DI [66])

der Bauindustrie einnehmen, revolutionäre Möglichkeiten eröffnen und gleichzeitig traditionelle Bauprozesse ergänzen.

Diese Einschätzung unterstreichen die Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit, die am Fallbeispiel der Stahlbetonsäule gezeigt hat, dass die Substitution konventioneller Spezialschalungen aus Stahl durch 3D-gedruckte verlorene Schalungen aus Beton unter bestimmten Voraussetzungen architektonisch und wirtschaftlich interessant sein kann. Dabei zeichnet sich eine transformative Entwicklung ab, die dazu führen wird, dass Betonbauteile künftig nicht mehr ausschließlich durch konventionelle Methoden. Stattdessen deuten Forschung und Interviews mit Projektbeteiligten darauf hin, dass eine innovative Synergie zwischen diesen beiden Herangehensweisen entsteht, um das Beste aus beiden Welten zu vereinen. Es geht damit nicht darum, herkömmliche Methoden zu ersetzen, sondern vielmehr darum, die Vorteile des 3D-Drucks in bewährte Bauprozesse zu integrieren.

Zur Stützung dieser These können mehrere Schlüsselpunkte aus den Interviews herausgearbeitet werden:

- **Kombination von Präzision und Tradition:** Präzision und Flexibilität von 3D-Druckverfahren ermöglichen es, komplexe Designs und Strukturen zu realisieren. Gleichzeitig bleibt die bewährte Robustheit konventioneller Bautechniken erhalten. Durch die Kombina-

tion beider Ansätze können Bauunternehmen hochwertige und maßgeschneiderte Bauteile herstellen.

- **Optimierung von Materialverbrauch und Kosten:** Der 3D-Druck ermöglicht eine präzise Kontrolle über den Materialverbrauch, was zu erheblichen Einsparungen führen kann. Diese Effizienz geht jedoch nicht zu Lasten der Tragfähigkeit, nachdem konventionelle Methoden weiterhin für bestimmte Aspekte des Baus verwendet werden.
- **Beschleunigung des Bauprozesses:** Der 3D-Druck kann den Bauprozess beschleunigen, insbesondere bei der Herstellung komplexer Bauteile. Dies führt zu verkürzten Bauzeiten und ermöglicht eine schnellere Fertigstellung von Bauprojekten.
- **Nachhaltigkeit im Fokus:** Durch die Kombination von 3D-Druck mit traditionellen Bauprozessen können nachhaltige Prinzipien besser berücksichtigt werden. Die Möglichkeit, Material effizienter zu nutzen, reduziert Abfall und minimiert Umweltauswirkungen.

Die Zukunft des Betonbaus liegt damit in einer Integration bewährter Bautechniken und fortschrittlicher 3D-Druckverfahren. Diese Synergie verspricht nicht nur eine höhere Effizienz und Kosteneffektivität, sondern eine breitere Palette von gestalterischen Möglichkeiten und eine nachhaltigere Bauweise.

Kapitel 7

Fazit

Im abschließenden Teil dieser Diplomarbeit werden die zentralen Ergebnisse zusammengeführt und die Forschungsfragen, die zu Beginn der Arbeit formuliert wurden, beantwortet. Das Fazit bietet eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und bewertet diese im Kontext der ursprünglichen Fragestellungen. Zudem wird aufgezeigt, welche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen gezogen werden können und welche Implikationen diese für die Praxis und zukünftige Forschung haben. Abschließend wird ein Ausblick auf die weiteren Potenziale des Beton-3D-Drucks gegeben.

7.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Folgenden werden die in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen beantwortet.

Forschungsfrage 1:

Welche Vor- und Nachteile haben unterschiedliche additive Fertigungsmethoden im Betonbau mit Blick auf die globalen Herausforderungen?

Im Vergleich der beiden Verfahren 3D Concrete Printing (3DCP) und Selective Paste Intrusion (SPI) zeigt sich, dass das 3DCP-Verfahren in Bezug auf Kosten und Herstellungszeit überlegen ist. Es ermöglicht eine schnellere Produktion und ist kostengünstiger, was es zu einer attraktiven Option für viele Bauvorhaben macht. Im Gegensatz dazu ist das SPI-Verfahren komplexer und teurer. Dennoch bietet das SPI-Verfahren entscheidende Vorteile hinsichtlich der geometrischen Freiheit und der Qualität des Endprodukts. Bauteile, die mit SPI hergestellt werden, zeichnen sich durch eine höhere Festigkeit und Dauerhaftigkeit aus, was sie besonders für Anwendungen attraktiv macht, bei denen die Bauteile starken Witterungseinflüssen ausgesetzt sind.

Das SPI-Verfahren wird typischerweise in einem kontrollierten, stationären Umfeld wie einer Fabrik oder Werkhalle durchgeführt, was eine bessere Planung und Organisation des Arbeitseinsatzes ermöglicht. In einem solchen Umfeld können Prozesse standardisiert und optimiert werden, was den Bedarf an hochqualifizierten Fachkräften vor Ort reduziert. Zudem sind die Arbeitsbedingungen in einer stationären Umgebung oft sicherer und stabiler, was zu einer effizienteren und zuverlässigeren Produktion führt. Diese stationäre Fertigung bringt jedoch Einschränkungen hinsichtlich der Bauteilgröße mit sich, da diese durch das Bauraum- und Transportvolumen begrenzt wird. Im Gegensatz dazu erfordert das 3DCP-Verfahren, das oft direkt auf der Baustelle durchgeführt wird, eine flexiblere und anspruchsvollere Arbeitsorganisation. Vor-Ort-Druckprozesse können durch wechselnde Wetterbedingungen und andere unvorhersehbare Faktoren beeinflusst werden, was die Produktionsplanung und -ausführung komplexer macht.

In Bezug auf die Nachhaltigkeit schneidet das SPI-Verfahren besser ab als das 3DCP-Verfahren. Ein wesentlicher Vorteil des SPI-Verfahrens liegt im geringeren Zementanteil, der verwendet wird. Zusätzlich zur Reduktion der CO₂-Emissionen weist das SPI-Verfahren eine potenziell höhere

Dauerhaftigkeit der Endprodukte auf, was deren Langlebigkeit erhöht und die Notwendigkeit von Wartungsarbeiten minimiert.

