Auguste-Pattberg-Gymnasium
Seminarkurs: Frieden und Ökologie
Leitung: Christian Kaiser, Frank Rückert, Simon Baumbusch
Schuljahr 2024/25

Kann der 3D-Druck das Bauwesen revolutionieren?

Vorgelegt von:
Jakob F. Ritter
Silvester-Herzog-Straße 4
74821 Mosbach-Neckarelz
Mobil: 01512 2250 290
E-Mail: jakob@ritter-neckarelz.de
Abgabedatum: 24.06.2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Abbildungsverzeichnis 3
1 Einleitung 4
2 Theorien und Konzepte 6
2.1 Indirekter Druck 6
2.2 Metalldruck 7
2.3 Kunststoffe 9
2.4 Druck mit Hilfe von Drohnen 11
3 Druck im Betonextrusionsverfahren 13
3.1 Technik und Funktionsweise 13
3.2 Materialien 16
4 Analyse 19
4.1 Einsparung von Ressourcen beim Bau 19
4.2 Verwendung nachhaltiger und recycelter Materialien 20
4.3 Innovative Architektur 22
5 Kritische Betrachtung und Diskussion 25
6 Fazit und Ausblick 30
7 Literaturverzeichnis 31
8 Literaturverzeichnis (Abbildungen) 36
9 Eidesstattliche Erklärung 37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erstes 3D-gedrucktes Gebäude Deutschlands in Beckum mit runden Ecken (vgl. HeidelbergMaterials). 4
Abbildung 2: 3D-Druck mit Formsand als Trägermaterial bei der Gießerei Blöcher GmbH (vgl. Gießerei Blöcher). 6
Abbildung 3: MX3D-Stahlbrücke in Amsterdam (vgl. MX3D). 9
Abbildung 4: Zwei-Drohnen-System: links – scannende Drohne; rechts – Drohne beim Druck (vgl. TU München). 12
Abbildung 5: COBOD BOD2 während der Installation (vgl. Kraus-Heidelberg). 13
Abbildung 6: Darstellung der maximal möglichen Überhänge der einzelnen Raupen (vgl. Matthäus, S. 49). 15
Abbildung 7: Hohlräume in den Wänden beim Druck des Wavehouses (vgl. Kraus). 20
Abbildung 8: Wavehouse in Heidelberg (vgl. Kraus) 28

1 Einleitung

Die Digitalisierung ist in alle Bereiche unseres Lebens vorgedrungen. Lediglich das Bauwesen, welches zu den zentralen Säulen unserer modernen Gesellschaft zählt und eng mit globalen Herausforderungen wie Urbanisierung, Wohnraummangel und Klimawandel verknüpft ist, ist seit fast 100 Jahren unverändert geblieben. Darum steht die Branche heute unter zunehmendem Druck, da konventionelle Bauprozesse meistens zeit– und ressourcenintensiv sind und damit ein erheblicher Materialverbrauch und ein daraus resultierender hoher CO_2 Ausstoß verbunden sind. Mittlerweile haben sich die demographischen Umstände gewandelt und so ist in vielen Ländern ein Fachkräftemangel entstanden. Aber die Nachfrage an effizienten, nachhaltigen und individualisierten Bauten ist gestiegen.

Eine Lösung, um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, kann möglicherweise der 3D-Druck werden. Da dieses additive Fertigungsverfahren in anderen Bereichen wie der Industrie im Maschinenbau und in der Medizintechnik schon zum Einsatz kommt und diese Bereiche grundlegend verändert hat, wird nun versucht, diese Methode in das moderne Bauwesen zu übertragen. So wurden in den letzten Jahren bereits weltweit Gebäude mithilfe von 3D-Druckern errichtet und haben gezeigt, dass mit dieser Methode sowohl Material, Zeit und Arbeitskräfte eingespart werden können. Abbildung 1 zeigt das erste, 2020 errichtete Haus in Deutschland. Wie zu sehen, sind neue architektonische Freiheiten und höhere Präzision in der Ausführung möglich.

Abbildung 1: Erstes 3D-gedrucktes Gebäude Deutschlands in Beckum mit runden Ecken (vgl. HeidelbergMaterials).

Diese Seminararbeit widmet sich daher der Frage: Kann der 3D-Druck das Bauwesen revolutionieren? Ziel ist es, diese Frage auf Grundlage von technischen, wirtschaftlichen, ökologischen als auch gesellschaftlichen Aspekten zu beantworten. Dazu werden zunächst die Grundlagen und die Funktionsweise des 3D-Drucks im Bauwesen erläutert und anschließend die am häufigsten verwendete Technik analysiert. Potenzielle Vorteile werden kritisch beleuchtet, aber auch Herausforderungen und Limitationen diskutiert.

Am Ende steht eine fundierte Einschätzung, inwieweit der 3D-Druck das Bauwesen wirklich revolutionieren kann und welche Rahmenbedingungen dazu gegeben sein müssen.

2 Theorien und Konzepte

2.1 Indirekter Druck

Der indirekte 3D-Druck stellt im Gegensatz zum direkten 3D-Druck eine Bauweise dar, bei der nicht das gewünschte Bauteil selbst Schicht für Schicht aufgebaut wird, sondern zunächst eine Form, also ein Negativmodell des gewünschten Bauteils gedruckt wird. Dieses Negativ wird meist aus preisgünstigen und leicht verarbeitbaren Materialien wie Kunststoff, Wachs, Gips oder anderen speziellen Formbaumaterialien gefertigt. Im Anschluss an den Druck dieser Form wird diese mit dem eigentlichen Baustoff, der meistens aus speziellem Beton oder Mörtel besteht, ausgegossen. Nach dem Aushärten wird die Form entfernt. Dies geschieht meist mechanisch (beispielsweise durch Zerbrechen oder Abziehen) oder teilweise auch chemisch (auflösen eines löslichen Trägermaterials) (vgl. Sika). Oder es wird, wie in Abbildung 2 zu sehen, ganz klassisch Formsand zum Drucken verwendet, aus dem das Werkstück einfach herausgelöst werden kann (vgl. Voxeljet).

Abbildung 2: 3D-Druck mit Formsand als Trägermaterial bei der Gießerei Blöcher GmbH (vgl. Gießerei Blöcher).

Das Verfahren des indirekten Drucks wird als verlorene Schalung bezeichnet, da man die gedruckte Form in der Regel nur einmal verwenden kann und sie danach entsorgt werden muss. Im Unterschied zu klassischen Schalungstechniken ermöglicht der indirekte 3D-Druck eine wirtschaftlich tragbare und präzise Umsetzung komplexer Geometrie (vgl. Dr.-Ing. Weger, Daniel et. al. S.4).

Die indirekte 3D-Drucktechnologie eignet sich besonders für die Herstellung von Fassadenelementen, Gewölben, Kuppeln oder anderen nicht tragenden Strukturelementen. Zunehmend werden aber auch tragende Bauteile (Stützen, Pfeiler, Sockel etc.) mit

dieser Methode realisiert. Dadurch ist der Einsatz unter anderem bei Sonderbauteilen für Brücken, vorgefertigte Wandelemente, Fundamente aber auch gestalterisch anspruchsvollen Elementen wie Treppen oder Einbaumöbel, die durch ein Gießverfahren realisiert werden können, denkbar (vgl. Voxeljet).

Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit der Vorproduktion in einer Produktionshalle, da hier die Bauteile, unter kontrollierten Bedingungen und damit unabhängig von Witterungseinflüssen hergestellt werden können. Dies ist vor allem für Hochleistungsmaterialien wichtig, die unter bestimmten Bedingungen erhärten müssen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Anschließend werden die Bauteile zur Baustelle transportiert und dort verbaut – ähnlich dem Prinzip von Fertighäusern. Dadurch können Bauzeiten (wie bei Fertighäusern) minimiert, aber durch die kontrollierten Bedingungen eine viel höhere Bauqualität gewährleistet werden.

