

Reflexionsarbeit

Masterprogramm Architektur

Emergent Fields in Architecture

Schwerpunkt: Additive Manufacturing

verfasst von Sophia Meyer Matrikel-Nr. 12236531 WS 2024/25

unter der Leitung von

Senior Lecturer Dr.in Dipl.ing.in Sandra Häuplik-Meusburger

Institut für Architektur und Entwerfen

E253-05 Forschungsbereich Hochbau, Konstruktion und Entwerfen

Schlüsselwörter: additive Fertigung, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit

Zusammenfassung:

Die additive Fertigung bildet einen elementaren Baustein für eine nachhaltigere Bauwirtschaft, indem sie den Ressourcenverbrauch und CO₂-Ausstoß vermindert und eine umfassende Kreislaufwirtschaft am Bau durch den Einsatz entsprechender Baustoffe ermöglichen kann. Gleichzeitig kann mittels des 3D-Drucks Wohnraum kostengünstiger und effizienter hergestellt werden und somit der Wohnungskrise entgegen wirken, ohne die zunehmend begrenzten Energie- und Rohstoffreserven weiter auszubeuten. Die additive Fertigung kann einen Paradigmenwechsel herbeiführen und das Bauwesen der Zukunft entscheidend verändern.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

1.1 Probleme und Herausforderungen im heutigen Bauwesen

1.2 Potenzial des Additivenufacturings

2. Additives Manufacturing

2.1 Geschichtliche Entwicklung

2.2 Definition und Vorstellung des Verfahrens

2.3 Verbreitete Fertigungstechniken der 3D-Methode im Bauwesen

3. Vorteile und Herausforderungen gegenüber den herkömmlichen Bauweisen

3.1 Vorteile

3.2 Herausforderungen

4. Beurteilung der Bauwirtschaft und mögliche Verbesserungen

4.1 Lineares System der Bauwirtschaft als Jetzt-Zustand

4.2 Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

4.3 Ökologisches Potenzial und Nachhaltigkeit des 3D-Drucks

4.4 Materialentwicklung und Digitalisierung

5. Heutige Einsatzmöglichkeiten

6. Resümee

1. Einleitung

Das Modul „Emergent Fields in Architecture“ weist auf dringende Probleme der Bauwirtschaft wie den CO₂-Ausstoß bei der Fertigung der Grundmaterialien, den Ressourcenverbrauch und die Umweltverschmutzung durch mangelndes Recycling hin. Das interdisziplinäre Thema zeigt Denkinterventionen und Lösungsansätze hinsichtlich neuer Technologien in der Architektur auf, respektive was die traditionelle Architektur daraus ziehen kann und zukünftig hinsichtlich der drängenden Probleme auch umsetzen muss.

In Auseinandersetzung mit der Vorlesungsreihe des Moduls finden - themenbezogen zur additiven Fertigung bzw. Additive Manufacturing (AM) - Aspekte besondere Beachtung wie Ressourcenknappheit von Baustoffen, ihre Entsorgung und Wiederverwendbarkeit, sowie die Anwendbarkeit des 3D-Drucks als Beitrag zur Verbesserung des Umwelt- und Klimazustands.

Zur Bestandsaufnahme muss das heutige Bauwesen einer kritischen Betrachtung unterworfen werden.

1.1 Probleme und Herausforderungen im heutigen Bauwesen

„Ressourcenknappheit ist nicht nur eine Versorgungsthematik, sondern auch eine Entsorgungsthematik“ (Zitat nach Fellner)¹.