Forschungsfrage 2:

**Welche Hürden bei der Praxisumsetzung roboterassistierter Bauverfahren gibt es derzeit?
Welche Lösungsansätze gibt es dazu?**

Die Herstellung der Prototypen hat die Vorteile additiver Fertigungsverfahren, insbesondere hinsichtlich Kostenreduktion und verkürzter Produktionszeiten, deutlich aufgezeigt. Diese Technologien ermöglichen eine effiziente und schnelle Produktion, die sich in verschiedenen Bauprojekten als vorteilhaft erweist. Gleichzeitig wurden gegenwärtige Hürden identifiziert, die diese Vorteile teilweise relativieren. Dazu gehören insbesondere die noch unzureichende Normierung der 3D-gedruckten Materialien, Herausforderungen bei der Frischbetonverdichtung sowie Anforderungen an die Oberflächenqualität.

Die Systemgrenzen des 3D-Betondrucks werden durch die technischen Spezifikationen der Drucker und das Bauraumvolumen bestimmt, was die maximale Größe herstellbarer Bauteile begrenzt. Überschreiten Bauteile diese Dimensionen, müssen sie in Segmenten gedruckt und vor Ort verbunden werden. Ein Lösungsansatz hierfür ist der Beton-3D-Druck auf der Baustelle. Durch fahrbare Bewegungssysteme können die Bauteilgrenzen nach Anforderung erweitert werden.

Das Problem der fehlenden Bewehrung im 3D-Betondruck stellt eine signifikante Herausforderung dar, da Beton ohne Bewehrung nur eine geringe Zugfestigkeit aufweist und somit für tragende Konstruktionen ungeeignet ist. Diese Einschränkung begrenzt die Einsatzmöglichkeiten des 3D-Betondrucks erheblich, insbesondere in Bereichen, in denen strukturelle Stabilität und Sicherheit von entscheidender Bedeutung sind. Ein Lösungsansatz für dieses Problem ist die nachträgliche Integration von Bewehrungselementen in die 3D-gedruckten Bauteile. In einigen Projekten wird die Bewehrung direkt in die gedruckte Schalung eingelegt und das Bauteil anschließend mit Ortbeton ausgegossen. Diese Methode kombiniert die Vorteile des 3D-Betondrucks, etwa die flexible Formgebung und schnelle Herstellung, mit der notwendigen strukturellen Festigkeit, die durch die Bewehrung erreicht wird. Ein weiterer innovativer Ansatz ist die Entwicklung von Technologien, die es ermöglichen, Bewehrungselemente während des 3D-Druckprozesses direkt zu integrieren.

Die Schichtgrenzen von 3D-gedruckten Strukturen stellen eine besondere Herausforderung dar, da sie anisotrope mechanische Eigenschaften aufweisen, die zu einer verringerten Dichte und Festigkeit führen können. Diese Schichtgrenzen entstehen durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile, wobei die Festigkeit an den Schnittstellen zwischen den Schichten oftmals geringer ist als innerhalb der Schichten selbst. Diese anisotropen Eigenschaften sind in den aktuellen Bau-Normen, allen voran der DIN EN 1992, nicht berücksichtigt, da diese Normen für konventionelle, monolithische Betonstrukturen ausgelegt sind. Dies führt zu Unsicherheiten bei der Bewertung von 3D-gedruckten Bauteilen und erschwert deren Zulassung und Einsatz in der Baupraxis. Um diese Herausforderung zu bewältigen, werden verschiedene Lösungsansätze verfolgt, darunter umfassende Laborversuche. In diesen Versuchen werden gedruckte Bauteile unter kontrollierten Bedingungen getestet, um die mechanischen Eigenschaften der Schichtgrenzen zu bestimmen. Beispielsweise könnten Anpassungen im Druckprozess, wie die Optimierung der Intervallzeit zwischen den Schichtaufträgen oder die Kontrolle der Oberflächenfeuchtigkeit, die Bindung zwischen den Schichten verbessern.

Forschungsfrage 3:

Welche konventionellen Bauverfahren lassen sich schon heute durch welche additiven Verfahren ersetzen? Wie wirkt sich die Substitution auf Faktoren wie Bauzeit, Kosten, Qualität und Nachhaltigkeit des Baubetriebs aus?

Der aktuelle Stand der Technik im Bereich des 3D-Drucks im Bauwesen erlaubt es derzeit nicht, eine tragende Stahlbeonsäule ausschließlich mit einem 3D-Druckverfahren herzustellen. Die vorgestellten additiven Verfahren sind bislang in der Lage, die verlorenene Schalungen für solche Bauteile zu fertigen. Der entscheidende Grund dafür ist die fehlende Möglichkeit, eine ausreichende Bewehrung in die gedruckten Strukturen zu integrieren.

Die bisherigen Projekte, bei denen 3D-Drucktechnologien für die Herstellung von Gebäuden angewendet wurden, beschränken sich darauf, vertikale Bauteile wie Wände oder Säulen zu drucken. Dächer, Decken, Böden sowie andere wesentliche Bauelemente müssen weiterhin auf herkömmliche Weise hergestellt werden. Bei den gedruckten Wänden handelt es sich häufig um die äußeren Umrisse, die als verlorene Schalung dienen. Der Hohlraum dieser Schalungen wird anschließend konventionell bewehrt und mit Ortbeton ausgefüllt, um den statischen Anforderungen gerecht zu werden. Tatsächlich machen die gedruckten Wände nur etwa 20-25 % des gesamten Bauvolumens aus, während die verbleibenden 75-80 % weiterhin mit traditionellen Bauverfahren realisiert werden müssen. Diese Einschränkungen verdeutlichen, dass die vollständige Substitution konventioneller Bauverfahren durch 3D-Drucktechnologien derzeit noch nicht möglich ist, insbesondere bei horizontalen Bauteilen.

Die Untersuchung der Substitution der Spezialschalung aus Stahl durch eine Schalung aus dem 3D-Drucker zeigt signifikante Potenziale zur Verbesserung von Bauzeit, Kosten, Qualität und Nachhaltigkeit. Traditionell erfolgt die Herstellung solcher Bauteile durch den Einsatz aufwendiger Schalungen und das Vor-Ort-Betonieren. Der Einsatz von 3D-gedruckten Schalungen stellt eine innovative und technisch realisierbare Alternative dar, die aus betrieblicher Sicht Vorteile bietet.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Substitution von Spezialschalungen aus Stahl durch 3D-gedruckte Schalungen zu einer signifikanten Reduktion der Produktionszeit führt. Während herkömmliche Bauverfahren den zeitintensiven Aufbau und die Nachbearbeitung der Schalungen erfordern, ermöglicht der 3D-Druck eine schnelle und präzise Fertigung der benötigten Formen. Die konventionelle Stahlschalung erfordert mit detaillierter Planung und Produktion insgesamt 14 Arbeitstage, während das 3DCP-Verfahren mit 1,5 Tagen deutlich schneller ist.