2.2 Metalldruck

Da Metall im konventionellen Bauwesen mittlerweile eine zentrale Rolle spielt - etwa im Hochbau, bei der Fassadengestaltung oder im Brückenbau - erscheint es nur logisch dieses Material auch für den 3D-Druck im Bauwesen zu nutzen. Dabei existieren inzwischen zwei verschiedene additive Fertigungsmethoden, die je nach Anwendung, Material und Bauteilgröße angewandt werden können:

Das selektive Laserschmelzen (SLM, Selective Laser Melting) bzw. das Elektronenstrahlschmelzen (EBM, Electron Beam Melting) scheinen sich auf den ersten Blick kaum zu unterscheiden, da sie beide auf dem Prinzip basieren, dass feines Metallpulver schichtweise auf ein Druckbett aufgetragen und durch eine punktuelle Energiequelle - entweder einen Laserstrahl (SLM) oder einen Elektronenstrahl (EBM) - selektiv aufgeschmolzen werden (Pulverbettverfahren). Dadurch können hochpräzise und dichte Metallstrukturen gebildet werden. Die Technik ist daher für bestimmte Legierungen (z.B. Titan) besonders geeignet.

Allerdings arbeitet das SLM-Verfahren unter einer Schutzgasatmosphäre, während das EBM ein Vakuum erfordert. Der Hauptnachteil dieses Verfahrens ist die Beschränkung der Größe auf das Ausmaß der verfügbaren Baukammer. Darum werden sie entsprechend zur Herstellung kleinerer, filigraner und hochkomplexer Strukturelemente, wie etwa

Verbindungsknoten, Trägeraufnahmen oder dekorativer Fassadenelemente eingesetzt. Im Bereich der Restauration historischer Bausubstanzen kann dieses Verfahren wertvolle Dienste leisten. So wurde in der Schweiz beispielsweise ein historisches Gitter rekonstruiert, dessen dekorative Würfelkapitel durch Korrosion stark beschädigt waren oder komplett fehlten. Durch den 3D-Druck konnten diese detailgetreu und kostengünstiger als im herkömmlichen Metallguss nachgebildet werden, da keine aufwändigen Gussformen notwendig waren (vgl. Mehl).

Darüber hinaus lassen sich mit diesem Verfahren individuell gestaltete Oberflächen und Ornamente produzieren, was insbesondere der Innenarchitektur neue, kreative Möglichkeiten eröffnet. So können Spezialteile personalisiert und in Kleinserien gefertigt werden, ohne dass wirtschaftliche Nachteile entstehen.

Bei großskaligen Anwendungen empfiehlt sich das sogenannte Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Bei diesem Verfahren wird kein Pulver, sondern ein Metalldraht (wire) verwendet, der mithilfe eines Lichtbogens (arc) - ähnlich wie beim konventionellen Schweißen - aufgeschmolzen und anschließend Schicht für Schicht aufgetragen wird. Somit wird die Produktion deutlich größerer Metallstrukturen im Freien ohne geschlossene Baukammern ermöglicht. Dadurch wird es besonders im Brückenbau, bei Trägerstrukturen oder bei großvolumigen Skulpturen attraktiv (vgl. MX3D).

Ein Beispiel, bei dem diese Technologie genutzt wurde, ist die MX3D-Stahlbrücke in Amsterdam, die 2021 offiziell eröffnet wurde (s. Abb.3). Die Brücke ist 12,5 m lang und wurde von vier industriellen Roboterarmen mit integrierten Schweißbrennern gefertigt. Diese Brücke, die mit ihren organischen und von natürlichen Strukturen inspirierten Form direkt ins Auge sticht, wäre mit herkömmlichen Verfahren nur sehr schwer realisierbar gewesen (vgl. MX3D).

Abbildung 3: MX3D-Stahlbrücke in Amsterdam (vgl. MX3D).

Die Herausforderungen bei dieser Methode sind, dass die Oberfläche grob ist und somit häufig nachgearbeitet werden muss. Details können deutlich weniger herausgearbeitet werden als bei den Pulverbettverfahren. Die entstehenden Schweißnähte können außerdem strukturell problematisch werden. Darum bedarf es spezieller Softwarelösungen und Echtzeitüberwachung, um stabile und präzise Ergebnisse zu gewährleisten (vgl.MX3D).

2.3 Kunststoffe

Im Gegensatz zu Metallen, die aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Beständigkeit häufig für tragende Bauteile verwendet werden, sind Kunststoffe in der Regel weniger stabil, besitzen eine geringere Druck- und Zugfestigkeit und werden von UV- Strahlung und Witterungseinflüssen wie Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen etc. stark angegriffen. diese Faktoren schränken die Nutzung im Außenbereich deutlich ein (vgl. Dr. Vergin S.6) Trotz dieser Einschränkungen werden Kunststoffe im Bauwesen eingesetzt:

Ein Anwendungsfeld ist der Druck von Fassadenelementen oder Verkleidungen, da der Kunststoff durch seine gute Formbarkeit und sein geringes Gewicht, aber auch seine farbliche Varianz schöne Ergebnisse liefern kann, ohne die Tragestruktur des Gebäudes zu stark zu belasten. Diese können mit Hilfe des 3D-Drucks zu „intelligenten“ Fassadenelementen werden, die bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen mehr oder we-

niger Licht ins Innere des Gebäudes lassen und dadurch das Raumklima positiv beeinflussen (vgl. Edelmann).

Ein weiteres Feld ist in der Innenarchitektur zu finden, da hier das Problem mit den Witterungseinflüssen entfällt. Der Kunststoff wird zum Beispiel in Form von Trennwänden, Lichtinstallationen oder dekorativen Bauelementen genutzt und kann voll zur Geltung kommen. Aus den vielfältigen Kunststoffen lassen sich auch wärme- oder schalldämmende Bauteile erschaffen (vgl. Edelmann).

Ein zukunftsweisendes Feld ist der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen mit beispielsweise Carbon- oder Glasfasern. Dadurch kann die Festigkeit des Kunststoffes deutlich erhöht werden, und es können auch tragende Bauteile erstellt werden (vgl. Michalke).

Ein besonders wichtiger Aspekt bei der Verwendung von Kunststoffen ist das Recycling, da diese sich wieder verwenden lassen und somit in immer neue Bauprozesse integriert werden können. So können beispielsweise Ozeanplastik wie alte Fischernetze recycelt werden und mit Hilfe des 3D-Drucks in neue Fassadenelemente umgewandelt werden. Allerdings ist die Qualitätssicherung solcher Recyclingkunststoffe eine erhebliche Herausforderung, da Verunreinigungen, Materialalterung oder Inhomogenität die Eigenschaften des Endprodukts negativ beeinflussen können (vgl. Michalke S.20-23).

Außerdem gibt es bereits sogenannte kompostierbare Kunststoffe, die eben auf natürlichem Wege in Erde umwandelbar sind. Dazu gehört beispielsweise PLA (Polymilchsäure). Diese Materialien werden häufig jetzt schon mit natürlichen Materialien, wie Holz gemischt und erzielen so eine noch höhere ökologische Verträglichkeit (vgl. Michalke S.11-12). Außerdem beeinflusst das beigemischte Material die Eigenschaft. So wird mit beigemischtem Holz beispielsweise die Dämmfähigkeit des Materials deutlich verbessert (vgl. Michalke S.16-17).

Im Bereich der Kunststoffe ist die Materialforschung noch in den Anfängen. Die Einsatzmöglichkeiten können deutlich erweitert werden. So wird beispielsweise an biologisch abbaubaren oder selbstheilenden Kunststoffen gearbeitet, die nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern auch funktionaler verwendet werden können (vgl. Michalke S.11).

2.4 Druck mit Hilfe von Drohnen

Um auch in schwer zugänglichen oder ökologisch sensiblen Naturräumen bauen zu können, wird derzeit intensiv an neuartigen Bauverfahren geforscht. Der Einsatz autonomer Drohnen, die mit Druckdüsen und Materialbehältern ausgestattet sind, gehört zu einer besonders vielversprechenden Methode. Diese speziellen Drohnen tragen Baumaterialien wie Spritzbeton Schicht für Schicht auf. Dabei wird besonders auf leichte und schnell aushärtende Materialien gesetzt. Die Drohnen werden mit Hilfe von künstlicher Intelligenz gesteuert, wodurch sie als Schwarm agieren und koordiniert zusammenarbeiten. Dieses Prinzip wurde bei sozialen Insekten wie beispielsweise Wespen in der Natur abgeschaut, die durch ihre kollektive Zusammenarbeit Nester errichten. Genau wie bei Wespen sollen sich die Drohnen mit unterschiedlichen Rollen untereinander abstimmen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen (vgl. TU München).