Laut einer Studie der Vereinten Nationen aus dem Jahr 2022 verursacht der Bausektor 38%^{2,3} des weltweiten CO₂-Ausstoßes (Abbildung 1). Die Zahl umfasst den Bauprozess, den Gebäudebetrieb und die Materialproduktion, die einen sehr hohen Energieaufwand erfordern. Die Bauindustrie ist somit ein wesentlicher Verursacher der anthropogenen, globalen Klimakrise. Die Verursachung des hohen CO₂-Ausstoßes zeigt sich auch bei der Erzeugung und Aufarbeitung von Abfall bei Abrissarbeiten. Gleichzeitig sollen Baukonstruktionen optimiert, ihre Energieeffizienz, Flexibilität und Nutzungsdauer gesteigert und hochwertiges Recycling ermöglicht werden.⁴

Die Probleme sind einer sich immer größer werdenden Nachfrage an Wohnraum⁵ und dem Bau und Unterhalt von Gebäuden unterschiedlichster Art geschuldet, der ressourcen- und energieeffizient gebaut und ebenso wirtschaftlich und bezahlbar sein soll.



Abbildung 1: I.Hamilton & H. Kennard 2020 Global Status Report for Buildings and Construction, Umweltprogramm der Vereinten Nationen; adaptiert aus „IEA World Statistics and Balances“ and Energy Technologies Perspectives (IEA; 2020d; IEA 2020b)

1.2 Potenzial des Additive Manufacturing

Die additive Fertigung beziehungsweise der hier diesem Zusammenhang auch sprachlich geläufige 3D-Druck bietet ein hohes Potenzial für eine zukunftsweisende Bautechnik, die die in der Einleitung genannten Kriterien erfüllen. Im herkömmlichen Bauwesen entsteht häufig Materialverlust, wie z.B. durch Überdimensionierung (Kromoser)⁶. Das heutige Bauwesen ist oft ineffizient, weil spezifische Eigenschaften des Baumaterials (Druck- und Zugfestigkeit, Dichte, Verformbarkeit)⁷, unökologisch eingesetzt und nicht optimal ausgenutzt werden.

Ein Problem stellt auch das Abfallaufkommen bei Bau und Abriss dar. Die Recyclingsmöglichkeit der angefallenen Stoffe werden in der heutigen konventionellen Bauweise nicht genügend berücksichtigt. Viele Verbundwerkstoffe werden noch aus fossilen Grundstoffen hergestellt, ihr Recycling ist kompliziert und energieintensiv.

Im Vorfeld ist daher bei Neubauten unabdingbar, mittels des Building Information Modelling (BIM) einen Planungsprozess zu generieren, der den Lebenszyklus und die Nachhaltigkeit eines Gebäudes berücksichtigt. Dies betrifft die Einsatzfähigkeit und Wiederverwendbarkeit der Materialien und ihre Umnutzbarkeit. Diese Punkte spielen bei der Gebäudeplanung zur Aufrüsten und der Nachverdichtung eine entscheidende Rolle (Fellner)⁸.

Die additive Fertigung ist eine Chance, diese Herausforderungen besser zu bewältigen. So ist diese ressourcenschonender, da sie Materialverlust minimiert und den Bau präzise ausformulieren kann. Die Technologie ermöglicht eine bessere Integration von recycelten oder biobasierten Materialien. Gleichzeitig verringert sie den CO₂-Abdruck erheblich⁹.

Die Reflexion der tatsächlichen Auswirkung und Nachhaltigkeit dieser Technologie ist daher wichtig, um ihren möglichen Einsatz hinsichtlich Zukunftsfähigkeit und Ökologie sinnvoll zu gestalten und diese Potenziale hinsichtlich des Klimaschutzplanes 2050¹⁰ der EU weitestgehend auszuschöpfen. Auf die einzelnen Punkte soll hier im Verlauf eingegangen werden.

2. Additive Manufacturing

Diese Technologie hat in den letzten 40 Jahren eine rasante Entwicklung hingelegt. Auf besondere Fortschritte soll nachfolgend kurz eingegangen werden.