Aus ökonomischer Sicht bietet die additive Fertigung Einsparungspotenziale. Die wirtschaftliche Analyse der drei Schalungsvarianten zeigt, dass die Rentabilität stark von der Stückzahl abhängt. Stahlschalungen sind teuer in der Anschaffung, aber durch Wiederverwendung langfristig kosteneffizient. Additiv gefertigte Schalungen sind günstiger, eignen sich aber nur für den einmaligen Einsatz.

Die drei untersuchten Verfahren unterscheiden sich in Bezug auf Oberflächenqualität und Formfreiheit. Die konventionelle Schalungsbauweise ermöglicht glatte Sichtbetonoberflächen, ist jedoch bei komplexen Geometrien eingeschränkt. Das 3DCP-Verfahren bietet hohe Gestaltungsfreiheit, aber die Oberflächen sind oft gemustert und weniger glatt. Das SPI-Verfahren überzeugt durch maximale Formfreiheit und eine körnige, fehlerverzeihende Oberfläche, erreicht jedoch nicht die glatte Qualität konventioneller Methoden. Die Wahl des Verfahrens hängt somit von den spezifischen Projektanforderungen ab.

Wiederverwendbare Stahlschalungen haben ein hohes Treibhauspotenzial, sind aber bei mehrfachem Einsatz ökologisch vorteilhafter, da sie vollständig recycelbar sind. Die verlorene Schalung im 3DCP-Verfahren weist eine geringere ökologische Belastung auf, führt jedoch zu höherem Deponieabfall und hat eine kürzere Lebensdauer, besonders unter extremen klimatischen Bedingungen.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit hat gezeigt, dass der 3D-Betondruck ein vielversprechendes Potenzial für die Bauindustrie bietet, insbesondere in Bezug auf Materialeinsparungen, Designflexibilität und Effizienzsteigerungen. Trotz der erkannten Vorteile stehen jedoch weiterhin bedeutende Herausforderungen im Raum, etwa die Standardisierung der Technologie, die Qualitätssicherung während des Druckprozesses und die Integration in bestehende Baupraktiken.

Ein möglicher zukünftiger Forschungsansatz könnte sich darauf konzentrieren, die Langzeitstabilität von 3D-gedruckten Betonbauteilen weiter zu untersuchen und die Entwicklung von Standards und Normen voranzutreiben. Zudem wäre es sinnvoll, die wirtschaftlichen Aspekte des Beton-3D-Drucks in größeren Maßstäben zu erforschen, um die Technologie für den breiten Einsatz in der Bauindustrie noch attraktiver zu machen.

Des Weiteren könnten zukünftige Studien die Möglichkeiten der Kombination von 3D-Betondruck mit anderen innovativen Bauverfahren und -materialien analysieren, um hybride Bauweisen zu entwickeln, die die Stärken des 3D-Drucks und die Vorteile traditioneller Bauweisen vereinen. Schließlich ist die Untersuchung der ökologischen Auswirkungen und die Weiterentwicklung nachhaltiger Druckmaterialien ein weiterer wichtiger Schritt, um den 3D-Betondruck als umweltfreundliche Baualternative zu etablieren.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass der 3D-Betondruck bereits heute in der Lage ist, bestimmte konventionelle Bauverfahren zu substituieren, wobei die Auswirkungen auf Bauzeit, Kosten, Qualität und Nachhaltigkeit als positiv bewertet werden können. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen das Potenzial des 3D-Betondrucks, das Bauwesen in den kommenden Jahren nachhaltig zu transformieren.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einsatz eines modularen Schalungssystems für Ortbetonwände im Kellergeschoss (Quelle: Eigene Aufnahme)	18
3.1	Zusammenhang Herstellungskosten/Produktionsmenge bei additiver und konventioneller Fertigung (Quelle: Krause [48], S. 27)	22
3.2	Überblick über die additiven Fertigungsverfahren im Betonbau (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88] und Lowke et al. [54], S. 51)	24
3.3	Das Innere des DFAB-Hauses in Zürich (Quelle: Thrope [82])	25
3.4	Allgemeine Prozesskette in der Additiven Fertigung (Quelle: Krause [48], S. 21)	26
3.5	Häufig angewendete Bewegungssysteme in der additiven Fertigung (Quelle: in Anlehnung an Näther et al. [59], S. 23)	29
3.6	Beton 3D-Drucker Cobod BOD2 des dänischen Unternehmens <i>Cobod</i> (Quelle: Symonenko [81])	30
3.7	Lehm 3D-Drucker Big Delta des italienischen Unternehmens <i>Wasp</i> (Quelle: Rodgers [72])	31
3.8	Beton 3D-Drucker CyBe RC auf einer fahrbaren Raupenplattform (Quelle: Wakefield [93])	32
3.9	Der Beton-3D-Drucker mit Roboterarm von <i>Apis Cor</i> mit sechs Achsen nach dem Konzept eines herkömmlichen Baukrans im Hochbau (Quelle: 3Dnatives [1])	33
3.10	Prozesskette ablegendes Verfahren (Quelle: Henke [36], S. 15)	34
3.11	Druckprozess - CC (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])	35
3.12	Hybrid CC-Druckkopf extrudiert parallel drei Düsen (links), CC-Vision zukünftiger Bauprozesse (rechts) (Quelle: CC Corp [16])	35
3.13	Druckprozess - 3DCP (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])	36
3.14	Druckprozess SC3DP (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])	37
3.15	Prozesskette selektiv bindendes Verfahren (Quelle: Henke [36], S. 15)	38
3.16	Druckprozess - SCA-Verfahren (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])	39
3.17	Druckprozess - SPI-Verfahren (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])	40
3.18	Druckprozess - Binder Jetting-Verfahren (Quelle: in Anlehnung an Vasilic [88])	41
3.19	Mehrfach gekrümmte Treppenunterseite aus Kombination von 3D-gedruckter und konventioneller Schalung hergestellt (links). Verlorene Schalung für eine statisch optimierte Betonplatte (rechts) (Quelle: Voxeljet [92])	42
3.20	Aufschmelzen von Quarzsand zu Glas durch SLS (links). Versuchsaufbau von <i>Marus Kayser</i> in der Sahara (rechts) (Quelle: Kayser [45])	43
4.1	Eingangsportal für Fußgänger an der Bergstation der Seilbahn Prà Rodont im Skigebiet Pinzolo - Stahlbetonsäule mit Spezialschalung aus Stahl Version H= 4 m (Quelle: Eigene Aufnahme)	48
4.2	Frontansicht Gondelneinfahrt - Formgebung der Säule unter Berücksichtigung des Bewegungsfreiraums der Gondeln (Quelle: Eigene Darstellung)	50
4.3	Säulenprojekte: Säule von XtreeE (A) [100], Säulen der ETH Zürich (B) [78], Säule von Affentranger 3DCP (C) [3]	51