Ein Vorteil dieser Technologie ist die Flexibilität, da Drohnen an schwer erreichbaren Stellen und großen Höhen Reparaturarbeiten leisten können, ohne dass Gerüste oder Kräne aufgestellt werden müssen. An der Technischen Universität München sowie an der Bauhaus-Universität Weimar wird dazu Forschung betrieben. (vgl. TU München).

Diese Projekte sind jedoch hochkomplex, da sie Kompetenzen aus Bauingenieurwesen, Robotik und Informatik vereinen. Außerdem ist die Umsetzung dieser innovativen Bauweise noch in den Kinderschuhen, da die Tragfähigkeit der Drohnen bislang sehr begrenzt ist, was die Menge an transportierbarem Material erheblich einschränkt. Des Weiteren stellen wechselnde Wetterbedingungen wie starker Wind erhebliche Hürden dar. Um diese Probleme zu lösen, testet die TU München Drohnen mit integrierten, beweglichen Roboterarmen, die kleine Positionsabweichungen korrigieren können. Außerdem wird auf ein Zwei-Drohnen-System gesetzt, bei dem ein Drohnentyp den Bauprozess durchführt und der zweite Drohnentyp jeden Baufortschritt kontrolliert und misst (s. Abb.4), um eventuelle

Korrekturmaßnahmen sofort in den Prozess einzusteuern. Dennoch bietet diese Technologie enormes Potenzial für die Zukunft des Bauwesens, da Eingriffe in das Ökosystem minimiert werden (vgl. Technische Universität München).

Abbildung 4: Zwei-Drohnen-System: links – scannende Drohne; rechts – Drohne beim Druck (vgl. TU München).

3 Druck im Betonextrusionsverfahren

3.1 Technik und Funktionsweise

Die Funktionsweise der Additiven Fertigung (unabhängig von der Materialart), die die Grundlage für den 3D-Druck im Bauwesen ist, ist simpel. Man gibt Material durch eine Düse, die dieses in sogenannten Raupen ablegt und so Schicht für Schicht ein Bauwerk aufbaut. Die Düse muss sich allerdings in drei Richtungen bewegen können, um ein dreidimensionales Gebäude zu erschaffen. Die Herausforderung ist also das Bewegen der Düse zur richtigen Zeit in die richtige Richtung. Dazu werden zuvor CAD-Modelle (Computer Aided Design-Modelle) des fertigen Gebäudes erstellt und diese dann mittels einer Slicer-Software (Download vgl. PrusaSlicer | Original Prusa 3D-Drucker direkt von Josef Prusa) in einzelne Schichten aufgeteilt. Außerdem werden die Fahrwege des Druckers samt der zugehörigen Extrusionsmenge in jeder Schicht optimiert. Diese Anweisungen werden dann an den Drucker weitergeleitet, der das Gebäude oder Bauteil Schicht für Schicht auftragen kann (vgl. Matthäus S.54-55).

Die technische Umsetzung des Betondruckers kann sehr variieren. Zum einen können große Metallgestelle aufgebaut werden, die dann das Gebäude begrenzen und die Düse fährt an den einzelnen Achsen entlang (x-, y- und z-Achse) (vgl. Alves S.13). Dies ist die am häufigsten genutzte Methode und Drucker, die mit dieser Technik arbeiten, werden beispielsweise von der dänischen Firma COBOD entwickelt (vgl. COBOD; s. Abb.5).

Abbildung 5: COBOD BOD2 während der Installation (vgl. Kraus-Heidelberg)

Zum andern gibt es Methoden, bei denen man lediglich eine herkömmliche Autobetonpumpe benötigt, die dann mit einer passenden Software und einem passenden Druckkopf ausgestattet wird und sich so mit nur einem Arm in alle drei Richtungen bewegen kann. Hierzu wurde in Folge einer Machbarkeitsstudie bereits 2014 die Firma CONPrint3D gegründet, um diese Methode weiterzuentwickeln (vgl. Vollmer).

Das Baummaterial (hier Beton) wird durch Schläuche in den Düsenkopf geleitet, in dem eine Exzenterschnecke sitzt, die dafür sorgt, dass die gewünschte Materialmenge aufgetragen werden kann (vgl. Näther S.40-41). Um diese Exzenterschnecke muss ein Kühlsystem arbeiten, welches dafür sorgt, dass diese nicht überhitzt und die Temperatur auf 33°C begrenzt. Aufgrund der Reibung entsteht eine hohe Wärme im Düsenkopf, die zu einem frühen Erstarren des Baumaterials führen kann und so den Düsenkopf verstopft (vgl. Matthäus S.24).

Um das Baumaterial zu extrudieren, wird eine Düse benötigt. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Düsenformen, um entsprechende Raupengeometrien zu erreichen, z.B. rechteckige oder quadratische Materialauslässe (vgl. Matthäus S. 40). Diese extrudieren sogenannte Profilraupen, welche vor allem bei höheren Fließgrenzen des Frischbetons einen sehr guten Verbund an den Stoßfugen bilden. Allerdings stellt sich bei geneigten Oberflächen ein Treppenmuster ein. Die häufigste Düsenform ist eine runde Düse, da diese an Ecken oder ähnlichem nicht gedreht werden muss und Fehlstellungen einzelner Raupen durch Folgeschichten sehr gut ausgeglichen werden. Mit der runden Düse werden aktuell die besten Ergebnisse im Hinblick auf die geometrische Freiheit, die Oberflächenqualität und die Festigkeit erzielt. Die Oberfläche zeigt später typische Wulststrukturen auf, die, wenn gewünscht, im Nachgang verspachtelt werden können. Matthäus empfiehlt, Düsen mit nach unten gerichteter Öffnung zu verwenden. Dies geht am einfachsten bei runden Auslässen. Bei allen Düsenformen gilt jedoch, dass große Düsen zwar einen schnelleren Baufortschritt garantieren. Mit kleinen Düsen kann jedoch genauer gearbeitet werden und die Auflösung der Oberflächenqualität ist höher. Matthäus erläutert weiter, dass die minimale Schichtstärke von Seiten des Materials durch das Größtkorn bestimmt wird. Eine Verringerung der Schichthöhe kann auch zu mehr Stabilität beitragen. Wenn man allerdings mit Rundraupen arbeitet, muss man beachten, dass schmale Raupen die Stabilität beeinträchtigen. Dies gilt besonders in Bereichen von Überhängen (vgl. Matthäus S. 47-53).

Die Überhänge können generell, nur, wie in Abbildung 6 dargestellt, bis zu einer Schräge von 30° angewendet werden, da sonst der Schichtenverbund nicht gut genug ist (vgl. Matthäus S.49).

Abbildung 6: Darstellung der maximal möglichen Überhänge der einzelnen Raupen (vgl. Matthäus, S. 49).

Dieses Problem ist von den 3D-Druckern für den Hausgebrauch bekannt. Um allerdings in Häusern Fenster oder Türen einzubauen, wird meistens ein 90° Winkel zur Mauer benötigt. Man muss also für diese Wandöffnungen eine Hilfskonstruktion schaffen, um einen solchen Überhang überhaupt realisieren zu können. Dies geschieht meistens in Form von einfachen Brettern, die nach dem Erstarren des Materials wieder entfernt werden (vgl. Alvis S.40). Wenn man über mehrere Stockwerke baut, so werden lediglich die Wände gedruckt und nach jedem Stockwerk eine neue Decke – beziehungsweise Bodenplatte aufgesetzt. Für diese Zwischengeschosse werden so genannte Hohlkernbetonplatten verwendet, die direkt auf die Wände gelegt werden. Voraussetzung dafür ist, dass die darunter gelegene Wandkonstruktion genug ausgehärtet ist. Anschließend kann auf diesen Platten weitergedruckt werden (vgl. Alves S.42).

Bei einer anderen Technik wird Metalloxid in Pulverform einem Gemisch aus unterschiedlichen Gesteinen beigemischt und dann schichtweise aufgebracht. Anschließend wird das Ganze mit einer Salzlösung besprüht, die mit dem Metalloxid zu einem Bindemittel reagiert. So entsteht in einem Umwandlungsprozess in ca. einer Stunde aus körnigem Sand Sandstein. Die nachfolgenden Schichten können aufgetragen werden, während die Reaktion in den darunter gelegenen Schichten noch abläuft. Diese

Methode ist weniger auf den herkömmlichen Wohnhausbau ausgelegt, da sie sehr langsam vonstattengeht. Zukunftsweisend - oder revolutionär - ist der Gedanke, aus Mondstaub eine Mondbasis zu bauen oder aus Sand in der Wüste Gebäude entstehen zu lassen. Hierauf wird in Abschnitt 4.2 näher eingegangen (vgl. Alves S.14-15).