2.1 Geschichtliche Entwicklung

Eine der ersten Inspirationen für das Additive Manufacturing stammt von Joseph E. Blather¹¹ im späten 19. Jahrhundert, der zur Entwicklung von Topografiekarten die Darstellung der Höhen in Schichten auftrug. Die Umsetzungen mittels Schichtung von Materialien ist heute die Basis für die 3D- Druckverfahren. Seit Jahren steigt das internationale Interesse an dem AM kontinuierlich; die vielfältigen

Anwendungsmöglichkeiten können in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilsektor, in der Medizintechnik und in Prototypen für Funktionstestverfahren eingesetzt werden.¹²

Im Bauwesen nimmt das Additive Manufacturing seit den 1990er Jahren an Bedeutung zu. Im Jahr 1997 verbindet Joseph Pegna die 3D-Drucktechnologie mit zementartigen Materialien, die die Voraussetzung für den Betondruck schaffte.¹³ Die weitere Entwicklung dieser Technologie führte zu einem Freeform-Construction-Verfahren, das großformatig Strukturen ohne Schalung herzustellen ermöglichte.¹⁴

2004 wurden die ersten Wände mittels eines mobilen 3D-Druckers unter der Bauleitung Behrok Khonshnevis gefertigt. Durch diese Herstellungsart, den direkten Druck, entfiel der Transport von vorgefertigten Teilen.¹⁵

2012 erstellte die Firma PERI das bis dahin größte 3D-gedruckte Wohnhaus¹⁶ in Zusammenarbeit mit der Firma COBOD in Beckum, wie es in der Vorlesung „Additive Manufacturing in the Construction Industry“ veranschaulicht wurde (Karaivanov)¹⁷.

2015 konnte das Bauunternehmen SKANSKA einen fünfstöckigen Turm vorstellen, der mit 3D-gedruckten Teilen gefertigt wurde.¹⁸ Im selben Jahr kündigte das russische Unternehmen SPECAVIA¹⁹ an, dreistöckige Gebäude komplett mittels 3D-Druck herstellen zu können. Diese Entwicklung demonstriert das wachsende Potenzial des 3D-Drucks für den großformatigen Hausbau.

Durch welche Kriterien wird die additive Fertigung nun definiert?

2.2 Definition „additive Fertigung“

Die additive oder auch generative Fertigung ist ein spezieller Fertigungsprozess, der nach DIN 8580 dem Bereich des Umformens zugewiesen wird. Er umfasst alle Verfahren, bei denen Material Schicht für Schicht aufgetragen wird, um ein Objekt oder Werkstück dreidimensional herzustellen.²⁰

Diese Technologie wird im Sprachgebrauch als 3D-Druck bezeichnet, wobei der englische Begriff Additive Manufacturing (abgekürzt AM) ebenfalls verwendet wird. Der schichtweise Aufbau erfolgt computergesteuert anhand einer 3D-CAD-Modelldatei, basiert auf präzisen Maßen und Formen. Die Qualitätsanforderungen und Standards hierzu sind in der ISO/ASTM 52393:2023 Norm geregelt, die umfassend alle Gebiete der geforderten Voraussetzungen regelt.²¹

Es ist möglich, sowohl flüssige als auch feste Werkstoffe zu verarbeiten, entweder durch physikalische oder chemische Verfahren wie Härtung oder Schmelzprozesse. Zu den gängigen Materialien im 3D-Druck gehören Kunststoff, Kunstharz, Keramik oder Metalle. Im Bauwesen wird meistens Beton eingesetzt, aber auch Biomaterialien gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die additive Fertigung benötigen keine speziellen Werkzeuge oder Formen, um die jeweilige Geometrie herzustellen.²²

Grundsätzlich unterteilt man das Verfahren des Additive Manufacturing in (Abbildung 2)

- die Erstellung von Prototypen oder Modellen (Rapid Prototyping),
- der Herstellung von Werkzeugen (Rapid Tooling) und
- die Optimierung des Herstellungsprozess der Endprodukte oder Bauteile (Rapid Manufacturing).

Das **Rapid Prototyping**²³ ist ein kostengünstiges Schnellverfahren, das die Entwicklung von Modellen und Prototypen umfasst, die mit Hilfe eines 3D-CAD-Modells generiert werden. Es stellt ein vereinfachtes funktionstüchtiges Modell dar, das zur Veranschauung und nachfolgenden Fertigung dient. So kann kosteneffizient ein maßstabgetreues Modell eines Teils oder einer Baugruppe gefertigt werden, dessen Entwicklung in die Endproduktion einfließt.