4.4	Ergebnis des generativen Designs der Säulenform in Fusion 360 (Quelle: Eigene Darstellung)	53
4.5	Prozesskette - Konventionelle Herstellung der Säulenschalung aus Stahl (Quelle: Eigene Darstellung)	54
4.6	Montage- und Schweißarbeiten an einem Segment der Säulenschalung (Quelle: Eigene Aufnahme)	55
4.7	Stahlbetonsäule im eingeschalteten Zustand (links), Stahlbetonsäule nach dem Ausschalen (rechts) (Quelle: Eigene Aufnahme)	56
4.8	SPI-Anlage der Progress 3D Innovation im Industriemaßstab mit 16 m ³ Bauraum (Quelle: Progress 3DI [65])	57
4.9	Entpackungsvorgang eines nach dem additiven Verfahren SCA gedruckten Fassadenelements (Quelle: Frank [30])	58
4.10	Eindringverhalten des Zementleims beim SPI-Verfahren (Quelle: Weger [96], S. 5)	60
4.11	Prozesskette - Herstellung des 1. Prototypen nach dem SPI-Verfahren (Quelle: Eigene Darstellung)	61
4.12	Gedruckter Prototyp nach dem SPI-Verfahren (Quelle: Eigene Aufnahme)	62
4.13	Beispiel für einen optimierten 3D Bauraum für selektiv bindende Verfahren (Quelle: Dillenburger [25])	63
4.14	Beton-3D-Drucker BauMinator des österreichischen Baustoffherstellers Baunit (Quelle: Baunit [8])	65
4.15	Referenzprojekt - Tiefgarageneinfahrt in Nördlingen (Quelle: EngelsmannPeters GmbH [28])	66
4.16	Prozesskette - Herstellung des 2. Prototypen nach dem 3DCP-Verfahren (Quelle: Eigene Darstellung)	68
4.17	Herstellungsdokumentation 3DCP-Verfahren in der Eigner Betonmanufaktur (Quelle: Eigene Aufnahmen)	69
5.1	Rendering der Vergleichsmodelle von additiv gefertigten verlorenen Schalungen nach dem 3DCP-Verfahren (links), dem SPI-Verfahren (mitte) und der wiederverwendbaren Schalung aus Stahl (rechts) (Quelle: Eigene Darstellung)	70
5.2	Herstellungsdauer der unterschiedlichen Schalungen in Arbeitstagen [AT]	71
5.3	Frischbetondruck in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit und der Konsistenzklasse bei einem Erstarrungsende von sieben Stunden nach DIN 18218 (Quelle: Weber [95])	73
5.4	Oberflächenstruktur - 3DCP (A+B), SPI (C), Schalung aus Stahl (D) (Quelle: Eigene Aufnahmen)	76
5.5	Referenzbauteil Progress 3D Innovation - Integrale Doppelwand mit Außenfassade und Leitungskanal (Quelle: Eigene Aufnahmen)	77
5.6	Masse pro Quadratmeter der drei unterschiedlichen Schalungsvarianten (Quelle: Eigene Darstellung)	78
5.7	Ökobilanz der unterschiedlichen Schalungsvarianten pro 1 m ² Schalung	80
5.8	Rissbildung durch Frost-Tau-Zyklen an Säulenbasis, Säulenschaft und Säulenkapitell (Quelle: Anton et al. [4], S. 12)	81
5.9	Kostenentwicklung nach Stückzahl gleicher Betonbauteile	82
6.1	Studie zu einem kombinierten Herstellungsprozess aus WAAM und SPI (Quelle: Straßer et al. [79])	89

- 6.2 Der in 3D-Betondruck hergestellte Chair N° One ist aus einer Zusammenarbeit von Progress 3D Innovation und Studio Oberhauser entstanden. (Quelle: Progress 3DI [66]) 92

Tabellenverzeichnis

3.1	Marktübersicht nach Fertigungsverfahren und Bewegungssystemen	44
5.1	Ausgangsdaten für Öko-Indikatoren aus der Webplattform BauBook (Datenquelle: BauBook [7])	79
5.2	Herstellungsdauer der unterschiedlichen Verfahren	85
5.3	Kosten der unterschiedlichen Verfahren	85
5.4	Nachhaltigkeit der unterschiedlichen Verfahren	86
5.5	Qualitative Eigenschaften der unterschiedlichen Verfahren	86

Literatur

- [1] 3Dnatives. *How does a concrete 3D printer work?* 8.01.2021. URL: <https://www.3dnatives.com/en/how-does-a-concrete-3d-printer-work-080120215/> (Zugriff am 20.11.2022).
- [2] J. Adamek und V. Piwek. *Additive Fertigung - 3D-Druck: Stand der Technik, Anwendungsempfehlungen und aktuelle Entwicklungen*. Bd. Band 11. Lingener Studien zu Management und Technik. Berlin und Münster: LIT, 2019. ISBN: 9783643143136.
- [3] Affentranger 3DCP. *Individuelle Stützen*. 25.07.2024. URL: <https://www.affentranger3dcp.ch/profis/stuetzen> (Zugriff am 25.07.2024).
- [4] A. Anton, L. Reiter, T. Wangler, V. Frangez, R. J. Flatt und B. Dillenburger. „A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns“. In: *Automation in Construction* 122 (2021), S. 103467. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103467. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580520310475> (Zugriff am 22.07.2024).
- [5] Apis Cor. *Technologies – Apis Cor | Construction with Robotic Precision*. 22.07.2024. URL: <https://apis-cor.com/technologies/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [6] V.-G. M. und Automatisierungstechnik. *vdi-statusreport-engineering*. URL: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/vdi-statusreport-engineering.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Zugriff am 14.07.2024).
- [7] BauBook. *baubook eco2soft - Ökobilanz für Gebäude*. 2024. URL: <https://www.baubook.at/eco2soft/> (Zugriff am 25.07.2024).
- [8] Baunit. *Baunit BauMinator 3D-Druck-System*. 22.07.2024. DOI: Baunit. URL: <https://baunit.at/bauminator> (Zugriff am 22.07.2024).
- [9] R. Berger. *Digitalisierung der Bauwirtschaft*. URL: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_digitalisierung_bauwirtschaft_final.pdf (Zugriff am 14.07.2024).
- [10] J. Bexten. „Das erste Bürogebäude aus dem 3D-Drucker steht in Dubai“. In: *ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure* (27.05.2016). URL: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/3d-druck/das-buerogebaeude-3d-drucker-steht-in-dubai/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [11] H. Biebeler. *Steigerung der Materialeffizienz in Unternehmen: Bedingungen, Aktivitäten, Hemmnisse und ihre Überwindung*. Bd. Nr. 98. IW-Analysen. Köln: Inst. der Dt. Wirtschaft Köln Medien GmbH, 2014. ISBN: 9783602149384. URL: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/IW-Analysen/PDF/Bd._98_Materialeffizienz.pdf (Zugriff am 25.07.2024).
- [12] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed und T. Salet. „Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing“. In: *Virtual and Physical Prototyping* 11.3 (2016), S. 209–225. ISSN: 1745-2759. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.