Damit keine kalte Verbindung (Cold Joint) entsteht, muss ununterbrochen gedruckt werden, damit sich der frisch aufgetragene Beton mit der darunter liegenden Schicht verbinden kann. Da aber nicht zu jeder Tageszeit gearbeitet werden darf, wird eine Paste auf die schon erkaltete Schicht aufgetragen, auf die dann weitergedruckt werden kann. Diese Paste geht eine Verbindung mit beiden Schichten ein und sichert somit den Zusammenhalt des Gebäudes (vgl. Matthäus S.10-12).

3.2 Materialien

Das Betonmaterial, welches zum 3D-Druck genutzt wird, muss verschiedenen Anforderungen gewachsen sein. Zum einen sollte er ausreichend fließfähig sein, um eine gute Ausbringung an der Düse zu gewährleisten und zum anderen eine ausreichende Standfestigkeit aufweisen, um schnell Struktur aufzubauen und darüber gelegene Schichten tragen zu können. Das Material bestimmt die Druckgeschwindigkeit. Hier gilt: Je länger die Wartezeit zwischen den Schichten, desto höher ist die Festigkeit der darunter gelegenen Schicht und damit auch die Stabilität der gesamten Wand. Für einen guten Verbund zwischen den einzelnen Schichten, müssen diese möglichst „frisch in frisch“ aufgebracht werden, da sich dadurch die einzelnen Schichten besser verbinden. Die Druckgeschwindigkeit muss also an das Material angepasst werden, sodass ein Einklang zwischen Verformungsfestigkeit und Schichtverbund entsteht.

Baut man zu schnell in die Höhe, kann es passieren, dass die unteren Schichten durch zu geringe Wartezeiten noch nicht ausreichend erstarrt sind und dadurch von den oberen Schichten zerdrückt werden. Dies führt zu einem Absacken eines Anteils. Baut man zu langsam, verbinden sich die einzelnen Schichten nicht ausreichend miteinander, sodass auch hier die Stabilität eingeschränkt ist (vgl. Matthäus). HeidelbergMaterials gibt als Eigenschaften für sein 3D-Druck-Material eine Druckgeschwindigkeit von ca. 15-25 cm/s und eine Layertime von 3-15 Minuten an, um optimale Ergebnisse zu erreichen. Die maximale Druckfestigkeit wird außerdem nicht sofort nach dem Aufbringen erreicht. Diese verändert sich wie bei normalem Beton mit der Zeit, die er zum Erhärten hat.

Nach 28 Tagen erreicht deren Material eine Druckfestigkeit von mehr als 45 MPa und gehört damit der Festigkeitsklasse C35/45 an (vgl. evoBuild 3D-Druck - Hightech-Material für den 3D-Betondruck).

Die Anforderungen an das Material lassen sich während des Druckprozesses in unterschiedliche Phasen einteilen. Während das Material gefördert wird, sollte es möglichst flüssig sein, um eine gute und einfache Verarbeitung zu gewährleisten und Verstopfungen der Düse zu verhindern. Nachdem das Material aus der Düse ausgetreten ist, sollte es eine ausreichende Formtreue besitzen, um nicht zu verlaufen. Das Material muss also sehr schnell erhärten können, darf aber gleichzeitig einen gewissen Grad der Erhärtung noch nicht so schnell erreichen, da sonst der Schichtverbund nicht ausreichend gewährleistet ist. Problematisch wird es, wenn das Material bereits im Drucker beginnt, auszuhärten. Dies kann geschehen, wenn ein großes Objekt gedruckt wird entsprechend viel Material während des Druckprozesses benötigt wird. Dann wird das Material mit der Zeit zunehmend plastisch. Dadurch können die oberen Schichten mit schlechterer Qualität entstehen als die zuvor gedruckten unteren Schichten. Das Material kann also nicht auf Vorrat gehalten werden, sondern muss jederzeit frisch geliefert werden. Das hat zur Folge, dass ein genauer Zeitplan ausgearbeitet werden muss, wann das Material anzuliefern ist (vgl. Matthäus S.39). Der Druckvorgang darf deshalb nie länger als 30 Minuten unterbrochen werden (vgl. Alves S.39), da der Beton im System ansonsten aushärtet und die Leitungen verstopft. Als Verarbeitungszeit gibt HeidelbergMaterials für Material 20 Minuten bei einer Temperatur von 10-30 °C an (vgl. Matthäus).

In das Material von HeidelbergMaterials wurde außerdem Blähglasgranulat eingearbeitet, um Hohlräume und dadurch eine erhöhte Dämmfähigkeit zu erreichen (vgl. HeidelbergMaterials und Matthäus). Eine andere Möglichkeit, um Hohlräume zu schaffen, ist der Luftporenstabilisierer. Hierbei muss auf die Konsistenz des Materials geachtet werden, da die Luftporen, wenn das Material zu flüssig ist, zerfallen und so nicht die gewünschte Wirkung erreicht werden kann. Wenn das Material allerdings zu fest ist, sind zwar die Luftblasen im Beton, allerdings wird dadurch die Oberflächenqualität beeinträchtigt und es kann zu Rissen kommen. Generell gilt, dass ein Kompromiss zwischen Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit gefunden werden muss, da die Wärmeleitfähigkeit zwar abnimmt, wenn mehr Luft eingearbeitet wird. Allerdings nimmt dann die Druckfestigkeit ab, wodurch ein Konflikt entsteht. (vgl. Matthäus S.38).

Da gedruckter Beton, genau wie der gegossene, brüchig ist und wenig Spannung aushalten kann, werden teilweise Fasern in die Zementpaste mit eingearbeitet, um die Sprödigkeit und das Zugverhalten des Materials zu verbessern. Aktuell wird daran gearbeitet, Roboterarme einzusetzen die Stahlverstärkungen einbringen, um eine Verbesserung der Zugfestigkeit zu erhalten. Allerdings ist diese Bauart bisher wenig erprobt und noch nicht ausreichend durchdacht, um auf Bauwerke angewandt zu werden. (vgl. Filzwieser).

Ein entscheidender Faktor für die Bauzeit ist die Witterung. Während der Betondruck relativ temperaturenunabhängig ist (Apis Cor wirbt damit, dass sie schon bei Temperaturen von -35 °C erfolgreich ein Haus gedruckt haben (vgl. Alves S.50)), gibt es starke Einschränkungen in Bezug auf den Niederschlag und den Wind während des Bauvorgangs. Wenn zu viel Niederschlag fällt, verwässert der Beton, somit wird die Stabilität beeinträchtigt, und frische Schichten können verlaufen. Der Wind wird außerdem zum Problem, wenn große Wände gedruckt werden und er auf noch nicht vollständig ausgehärtete Schichten trifft. Dadurch kann es im Extremfall zu einem Kippen der Wand kommen. Wenn der Wind direkt an der Düse auftrifft, werden Unschärfen in der neu gedruckten Schicht verursacht und dadurch die Präzision geschwächt (vgl. Alves S.48/59).

Ein Vorteil von 3D-Druckbeton ist, dass er nicht mit anderen Materialien vermischt wird und dadurch als mineralisches Material zu 100% recycelbar ist. Das Recycling gestaltet sich bei Mischungen wesentlich schwieriger, weshalb meistens darauf gesetzt wird, keine anderen Materialien wie Fasern oder Metall in den Beton einzuarbeiten. (vgl. Dr.- Ing, Weger).

4 Analyse

4.1 Einsparung von Ressourcen beim Bau

Von den 380 Millionen Tonnen Abfall, die es in Deutschland 2023 gab, wurden 52% als Bau- und Abbruchabfälle entsorgt. (vgl. Destatis). Davon fallen zwischen ca. 25-33% in der Rohbauphase an. Dieser Bauschutt entsteht im konventionellen Bau durch Materialreste, die durch Zuschnitt, Beschädigungen oder Ähnliches nicht weiter verwendbar sind. Der Grund ist, dass nicht jedes Bauteil die exakte Größe zum Verbauen hat und deshalb zugeschnitten werden muss. Des Weiteren müssen Öffnungen und andere Aussparungen nachträglich in den Rohbau eingearbeitet werden. Ein Teil des Abfalles fällt als Transportmaterial wie Holzpaletten, Bänder oder Folien an. Wird jedoch der 3D-Druck genutzt, so können all diese Abfälle eingespart werden da nichts mehr zugeschnitten werden muss und alles direkt millimetergenau angefertigt wird und die zu liefernde Materialmenge einfach und exakt geplant werden kann. Lediglich ein Material wird verwendet wird (vgl. Alves S.52-53).

Durch diese exakte Planung wird Platz eingespart, der beim herkömmlichen Bau für die Lagerung von Materialien verwendet wird und nun nicht mehr gebraucht wird. Platz wird außerdem eingespart, da weniger Maschinen als beim konventionellen Bau verwendet werden. Die Nutzung von Straßen ist auf den Transport des Materials für den Druck beschränkt.

Des Weiteren kann Schalungsmaterial eingespart werden, da der Drucker die Schalungen für beispielsweise die Bodenplatte einfach druckt und diese Schalung dann nicht entfernt werden muss, sondern einfach in das Gebäude als tragendes Element integriert wird (vgl. Alves S.36-38)

Material kann auch anderweitig eingespart werden, da man direkt innere Hohlraum-strukturen schaffen kann, die die Dämmfähigkeit der Wandelemente verbessern, ohne dass mehr Material eingesetzt werden muss. Abbildung 7 zeigt den Hohlraum während des Druckprozesses. Diese inneren Hohlräume geben eine zusätzliche Stabilität, da bei gekrümmten Wänden kein seitliches Wegkippen möglich ist. Die Hohlräume, die durch innere Muster in der Wand geschaffen werden, können später, wenn nötig, verfüllt werden. (vgl. Matthäus S.59-63).

Abbildung 7: Hohlräume in den Wänden beim Druck des Wavehouses (vgl. Kraus).

Zu den Ressourcen gehört allerdings nicht nur das Material mit dem gebaut wird, sondern auch die Bauarbeiter, die das Gebäude errichten. Im konventionellen Bau wird mehr Personal benötigt als beim 3D-Druck (vgl. COBOD). Maurer sind in Deutschland besonders stark vom Fachkräftemangel betroffen. Diesem Fachkräftemangel kann durch den 3D-Druck entgegengewirkt werden. Der 3D-Drucker übernimmt die meiste, körperlich harte Arbeit und entlastet somit die Bauarbeiter. Außerdem ist die Lärmbelastung deutlich geringer. Ein Maurer hat laut DB Bau eine Lärmbelastung von 88 dB zu ertragen, während ein Ausschaler sogar mit bis zu 92 dB belastet wird. Hierbei wird der Grenzwert von 85 dB als zulässige Tagesbelastung deutlich überschritten. Somit wird neben den Arbeitskräften auch die Umgebung entlastet (vgl. Alves S.51).

4.2 Verwendung nachhaltiger und recycelter Materialien

Die Materialien, die im Moment verwendet werden, können zwar zu 100 % recycelt werden. Allerdings ist deren Zementanteil sehr hoch und somit die CO_2 Bilanz sehr schlecht. Um aber das Bauwesen wirklich revolutionieren zu können, muss der CO_2 Ausstoß deutlich gesenkt werden. Die Materialeinsparung, die durch den 3D-Druck durch präzise Anwendung der Materialien erzielt wird, ist ein Baustein. Allerdings sollte künftig ökologisch besser verträgliches Material eingesetzt werden: Es kann beispielsweise recyceltes Material verwendet werden. Erstmals hat das chinesische 3D-

Druckunternehmen Winsun ein Verfahren zur Extrusion von Frischbeton entwickelt, dem Anteile von Bauschutt beigemischt werden. Dadurch wird der Zementanteil im Beton verringert, sowie der Anteil anderer Substanzen. Der Verbrauch knapper Rohstoffressourcen wird also reduziert (vgl. Alves S.18).

Da für kleine 3D-Drucker im Consumerbereich bereits natürliche Stoffe in das Plastik gemischt werden (Prusament rPLA Algae Pigment), um Industrieabfälle zu verwerten, liegt es nur nahe, dass dies auch im Gebäudedruck eine zunehmende Rolle spielen wird. So wurde am Fraunhofer Institut erstmals ein Verfahren vorgestellt, bei dem Beton Holzreste zugesetzt werden. Da Holz ein nachwachsender Rohstoff ist, besitzt der daraus entstehende Holzleichtbeton einen entsprechend geringeren ökologischen Fußabdruck als der bisher verwendete Druckbeton. Außerdem weist das neu entwickelte Material besonders gute Wärme- und Schallschutzwerte auf. Allerdings musste der bisher verwendete 3D-Drucker modifiziert werden, um das neue Material verwenden zu können (vgl. Fraunhofer Institut).

Die Uni Maine hat einen ähnlichen Ansatz gewählt und Nanocellulose, die ebenfalls aus Holzabfällen gewonnen werden kann, dem Beton beigemischt. Dadurch wird die Viskosität maßgeblich verändert und, was ganz entscheidend ist, die mechanischen Eigenschaften werden verbessert. Der Druckbeton ist durch die Zugabe der Nanocellulose nicht mehr so brüchig wie der herkömmliche Druckbeton (vgl. Peresin S.9-11). Neben den nachwachsenden Rohstoffen, die den Zement im Beton nicht ersetzen können, wird auch daran geforscht, diesen durch alternative Materialien mit geringerem CO_2-Fußabdruck zu ersetzen. Dazu wird beispielsweise Flugasche oder Hüttensand eingesetzt. Es wurde in diesem Zusammenhang daran gearbeitet Glas mit in den Druckbeton einzuarbeiten, um den Glasmüll zu verwerten (vgl. Samrani S.3).

Generell gilt, je mehr Materialien zusammengemischt werden, desto schwieriger ist es später, nach dem Abbruch des Gebäudes, diese wieder zu separieren. Deshalb ist die Recyclingfähigkeit solcher Materialien häufig deutlich eingeschränkt und es müssen neue Methoden zur Trennung entwickelt werden.

Kurze Lieferwege wirken sich positiv auf das Klima aus. Dementsprechend wird daran geforscht, lokal verfügbare Materialien beim 3D-Gebäudedruck zu verwenden. So wird

Lehm in den Druckbeton integriert, um in Gegenden mit hohen Lehmvorkommen diesen zu nutzen (vgl. Lucks). Wie bereits in 4.1 erwähnt, wird außerdem daran geforscht durch andere Methoden mit Sand drucken zu können. Dieses Verfahren unterscheidet sich jedoch von dem bisherigen Betondruckverfahren und wird eher dazu entwickelt auf dem Mond Gebäude mit den dort vorkommenden Materialien drucken zu können (vgl. ICON).

Um Nachhaltigkeit zu erzielen, müssen langlebige Gebäude errichtet werden. Das Material muss also entsprechend haltbar sein. Beton ist jedoch eher brüchig und somit schlecht für langlebige Gebäudestrukturen geeignet. Eine Lösung ist selbstheilender Beton, der Risse oder Ähnliches von selbst verschließt und so zu einer zusätzlichen Haltbarkeit des Materials beiträgt. Dazu gelang der University of Southern California, Viterbi School of Engineering ein Durchbruch. Allerdings sind diese Materialien bisher noch um ein Vielfaches teurer als der herkömmliche Beton und findet daher bisher kaum Anwendung in der Realität (vgl. Shah).

4.3 Innovative Architektur

Durch den 3D-Druck können sehr einfach komplizierte Formen erstellt werden, die im konventionellen Bauwesen nicht oder nur sehr schwierig möglich sind und dadurch sehr teuer sind. Dies lässt sich an einfachen Kostenbetrachtungen ableiten. Wenn ein einfaches Haus mit quadratischer Grundfläche gebaut wird, sind die Kosten zwischen 3D-Druck und konventioneller Bauweise ähnlich. Sobald die Formen allerdings etwas komplizierter werden, kann der 3D-Druck schnell über 40 % günstiger werden als der konventionelle Bau, da man nicht auf bestimmte Formen begrenzt ist und eine höhere Variabilität möglich ist (vgl. Alves S.42-49).