- [13] Building&Bricolage. *Bacchi Sabbia Essiccata Tipo 515 25Kg*. 22.07.2024. URL: <https://www.buildingbricolage.com/en-au/shop/Sabbia-Essiccata-Tipo-515-25Kg-p140016149> (Zugriff am 22.07.2024).
- [14] J. Burger, P. Aejmelaesus-Lindström, S. Gürel, F. Niketić, E. Lloret-Fritsch, R. J. Flatt, F. Gramazio und M. Kohler. *Eggshell Pavilion: a reinforced concrete structure fabricated using robotically 3D printed formwork*. 2023. DOI: 2023. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41693-023-00090-x>.
- [15] M. Burry. (PDF) *Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing – Project Led Architectural Research*. 26.11.2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/314116498_Exploring_the_Emerging_Design_Territory_of_Construction_3D_Printing_-_Project_Led_Architectural_Research (Zugriff am 26.11.2022).
- [16] CC Corp. *Contour Crafting Corporation / Construction 3D Printing / California*. 22.07.2024. URL: <https://www.contourcrafting.com/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [17] A. Chiusoli. *TECLA / A 3D printed global habitat for sustainable living*. URL: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [18] Cobod. *Ownership structure / COBOD International*. 19.06.2023. URL: <https://cobod.com/about-us/ownership-structure/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [19] Constructions 3D. *MaxiPrinter / Constructions-3D*. 22.07.2024. URL: <https://en.constructions-3d.com/en/maxiprinter> (Zugriff am 22.07.2024).
- [20] CyBe. *3D concrete printers / CyBe Construction*. 22.07.2024. URL: <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/printers/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [21] CyBe. *CyBe RC (Robot Crawler) — CyBe Construction*. 22.07.2024. URL: <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/printers/cybe-robot-crawler/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [22] D-Shape. *The Radiolaria Pavilion*. 21.07.2024. URL: <https://d-shape.com/Prodotti/the-radiolaria-pavilion/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [23] Dfab House. *DFAB HOUSE – DFAB HOUSE*. 22.07.2024. URL: <https://dfabhouse.ch/de/dfab-house/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [24] Dfab House. *SMART SLAB – DFAB HOUSE*. 22.07.2024. URL: <https://dfabhouse.ch/de/smart-slab/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [25] B. Dillenburger. „Incidental Space at Architecture Biennale Venice 2016“. In: *Digital Building Technologies, ETHZ* (31.05.2016). URL: <https://dbt.arch.ethz.ch/dbt-at-venice-biennale/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [26] Doka. *Schalen wie gedruckt - Doka*. 22.07.2024. URL: <https://www.doka.com/de/news/press/schalen-wie-gedruckt> (Zugriff am 22.07.2024).
- [27] Eigner Betonmanufaktur. *EIGNER Betonmanufaktur - Wir drucken mit Beton*. 22.07.2024. URL: <https://eigner-betonmanufaktur.com/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [28] EngelsmannPeters GmbH. *Decke über Tiefgaragenabfahrt in Nördlingen - EngelsmannPeters GmbH*. 10.06.2024. URL: <https://engelsmannpeters.de/decke-ueber-tiefgaragenabfahrt-in-noerdlingen/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [29] Exclusive Bauen & Wohnen. *Baumit. BauMinator® 3D-Betondruck erstmals live*. 6.10.2017. URL: <https://www.exclusive-bauen-wohnen.at/baomit-bauminator-3d-betondruck-erstmals-live> (Zugriff am 22.08.2024).

- [30] S. Frank. *Digitale (R)evolution in der Baubranche: 3D-Drucker auf Pulverbasis*. 22.07.2024. URL: <https://www.autodesk.com/de/design-make/articles/3d-drucker-baubranche> (Zugriff am 22. 07. 2024).
- [31] G. Grassers. *Anwendungsmöglichkeiten des 3D-Betondrucks im Bauwesen*. URL: <https://www.philippaduat.com/wp-content/uploads/2021/03/61.pdf> (Zugriff am 21.07.2024).
- [32] C. Hackelsberger. *Beton: Stein der Weisen? Nachdenken über einen Baustoff*. Bd. 79. Bauwelt-Fundamente Materialfragen, Umgang mit Baustoffen. Braunschweig und Wiesbaden: Vieweg, 1988. ISBN: 352808779X.
- [33] Y. Han, Z. Yang, T. Ding und J. Xiao. „Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete“. In: *Journal of Cleaner Production* 278 (2021), S. 123884. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123884.
- [34] Handelskammer Bozen. *Progress Group 3D Innovation | Handelskammer Bozen*. 22.07.2024. URL: <https://www.handelskammer.bz.it/de/dienstleistungen/digitalisierung/praxiswissen/best-practice/progress-group-3d-innovation> (Zugriff am 22.07.2024).
- [35] K. Hanses. *Basics: Betonbau*. Basics. Basel: Birkhäuser, 2016. ISBN: 9783035612523. DOI: 10.1515/9783035612523.
- [36] K. Henke. „Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton“. Diss. Technische Universität München. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/1307185> (Zugriff am 25.07.2024).
- [37] HepcoMotion. *Gantry systems: the perfect solution for heavy loads and larger work areas*. 27.04.2022. URL: <https://www.hepcotion.in/articles/gantry-systems-the-perfect-solution-for-heavy-loads-and-larger-work-areas/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [38] C. Hofstadler, Hrsg. *Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht: 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz*. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2019. ISBN: 978-3-658-27431-3.
- [39] C. Hofstadler. *Schalarbeiten: Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 9783540851790.
- [40] IAAC Blog. *Topological optimization, CNC milling, Iaac, Reinforced Fibers, Aldo Sollazzo, MRAC*. 22.07.2024. URL: <https://www.iaacblog.com/programs/reinforced-fibers-topological-optimization-computational-design-cnc-milling-iaac/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [41] IBO. „EI KON – ENTSORGUNGSINDIKATOR FÜR BAUTEILE“. In: (2020). URL: https://www.baubook.info/de/service/downloads/ei-entsorgungsindikator/ei10_berechnungsleitfaden_v2-1_2020.pdf (Zugriff am 25.07.2024).
- [42] Ingenieur.de. *Die wichtigsten Beton-3D-Drucksysteme im Vergleich*. 2.03.2023. URL: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/wissen-bauingenieur/die-vier-wichtigsten-beton-3d-druckverfahren-im-vergleich/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [43] Interfama. *Wandschalung MAXIM Rahmenschalung Alu/Stahl | INTERFAMA*. 14.07.2023. URL: <https://www.interfama.com/gmbh/maxim-alu-stahl-wandschalung/> (Zugriff am 21.07.2024).