Um Gebäude zu dämmen, werden im konventionellen Bau Dämmplatten auf die Fassade aufgebracht. Mit dem 3D-Druck kann dies überflüssig gemacht werden, da Hohlräume direkt in die Wand integriert werden können, die dann die Funktion des Dämmens übernehmen. Somit lässt sich eine Kombination aus Trag- und Dämmfähigkeit mithilfe von strukturell optimierten Bauelementen ermöglichen (vgl. Matthäus S.59). Außerdem wird bei modernen Niedrigenergiehäusern darauf geachtet, dass das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen möglichst gering ist, um einen Wärmeverlust zu vermeiden. Die Kugel ist hierbei ein Optimum. Kugelformen, werden aber im

konventionellen Bau nicht erreicht, da gekrümmte Formen sehr einfach realisiert werden. Diese funktionellen Vorteile lassen sich auf andere Aspekte wie Belüftung, Lichtlenkung oder Akustik anwenden und somit lässt sich die Form des Gebäudes an seine Funktion noch präziser umsetzen als im konventionellen Bau (vgl. Matthäus S.59-61).

Runde Formen haben außerdem bei gleichbleibendem Flächeninhalt einen kleineren Umfang. dadurch kann Material eingespart werden, wenn man statt einem Gebäude mit einer rechteckigen Grundfläche ein Gebäude mit einer runden Grundfläche baut. Dies war allerdings bisweilen nur sehr schwer umzusetzen, da dies im konventionellen Bau durch den Einsatz der Materialien schlicht zu aufwändig und damit zu teuer gewesen wäre. Mit dem 3D-Druck ist dies kein Problem mehr, da man nicht mehr auf die Form der Ausgangsstoffe (Backsteine, Holzbalken etc.) angewiesen ist (vgl. Alves S.42).

Der Bilbao-Effekt bezeichnet eine gezielte Aufwertung von Orten durch spektakuläre Architektur, die sich nicht weiter hinter einer funktionalen Hülle verstecken soll, sondern als Impulsgeber für die gesellschaftliche, wirtschaftliche und technologische Entwicklung verstanden werden soll. Dieser Effekt ist von zentraler Bedeutung für die Diskussion um den 3D-Druck im Bauwesen da dieser es erlaubt hochkomplexe, organische und individuelle Formen zu realisieren und das mit deutlich weniger Aufwand, Kosten oder durch die konventionelle Bauart beschränkte Formen. Dies ermöglicht neue gestalterische Freiheiten, die früher nicht umsetzbar gewesen wären. Zukünftige Gebäude können mehr als Kunstwerke geschaffen werden, ohne bautechnische Beschränkungen einhalten zu müssen. Besonders herausragende Bauten werden außerdem länger verwendet werden und nicht so schnell wieder abgerissen, um Platz für Alternativen zu schaffen.

Gebäude lassen sich außerdem durch die neugewonnenen Gestaltungsfreiheiten ästhetisch in die natürliche Umgebung einfügen und somit eine Einheit aus Natur und Gebäude bilden.

Ein weiterer Vorteil ist, dass nun ohne großen Aufwand eine Personalisierbarkeit des Wohnraumes möglich ist. Kostensteigerungen spielen dabei eine untergeordnete Rolle und man kann weg von der Standardisierung von Gebäuden. Einschränkungen durch die verwendeten Materialien (Backsteine, Holzbalken etc.) sind nicht zu erwarten. So kann jedes Gebäude auf seinen Nutzer individuell zugeschnitten werden, wodurch die Gebäude im Optimalfall länger genutzt werden (vgl. ICON Team).

5 Kritische Betrachtung und Diskussion

Aktuell ist der 3D-Druck im Allgemeinen und der Betonextrusionsdruck im speziellen im Bauwesen noch nicht sehr weit verbreitet, da der heutige Entwicklungsstand noch nicht alle Anforderungen erfüllt. Allerdings gibt es schon jetzt viele Vorteile und positive Perspektiven.

An erster Stelle sind Zeiteinsparung und Kostenvorteile zu nennen:

Durch den 3D-Druck wird der Bauprozess deutlich beschleunigt, da er viel schneller arbeitet als Menschen dies könnten. Die Erstellung des Gebäuderohbaus ist innerhalb weniger Tage möglich. Diese Zeitersparnis wirkt sich direkt auf die Personalkosten aus, da weniger Arbeitsstunden von Menschen geleistet werden müssen. Der 3D-Drucker übernimmt einen Großteil der Aufgaben von Maurern etc. Ausschließlich drei Personen müssen den Drucker bedienen (vgl. COBOD). Durch den Wegfall der klassischen Bauprozesse sind keine Schalungsarbeiten nötig, die langwierig und damit teuer wären.

An zweiter Stelle stehen die positiven Effekte auf Materialeinsatz und Umwelt:

Durch das Wegfallen der Schalungsarbeiten wird deutlich weniger Abfall produziert als im konventionellen Bauwesen (vgl. Alves S.36-39). Materialien können durch eine präzise Dosierung ohne Verschnitt (z.B. bei Balken, Ziegelsteinen etc.) effizient genutzt werden. Es wird wenig Ausschuss und Abfall produziert. Dies spart Geld und wertvolle Ressourcen. Durch den Verzicht auf Überproduktion und Abfälle wird außerdem der Ausstoß von CO2 deutlich reduziert. Dazu trägt die mit bis zu 100 % sehr hohe Recyclingfähigkeit des Materials bei, dessen Homogenität den Sortieraufwand auf ein Minimum reduziert (vgl. Neumann).

Für Architekten birgt das neue Verfahren Innovationspotenzial und die Gestaltungsfreiheit:

Komplexe Formgebung ist mit geringem Mehraufwand möglich. So können Bauwerke harmonisch in ihre natürliche Umgebung integriert werden, ohne das Landschaftsbild negativ zu verändern. Durch die architektonischen Freiheiten werden Gebäude mehr und mehr zu Kunstwerken oder an die Ansprüche angepasste Bauten, die dadurch länger genutzt werden können. Standardbauwerke können leicht geändert, individualisiert und personalisiert werden. Außerdem lassen sich im Zuge des Denkmalschutzes historische Elemente kostengünstig und detailgetreu rekonstruieren (vgl. Mehl).

Der Fachkräftemangel im Handwerk wird teilweise obsolet:

Vor allem der Beruf des Maurers ist aktuell in Deutschland stark vom Fachkräftemangel betroffen und erscheint als Ausbildungsberuf aufgrund der hohen körperlichen Belastung für Jugendliche nicht attraktiv. Wird der 3D-Druck im Bauwesen verwendet, werden in Zukunft weniger Maurer benötigt. Hier entstehen neue Berufsfelder wie Softwareentwicklern, Maschinenführern etc. So kann das Bauwesen wieder ein attraktiveres Berufsfeld werden. Die geringe Lärmbelastung und Gefahr durch herabstürzende Bauteile etc. auf der Baustelle wirkt sich zudem positiv auf die Arbeitssicherheit aus (vgl. Alves S.51).

Derzeit ist es noch nicht möglich, die Haustechnik sowie Fenster- und Innenausbau in den Druckprozess zu integrieren. Diese Gewerke müssen wie beim konventionellen Bau nachträglich erbracht werden. Hier ist bisher der gleiche Aufwand für Planung und Koordination nötig (vgl. Dorner[1]).

Baubegleitende Änderungen sind durch die Nutzung des 3D-Druckers stark eingeschränkt:

Das Bauobjekt kann während des Prozesses nur geringfügig verändert werden, da alles durch die additive Fertigung aufeinander aufbaut. D.h. bereits in der Planungsphase müssen alle Elemente definiert sein und die Struktur des Objektes final festgelegt sein (vgl. Dorner[2]).

Derzeit weist die Technologie noch Defizite bei der Realisierung von Überhängen und hohen Gebäuden auf:

Starke Überhänge können nicht realisiert werden, da die Basis im Aufbau fehlt. Sehr hohe Gebäude, die maßgeblich zur Lösung des Wohnraumproblems beitragen würden, sind noch nicht möglich, da man durch die Maße des Druckers eingeschränkt ist (vgl. Matthäus S.49).

[1] Gespräch mit Dipl.-Ing. Sven Dorner, Würth-Gruppe, 5. Juni 2025.
[2] Gespräch mit Dipl.-Ing. Sven Dorner, Würth-Gruppe, 5. Juni 2025.

Bisher ist die Auswahl an Materialien eingeschränkt:

Spezieller, auf die Technologie ausgelegter Beton ist nötig. Dieser besteht zu einem hohen Anteil aus Zement mit schlechter CO_2-Bilanz. Die Zulassungsverfahren sind wegen des Mangels an gesetzlichen Grundlagen noch sehr aufwändig und kompliziert. Individuelle Prüfungen und Gutachten sind nötig, wodurch wiederum deutlicher Mehraufwand an Expertise, Zeit und Kosten entsteht (vgl. Alves S.62).

Aktuell kommt es zu einer Kostenverschiebung im Vergleich zum herkömmlichen Bau, wodurch die Vorteile derzeit überschattet werden:
Der hohe Strombedarf des Gerätes ist nicht zu vernachlässigen. Die Umweltbilanz des Verfahrens hängt deshalb stark von der Energiequelle ab. Ein bedeutender Kostenfaktor ist die exakte Vermessung des Baugrundes, die unerlässlich ist (vgl.Dorner). Die Anschaffungs- und Wartungskosten des 3D-Druckers sind unverhältnismäßig hoch und die Anzahl der Anbieter am Markt begrenzt. Die Kosten für Fachpersonal oder den Schulungsaufwand für eigene Mitarbeiter machen einen Großteil der Gesamtkosten aus (vgl. Alves S.61).

Ein herausragendes Beispiel in der Region zeigt Abbildung 8 - das „Wavehouse“ im Baufeld 5 der Kraus Gruppe in Heidelberg. Hier entstand ab März 2023 das bis dato größte 3D-gedruckte Gebäude in Europa (vgl. Neumann). Das 54m lange, 11m tiefe und 9m hohe wellenförmige Gebäude wurde in nur 170 Druckstunden von der Firma PERI 3D Construction errichtet. Die Firma PERI ist führend in 3D-Drucklösungen im Bauwesen und kooperiert eng mit der dänischen Firma COBOD, die 3D-Gebäudedrucker entwickeln und auch den COBOD BOD2, der bei diesem Projekt verwendet wurde entwickelt haben (vgl. PERI). Da das Gebäude sehr lang und der Druckbereich begrenzt ist, musste es in drei Segmente aufgeteilt werden, die nacheinander gedruckt wurden. Zwischen den drei einzelnen Bauabschnitten wurde die Maschine versetzt und die entstehenden Lücken zwischen den Segmenten im Nachgang ausgefüllt (vgl. Neumann). Das Ausgangsmaterial (der Spezialbeton) wurde von dem ebenfalls in der Region ansässigen Unternehmen, HeidelbergMaterials geliefert, das weltweit eines der führenden Unternehmen für die Entwicklung und Produktion von 3D-Druckbeton ist. Dieses Gebäude wird seit der Fertigstellung als Servergebäude genutzt (vgl. PERI).

Abbildung 8: Wavehouse in Heidelberg (vgl. Kraus)

Durch die hohen Anschaffungskosten eines 3D-Druckers, werden im Moment viele vom Bau mit Hilfe des 3D-Gebäudedrucks abgeschreckt. Auf Anfrage, arbeiten die Architekten des Großhändlers Würth noch nicht mit dem 3D-Druck als großräumigen Gebäudedrucker. Die gesamte Planung läuft allerdings schon jetzt über CAD-Programme, mit deren Hilfe zunächst ein digitaler Zwilling des in der Planung befindlichen Gebäudes erstellt wird.

Anschließend wird ein kleiner 3D-Drucker genutzt um Modelle der geplanten Gebäude im Maßstab 1:250 anzufertigen. Dadurch werden die Planungen anschaulich dargestellt und die Abstimmung mit den Baubeteiligten vereinfacht (vgl. Dorner[3]).

In Zukunft muss die Hardware, die zum 3D-Druck dazugehört also deutlich billiger werden. Die hohen Preise liegen momentan am geringen Gebrauch. Dann können auch kleinere Betriebe mit dieser Technik arbeiten. An anderen Formen, diese Technik zu nutzen, um neue Einsatzgebiete zu erschließen und die Umwelt nicht so stark zu beeinträchtigen wird beispielsweise an der TU München geforscht (siehe 3.4.).

[3] Gespräch mit Dipl.-Ing. Sven Dorner, Würth-Gruppe, 5. Juni 2025.

Außerdem wird daran gearbeitet, den bisher stark zementlastigen Druckbeton so anzupassen, dass er umweltverträglicher wird (siehe 4.2.). Dann kann eine höhere Materialvarianz entstehen, die lokal oder je nach individueller Anforderung angepasst werden kann. Dazu forschen in Deutschland unter anderem die TU Dresden, das KIT Karlsruhe und die Fraunhofer Institute. Die ersten Joint Ventures bilden sich. Die deutsche PERI Group ist bereits in enger Kooperation mit der dänischen Firma COBOD, die industrielle 3D-Drucker entwickelt, um deren Produkte zu verbessern (vgl. PERI und COBOD). Außerdem wird Wohnraum durch die Verwendung des 3D-Drucks deutlich individueller und personalisierter. Zudem kann innerhalb kurzer Zeit viel Wohnraum entstehen. Das chinesische Unternehmen Winsun, arbeitet hier an Projekten zum Druck von mehrstöckigen Gebäuden (vgl. Alves S.18).

Einsatzgebiete sieht man künftig vor allem in Katastrophen- und Armutsregionen, um das Wohnraumproblem zu lösen. So werden in den USA bereits jetzt von der Firma ICON Häuser für Obdachlose gedruckt. ICON steht außerdem in enger Kooperation mit der NASA um Methoden zu entwickeln wie Mondbasen direkt auf dem Mond mit den dort verfügbaren Materialien gedruckt werden können (siehe 4.1) (vgl. ICON und ICON Team).

6 Fazit und Ausblick

Bedingt durch die Neuartigkeit des 3D-Gebäudedrucks und der schnellen Forschungsentwicklung in diesem Bereich, kann die vorliegende Arbeit nur einen Überblick zum heutigen Stand des 3D-Druckes, hier im Speziellen auch zum Werkstoff Beton, geben.

Die Verwendung des 3D-Drucks im Bauwesen ist ein sehr neues, aber auch vielversprechendes Verfahren. Es wurde aufgezeigt, dass die Vorteile deutlich überwiegen: Freiheit und Individualisierung in Gestaltung und Design, Optimierung von Kosten, Materialeinsatz und Fachkräftebedarf sowie der Wandel zur Digitalisierung sind vielversprechende Zukunftsaussichten. Der 3D-Druck bietet dem Bauwesen die Chance, sich grundlegend zu verändern und den ökologischen Fußabdruck des Baugewerbes generell zu verringern. Die Amortisation der Fixkosten, beispielsweise für Druckeranschaffung, Fachpersonal und Ausbildung sowie für standardisierte Regularien und Richtlinien wird jedoch erst möglich, wenn sich die Technologie flächendeckend durchsetzt und sich der Einsatz für eine Vielzahl an Bauprojekten auszahlt. Aktuell ist die Anwendung noch auf Versuchsprojekte von Großunternehmen oder geförderte Pilotprojekte beschränkt. Möglicherweise könnte der Staat durch Förderungen und Vergünstigungen auf diesem Sektor die Entwicklung in die Breite weiter beschleunigen. Als erfolgreich umgesetztes Beispiel kann hier die Nutzung der Photovoltaik zur Stromgewinnung dienen.

Damit dieses Verfahren das Bauwesen revolutionieren kann, muss sich die Bauindustrie in der Praxis dafür öffnen, mit Forschungsinstituten kooperieren und die Baurichtlinien von Behörden und Politik darauf ausgelegt werden. Erste, zaghafte Schritte, wurden durch die Praxisbeispiele von Materiallieferant, Handel und Baugewerbe unternommen. Eine Empfehlung für den nächsten Schritt wäre, die Hauptursachen für die Zurückhaltung in der Branche zu identifizieren und gezielte Strategien zu entwickeln, um den technologischen Wandel im Baugewerbe zu forcieren.

7 Literaturverzeichnis

Alves, Sharina (2019):
Mobiler 3D-Druck als innovative Alternative zur Erstellung von Bauwerken, in: Schriftenreihe für die Bauwirtschaft Reihe A, Heft 2 (online)
https://www.jade-hs.de/fileadmin/fb_bauwesen_geoinformation/inbi/veroeffentlichungen/reihe-a-abschlussarbeiten/ 2019_inbi_Reihe_A_Heft_3.pdf (15.06.2025).

COBOD (o.D.):
The BOD2 (online)
https://cobod.com/solution/bod2/ (03.06.2025).

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2023):
Arbeitsunfallgeschehen 2023 (online)
https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/4990 (02.06.2025).