- [44] ITE-TU Graz. *ITE - Stahlbetondecke Nördlingen*. 23.07.2024. URL: <https://www.tugraz.at/institute/ite/forschung/prototypen/stahlbetondecke-noerdlingen> (Zugriff am 22.07.2024).
- [45] M. Kayser. *Solar Sinter - Kayser Works*. 20.11.2022. URL: <https://kayserworks.com/798817030644> (Zugriff am 20.11.2022).
- [46] B. Khoshnevis. „Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies“. In: *Automation in Construction* 13.1 (2004), S. 5–19. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2003.08.012. URL: <https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/spr16/cos598D/papers/khoshnevis04.pdf> (Zugriff am 22.07.2024).
- [47] H. Kloft, C. Gehlen, K. Dörfler, N. Hack, K. Henke, D. Lowke, J. Mainka und A. Raatz. „TRR 277: Additive Fertigung im Bauwesen“. In: *Bautechnik* 98.3 (2021), S. 222–231. ISSN: 0932-8351. DOI: 10.1002/bate.202000113.
- [48] M. Krause. *Baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN: 978-3-658-33416-1. DOI: 10.1007/978-3-658-33417-8.
- [49] R. Lachmayer, R. b. Lippert und T. Fahlbusch. *3D-Druck beleuchtet*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 978-3-662-49055-6. DOI: 10.1007/978-3-662-49056-3.
- [50] R. Lachmayer, K. Rettschlag und S. Kaierle. *Konstruktion für die Additive Fertigung 2020*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN: 978-3-662-63029-7. DOI: 10.1007/978-3-662-63030-3.
- [51] C. Leopold. „Gekrümmte Flächen und Körper“. In: *Geometrische Grundlagen der Architekturdarstellung*. Hrsg. von C. Leopold und A. Matievits. Studium. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012, S. 119–148. ISBN: 978-3-8348-1986-4. DOI: 10.1007/978-3-8348-1986-4_7.
- [52] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. Gibb und T. Thorpe. „Developments in construction-scale additive manufacturing processes“. In: *Automation in Construction* 21 (2012), S. 262–268. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580511001221> (Zugriff am 25.07.2024).
- [53] M. Lord. *Rethinking cement: Zero carbon industry plan*. Beyond Zero Emissions Inc, 2017. ISBN: 978-0-9923580-2-0.
- [54] D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Weger, C. Gehlen und B. Dillenburger. „Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges“. In: *Cement and Concrete Research* 112 (2018), S. 50–65. ISSN: 0008-8846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
- [55] D. Lowke, D. Talke, I. Dressler, D. Weger, C. Gehlen, C. Ostertag und R. Rael. „Particle bed 3D printing by selective cement activation – Applications, material and process technology“. In: *Cement and Concrete Research* 134 (2020), S. 106077. ISSN: 0008-8846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106077.
- [56] McKinsey & Company. „Reinventing construction: A route of higher productivity“. In: (2017). URL: <http://dln.jaipuria.ac.in:8080/jspui/bitstream/123456789/2898/1/mgi-reinventing-construction-full-report.pdf> (Zugriff am 22.07.2024).
- [57] V. Mechtcherine und V. N. Nerella. „3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen“. In: *Bautechnik* 95.4 (2018), S. 275–287. ISSN: 0932-8351. DOI: 10.1002/bate.201800001.

- [58] V. Mechtcherine, V. N. Nerella, F. Will, M. Näther, J. Otto und M. Krause. „Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing“. In: *Automation in Construction* 107 (2019), S. 102933. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102933.
- [59] M. Näther, V. N. Nerella, M. Krause, G. Kunze, V. Mechtcherine und R. Schach. *Beton-3D-Druck - Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton: Abschlussbericht*. Bd. F 3024. Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017. ISBN: 373880028X.
- [60] M. Näther, V. N. Nerella, M. Krause, G. Kunze, V. Mechtcherine und R. Schach. „Beton-3D-Druck - Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton: Abschlussbericht“. In: Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3024 (2017).
- [61] T. Neef, S. Müller und V. Mechtcherine. „3D-Druck mit Carbonbeton: Technologie und die ersten Untersuchungsergebnisse“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115.12 (2020), S. 943–951. ISSN: 0005-9900. DOI: 10.1002/best.202000069.
- [62] NOI Techpark Südtirol. *Sarner Erfindergeist: Wie ein Kunstschmied zum High-Tech-Unternehmer wurde - NOI*. 22.07.2024. URL: <https://noi.bz.it/de/magazine/sarner-erfindergeist-wie-ein-kunstschmied-zum-high-tech-unternehmer-wurde> (Zugriff am 22.07.2024).
- [63] M. Peck. *Atlas moderner Betonbau: Konstruktion, Material, Nachhaltigkeit*. 1. Aufl. Edition Detail. München: Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation, 2013. ISBN: 978-3-920034-95-9. DOI: 10.11129/detail.9783955531126.
- [64] Progress 3D Innovation. *Schritt für Schritt zu Ihrem 3D-Wunschobjekt*. 22.07.2024. URL: <https://www.progress-3d.com/de/3d-druckloesung> (Zugriff am 22.07.2024).
- [65] Progress 3DI. *Progress 3D-Druck Innovation*. 22.07.2024. URL: <https://www.progress-3d.com/de/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [66] Progress 3DI. *Projekte*. 23.07.2024. URL: <https://www.progress-3d.com/de/projekte> (Zugriff am 22.07.2024).
- [67] Putzmeister. *3D Printer Karlos - Turk*. 22.07.2024. URL: <https://www.putzmeister.com/web/turk/3d-printer-karlos> (Zugriff am 22.07.2024).
- [68] B. Ramesh, A. RJ, A. Singla, P. K. Chandra, V. A. Sethi und A. S. Abood. „Utilizing Generative Design Algorithms for Innovative Structural Engineering Solutions“. In: *E3S Web of Conferences* 505 (2024), S. 03010. DOI: 10.1051/e3sconf/202450503010.
- [69] N. Ranjbar, A. Balali, A. Valipour, A. Yunusa-Kaltungo, R. Edwards, G. Pignatta, R. Moehler und W. Shen. „Investigating the environmental impact of reinforced-concrete and structural-steel frames on sustainability criteria in green buildings“. In: *Journal of Building Engineering* 43 (2021), S. 103184. ISSN: 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103184. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221010421> (Zugriff am 25.07.2024).
- [70] D. Re, C. Di Biccari und A. Corallo. „A Cost Model for Additive Manufacturing in Construction“. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1101.9 (2022), S. 092014. ISSN: 1755-1307. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/9/092014.
- [71] H. A. Richard, B. Schramm und T. Zipsner, Hrsg. *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 9783658177805. DOI: 10.1007/978-3-658-17780-5.

- [72] B. Rodgers. *A 3D Printer Inspired by a Wasp Can Build Homes out of Mud*. 2016. URL: <https://cfileonline.org/video-a-3d-printer-can-now-build-houses-out-of-mud/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [73] D. Rota. *Una casa tutta d'un pezzo in Triennale | Arketipo*. 2010. URL: <https://www.arketipomagazine.it/una-casa-tutta-dun-pezzo-in-triennale/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [74] N. Roussel. *Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-Of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC*. Bd. v.36. RILEM State-Of-the-Art Reports. Cham: Springer International Publishing AG, 2022. ISBN: 9783030905354.
- [75] S. Scheerer und M. Curbach. *SPP 1542: Leicht Bauen mit Beton Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien (Abschlussbericht)*. 2022. DOI: 10.25368/2022.162.
- [76] G. Schöpf. *BauMinator von ABB - Baunit BauMinator – Zukunft in Beton - Additive-Fertigung.com*. 22.07.2024. URL: https://www.additive-fertigung.com/bericht/cc---contour-crafting_3242/baunit_bauminator_zukunft_in_beton-2018-03-27 (Zugriff am 22.07.2024).
- [77] J. Schulz. *Sichtbeton-Mängel: Gutachterliche Einstufung, Mängelbeseitigung, Betoninstandsetzung und Betonkosmetik*. 3., überarb. und aktualis. Aufl. Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1401-2. DOI: 10.1007/978-3-8348-8156-4.
- [78] D. Sher. „Digital Building Technologies 3D prints Concrete Choreography for Origen Festival in Switzerland“. In: *VoxelMatters News* (13.07.2019). URL: <https://www.voxelmatters.com/digital-building-technologies-3d-prints-concrete-choreography-for-origen-festival-in-switzerland/> (Zugriff am 25.07.2024).
- [79] A. Straßer, F. Riegger, L. D. Hamilton, T. Kränkel, C. Gehlen, M. F. Zaeh und A. Kwade. „Selective Paste Intrusion: Integration of reinforcement by WAAM — Concept and current research with special attention to cooling strategies“. In: *Construction and Building Materials* 406 (2023), S. 133236. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133236. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823029537> (Zugriff am 25.07.2024).
- [80] Y. Symonenko. „Europe’s largest 3D printed building is being constructed in Germany“. In: *COBOD International* (4.05.2023). URL: <https://cobod.com/europe-largest-3d-printed-building/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [81] Y. Symonenko. „What Are the Differences Between Robotic Arm and Gantry 3D Concrete Printer?“. In: *COBOD International* (17.05.2023). URL: <https://cobod.com/robotic-arm-vs-gantry-3d-concrete-printer/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [82] H. Thrope. *A house in Zurich questions the aesthetics of digitally-designed architecture*. 25.07.2024. URL: <https://www.wallpaper.com/architecture/dfab-house-cooper-union-eth-zurich> (Zugriff am 22.08.2024).
- [83] Total Kustom. *Total Kustom - 3D Concrete Printers*. 22.07.2024. URL: <https://www.totalkustom.com/> (Zugriff am 22.07.2024).
- [84] TU Braunschweig. „Shotcrete 3D Printing (SC3DP) – 3D-Drucken von großformatigen Betonbauteilen“. In: *Deutsche BauZeitschrift* (29.01.2019). URL: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Shotcrete_3D_Printing_SC3DP_3D-Drucken_von_grossformatigen-3303061.html (Zugriff am 10.03.2024).