Dr. Frederichs, Matthias (2023):
Kreislaufwirtschaft Bau (online)
https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf (15.06.2025).

Dr.-Ing. Weger, Daniel et al. (2021):
Bauen neu gedacht – 3-D-Betondruck in der Baupraxis, in: i.tech 3D Sonderdruck aus beton Ausgabe 7+8/2021 (online)
https://www.heidelbergmaterials.de/sites/default/files/assets/document/e5/82/2021_beckum_sonderdruck_beton.pdf (03.04.2025).

Dr. Vergin, Annika et al. (2013):
Potenziale additiver Fertigungsverfahren (online)
https://www.bundeswehr.de/resource/blob/140522/42841ea4828f3ce564e17a962685568d/3d-data.pdf (28.05.2025).

Dorner, Sven (2025):
Gespräch mit Dipl.-Ing. Sven Dorner, Würth-Gruppe, 5. Juni 2025.

Edelmann, Thomas (2021):
Viele Funktionen, ein Material, ein Prozess, in: Faszination Forschung 26/2021 (online) https://portal.mytum.de/pressestelle/faszination-forschung/2021nr26/07_Faszination_Forschung_26_21_Mungenast_3D-Fassade_deutsch.pdf/download (30.05.2025).

Filzwieser, Susanne (2022):
Leichter Bauen mit Beton? Wie Beton-3D-Druck Material und CO2 spart (online) https://www.tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-news/einzelansicht/article/leichter-bauen-mit-beton (15.05.2025).

Fraunhofer Institut (2020):
Additive Fertigung von tragenden Holzbauteilen durch Individual Layer Fabrication (ILF) (online) https://www.wki.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/2020/additive-fertigung-von-tragenden-holzbauteilen-durch-individual- layer-fabrication.html (12.05.2025).

ICON (o.D.):
Project Olympus (online)
https://iconbuild.com/lunar-construction (15.06.2025).

ICON Team (2024):
ICON Announces Construction is Underway for More 3D-printed Homes to Serve the Chronically Homeless in Texas(online) https://www.iconbuild.com/newsroom/icon-announces-construction-is-underway-for-more-3d-printed-homes-to-serve-the- chronically-homeless-in-texas (15.06.2025).

Lucks, Benjamin (2024):
Das Verfahren "Impact Printing" erlaubt es Forschenden, Häuser mit wenig Verbundstoffen aus Lehm zu fertigen...(online)
https://reset.org/impact-printing-drucken-wir-unsere-haeuser-in-zukunft-aus-lehm/ (10.06.2025).

Matthäus, Carla et al. (2021):
Leichtbeton-3D-Druck, in: BBSR-Online-Publikation 05/2021 (online) https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-05-2021- dl.pdf blob=publicationFile&v=4 (02.06.2025).

Mehl, Robert (2023):
3D-Druck: Neuste Technik für die Denkmalpflege, in: Baublatt Nr. 25, S. 25–27 (online) https://www.baublatt.ch/file/1977/BB_2325_3D-Druck.pdf (20.04.2025).

Michalke, Kerstin (2023):
3D-Druck als nachhaltige Technologie – Eine Bestandsaufnahme (online) https://www.htwk-leipzig.de/fileadmin/portal/f_i/Fakultät/Veranstaltungen/2023/3D_DruckForum/TagungsbandPDFs/ Session3_KerstinMichalke.pdf (20.05.2025).

MX3D (o.D.):
MX3D Bridge (online) https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/ (12.04.2025).

Näther, Mathias et al. (2017):
Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren... (online) https://www.irbnet.de/daten/rswb/17079004398.pdf (06.06.2025).

Neumann, Doris (2024):
Die KRAUSGRUPPE übergibt die Schlüssel für Europas größtes 3D-gedrucktes Gebäude (online) https://www.kraus-heidelberg.de/wp-content/uploads/2024/01/1_Pressemitteilung-Schliesseliebergabe-30-01-2024.pdf (17.06.2025).

Peresin, Maria Soledad (2024):
Extrusion-Based 3D Printing of Particulate Wood-Thermoset Composites for Construction Applications (online) https://umaine.edu/pdc/wp-content/uploads/sites/398/2024/09/UMaine-presentation_Peresin_t-share-2023-lo-res-v2-2.pdf (03.06.2025).

Samrani, Phebe (2024):
Effect of fly ash and ground waste glass as cement replacement in concrete 3D-Printing for sustainable construction(online) https://www.frontiersin.org/ journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2024.1430174/pdf (10.06.2025).

Schulze, Robert (2023):
Immobilienwirtschaft: Welchen Beitrag kann die 3D-Druck-Technologie beim Hausbau beitragen (online)
https://monami.hs-mittweida.de/frontdoor/deliver/index/docId/15977/file/Bachelorarbeit2023_Robert_Schulze.pdf (08.06.2025).

Shah, Avni (2022):
Can Concrete Heal Its Own Cracks Without Losing Its Strength? (online)
https://viterbischool.usc.edu/news/2022/03/can-concrete-heal-its-own-cracks-without-losing-its-strength/ (09.06.2025).

Silka AT Work (2025):
3D-gedruckte Schalung für Beton (online)
https://che.sika.com/dam/dms/ch01/3/SAW_SAEKI%20Robotics_3D%20Druck%20MFH%2C%20Stetten_2025.pdf (03.06.2025).

Technische Universität München (2022):
Additive Fertigung im Flug (online)
https://www.tum.de/aktuelles/alle-meldungen/pressemitteilungen/details/additive-fertigung-im-flug (09.06.2025).

TU Graz (2023):
Grazer Stahlbetonleichtbauexpertise für den Werkhof in Bludenz (online)
https://www.tugraz.at/institute/ite/forschung/forschungsprojekte/3d-betondruckflachdach-fuer-werkhof-in-bludenz (04.06.2025).

Vollmer, Friedjörg (2024):
Beton-3D-Druck am Institut für Baubetriebswesen (online)
https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ibb/forschung/beton-3d-druck (07.06.2025).

Voxeljet (o.D.):
Detailreiche Betonfassaden mit industriellem 3D-Druck: Der voxeljet-Firmenstein (online)
https://www.voxeljet.de/additive-fertigung/case-studies/architektur/der-voxeljet-firmenstein/ (05.06.2025).

o.V. (2024):
Wavehouse in Heidelberg, 2023 (online) https://www.peri3dconstruction.com/wavehouse-heidelberg (16.06.2025).

o.V.:
evoBuild 3D-Druck – Hightech-Material für den 3D-Betondruck (online)
https://www.heidelbergmaterials.de/de/zement/produkte/evobuild-3d-druck (08.06.2025).

8 Literaturverzeichnis (Abbildungen)

Abbildung 1: (online)
https://www.heidelbergmaterials.de/sites/default/files/styles/gallery_image_full_xl/public/2023-02/3D%20gedrucktes%20Haus%20Beckum.jpg.webp?itok=qcgPuigV (20.06.2025).

Abbildung 2: (online)
https://www.ersatzteilenachbedarf.de/img/about/bloecher_3d-druck_sand2.jpg (20.06.2025).

Abbildung 3: (online)
https://mx3d.com/wp-content/uploads/2023/10/MX3D-Bridge-in-Amsterdam-city-center-Credit-Thea-van-den-Heuvel-1030x914.jpg (20.06.2025).

Abbildung 4: (online)
https://www.tum.de/fileadmin/_processed_/9/1/csm_220922_Leutenegger_Drones_DSC00605_a2c39d0af4.webp (20.06.2025).

Abbildung 5: (online)
https://www.kraus-heidelberg.de/wp-content/uploads/2024/01/Wavehouse-Campbell-Heidelberg-03_2023_Foto-SSVArchitekten-230228_Aufbau.jpg (20.06.2025).

Abbildung 6: (online)
Mathäus S.49 (02.06.2025).

Abbildung 7: (online)
https://www.mcarchitects.it/en/projects/tecla-technology-and-clay (20.06.2025)

Abbildung 8: (online)
https://www.kraus-heidelberg.de/wp-content/uploads/2024/01/Wavehouse-Campbell-Heidelberg-03_2023_Foto-SSVArchitekten-240106_2.jpg (20.06.2025).

9 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Jakob Ritter, eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ausschließlich unter Verwendung der im Quellen- und Literaturverzeichnis aufgeführten Werke angefertigt habe

Mosbach-Neckarelz 24.06.2025 _____

Jakob F. Ritter