- [85] Umweltbundesamt. *Die Treibhausgase*. 22.07.2024. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (Zugriff am 22. 07. 2024).
- [86] Umweltbundesamt. *Ökobilanz*. 24.07.2024. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz> (Zugriff am 24. 07. 2024).
- [87] Uniqum. *Drucktechnologie / uniqum*. 22.07.2024. URL: <https://www.uniqum.com/kopie-von-kopie-von-leistungen-mehr> (Zugriff am 22. 07. 2024).
- [88] K. Vasilic. „Additive Fertigung im Betonbau – aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen“. In: *Betonwerk Fertigteil-Technik* (26.02.2020). URL: https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Additive_Fertigung_im_Betonbau_aktuelle_Entwicklungen_und-3504753.html (Zugriff am 10. 03. 2024).
- [89] K. Vasilic, N. Hack, H. Kloft, D. Lowke, V. Mechtcherine, V. N. Nerella und T. Wangler. „Digitale Fertigung im Betonbau“. In: *Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung*. Hrsg. von K. Bergmeister, F. Fingerloos und J.-D. Wörner. Beton-Kalender. Berlin: Ernst & Sohn a Wiley brand, 2022, S. 691–724. ISBN: 9783433033449. DOI: 10.1002/9783433610879.ch10.
- [90] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie VÖZ. *Roadmap VÖZ bis 2050*. URL: https://zement.at/downloads/downloads_2022/Roadmap_VOEZ_bis_2050.pdf (Zugriff am 11. 02. 2024).
- [91] Voxeljet. *3D gedruckte Betonschalung für die Konstruktion / voxeljet*. 27.11.2023. URL: <https://www.voxeljet.de/additive-fertigung/case-studies/architektur/mit-3d-druck-effizienter-zur-komplexen-betonschalung/> (Zugriff am 22. 07. 2024).
- [92] Voxeljet. *Komplexe Betonschalung aus dem 3D-Drucker / voxeljet*. 26.07.2022. URL: <https://www.voxeljet.de/case-studies/architektur/intelligente-3d-gedruckte-betonschalungen-smart-slab/> (Zugriff am 10. 11. 2022).
- [93] E. Wakefield. „Ackerstein Industries enters Israeli construction 3D printing market“. In: *VoxelMatters News* (4.09.2023). URL: <https://www.voxelmatters.com/ackerstein-industries-enters-israeli-construction-3d-printing-market/> (Zugriff am 22. 07. 2024).
- [94] WASP. *Concrete 3D Printer Delta WASP 3MT Concrete*. 23.01.2024. URL: <https://www.3dwasp.com/en/concrete-3d-printer-delta-wasp-3mt-concrete/> (Zugriff am 22. 07. 2024).
- [95] R. Weber, Hrsg. *Guter beton: Ratschläge für die richtige Betonherstellung*. 24th ed. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 1967. ISBN: 3-7640-0587-4. URL: <https://permalink.obvsg.at/> (Zugriff am 25. 07. 2024).
- [96] D. Weger. „Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion – SPI“. Diss. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1540336/document.pdf> (Zugriff am 22. 07. 2024).
- [97] S. Weidner, A. Mrzigod, R. Bechmann und W. Sobek. „Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 116.12 (2021), S. 969–977. ISSN: 0005-9900. DOI: 10.1002/best.202100065.
- [98] R. Wolfs, F. P. Bos und T. Salet. „Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion“. In: *Cement and Concrete Research* 119 (2019), S. 132–140. ISSN: 0008-8846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.02.017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618310482>.

- [99] WWF. *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie*. URL: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf (Zugriff am 14. 07. 2024).
- [100] XtreeE. *Krypton, a column in Aix-en-Provence - XtreeE*. 25.07.2024. URL: <https://xtreee.com/en/project/krypton/> (Zugriff am 25. 07. 2024).
- [101] H.-T. Yau und C.-W. Hsu. „Nesting of 3D irregular shaped objects applied to powder-based additive manufacturing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 118.5-6 (2022), S. 1843–1858. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-021-07954-y.
- [102] F. Zunino. „A two-fold strategy towards low-carbon concrete“. In: *RILEM Technical Letters* 8 (2023), S. 45–58. ISSN: 2518-0231. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2023.179.

Anhang A: Interviewleitfaden

Einführung

Im Rahmen der Diplomarbeit „3D-Betondruck - Baubetriebliche Analyse unterschiedlicher Druckverfahren“ wurde dieser Interviewleitfaden verwendet, um detaillierte Einblicke in die praktischen Erfahrungen und Einschätzungen von Fachleuten aus der Baubranche zu gewinnen. Die gewonnenen Daten sollten helfen, die Potenziale und Herausforderungen des 3D-Betondrucks zu identifizieren und zu bewerten.

Der Interviewleitfaden war darauf ausgerichtet, allgemeine Fragen zu beantworten, technische und wirtschaftliche Aspekte zu klären, zukünftige Entwicklungen zu prognostizieren und Antworten auf forschungsspezifische Fragen zu finden. Blieben im Rahmen der Interviews Fragen offen, wurden diese durch gezielte Schlussfragen abgedeckt.

Zielgruppen

Interviews wurden mit Vertretern folgender Zielgruppen geführt:

- 3D-Druck-Unternehmen – SPI-Verfahren
- 3D-Druck-Unternehmen – 3DCP-Verfahren
- Bauunternehmen mit 3D-Druck Erfahrung

Die Ergebnisse der Interviews sind in die Analyse der Diplomarbeit eingeflossen und haben wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung und Anwendung des 3D-Betondrucks im Bauwesen geliefert.

Allgemeine Fragen

- A1. Können Sie sich bitte kurz vorstellen und Ihre Position sowie Ihre Erfahrungen im Bereich des 3D-Betondrucks erläutern?
- A2. Seit wann arbeiten Sie mit 3D-Betondrucktechnologien und welche Projekte haben Sie in diesem Bereich betreut?
- A3. Welche Vorteile sehen Sie in der Anwendung von 3D-Betondruck im Vergleich zu konventionellen Bauverfahren?

Technische Aspekte

- B1. Welche Materialien verwenden Sie hauptsächlich für den 3D-Betondruck und warum?
- B2. Welche technischen Herausforderungen treten bei der Verwendung dieser Materialien auf?
- B3. Welche Druckverfahren (z.B. 3DCP, SPI) setzen Sie ein und in welchen Kontexten?

Wirtschaftliche Aspekte

- C1. Wie schätzen Sie die Kostenentwicklung für 3D-Betondruck im Vergleich zu traditionellen Bauverfahren ein?
- C2. In welchen Bereichen sehen Sie das größte wirtschaftliche Potenzial für den 3D-Betondruck?
- C3. Welche Faktoren beeinflussen die Wirtschaftlichkeit von 3D-Betondruckprojekten am meisten?

Zukünftige Entwicklungen

- D1. Welche Entwicklungen und Innovationen erwarten Sie in den nächsten fünf Jahren im Bereich des 3D-Betondrucks?
- D2. Wie sehen Sie die Rolle von 3D-Betondruck in der zukünftigen Bauindustrie?
- D3. Welche Forschungsthemen halten Sie für besonders relevant, um den 3D-Betondruck weiter voranzutreiben?

Forschungsfragen-spezifisch

- E1. Wie beeinflusst die Implementierung von 3D-Betondruckverfahren die Bauzeit im Vergleich zu traditionellen Bauweisen?
- E2. Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Integration von 3D-Betondruck in bestehende Bauprozesse und -normen?
- E3. Inwiefern trägt der 3D-Betondruck zur Nachhaltigkeit und Materialeffizienz im Bauwesen bei?

Schlussfragen

- F1. Gibt es noch weitere Aspekte oder Themen, die Sie im Zusammenhang mit dem 3D-Betondruck als wichtig erachten und die wir bisher nicht angesprochen haben?
- F2. Möchten Sie abschließend noch etwas hinzufügen oder anmerken?

Danksagung