Das **Rapid Tooling**²⁴ umfasst alle Prozesse in der Werkzeugherstellung, mit denen schnell und in kleinen Stückzahlen benötigte Werkzeuge produziert werden können.

Als **Rapid Manufacturing**²⁵ bezeichnet man die Vorarbeiten zur werkzeuglosen Erstellung des eigentlichen Bauteils. Hier fließen 3D-Simulationen rechnergestützt zum gewünschten Produkt ein, ebenso wie der Materialeinsatz unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit.

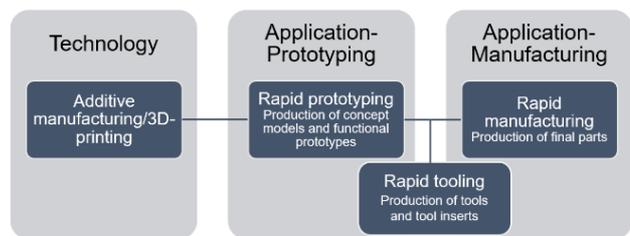


Abbildung 2: Additive Manufacturing Gehard & Hötter 2016 4 - rapid prototyping. In Gebhardt & Hötter (Eds.), Additive manufacturing (S. 291-352) Hanser

2.3 Verbreitete Fertigungstechniken der 3D-Methode im Bauwesen

Die additive Fertigung im Bauwesen ist meistens eine Vor-Ort-Produktion mittels eines automatisierten Fertigungsprozesses, der häufig in der Erstellung des Rohbaus eingesetzt wird. Ebenso können Bauteile in Fertigbauweise vorgefertigt und zur Baustelle verbracht werden. Der Anwendungsbereich konzentriert sich vor allem auf vertikale Bauteile wie Wände und Stützen.²⁶ Zur Umsetzung werden vor allem das Extrusionsverfahren und das Partikelbett-Verfahren zum 3D-Druck verwendet.

Das **Extrusionsverfahren**²⁷ bezeichnet alle Verfahren, bei denen Material mittels eines Extruders gepresst und schichtweise auf eine Träger-Plattform aufgebracht wird. In einem viskosen Zustand wird das jeweilige Material auf die Plattform aufgetragen. Das kann entweder durch Erhitzen des Materials wie bei thermoplastischen Kunststoffen erreicht werden oder das Material liegt bereits in zähflüssiger Form vor, wie zum Beispiel bei Ton. Üblicherweise wird bereits ein vorgemischter Beton verwendet, durch eine Düse ausbracht und in Strängen schichtweise aufeinander zusammengesetzt. Der Vorteil des Extrusionsverfahrens ist seine hohe Präzision und Baugeschwindigkeit. Das Verfahren

wird vor allem im Betondruck verwendet, eignet sich auch bei der Verwendung holzbasierter Werkstoffe (s. Punkt 4.4, Kromoser).

Das **selektive Binden**²⁸, auch Binder Jetting genannt, gehört zu den Pulverbettverfahren und ist vielfältig einsetzbar. Dabei wird pulverförmiges Material wie Sand verwendet und schichtweise mit Bindemittel an bestimmten Punkten, Bahnen und Schichten aufgetragen, um die gewünschte Form zu erhalten. In diesem Verfahren wird in Lagen gedruckt. Die hergestellte, vom Computer modellierte Form wird an den Stellen durch chemische oder physikalische Aktivierung gehärtet (das sog. Abbinden) und der überschüssige Sand entfernt. Vorteil dieser Technik ist, dass durch das Partikelbett eine Stützstruktur und damit eine große Geometriefreiheit gewährleistet ist. Diese Form lässt sich als Schalelement verwenden.

Eine besondere Erwähnung gilt dem **Shotcrete 3D Printing (SC3DP)**²⁹, eine Weiterentwicklung des Spritzbeton- oder Extrusionsverfahrens. Durch die genau berechnete Zugabe von Druckluft wird die Betonschicht mittels eines Roboterarmes Schicht für Schicht zu einem stabilen Schichtverbund aufgebracht. Der Roboterarm bzw. die Druckdüse ermöglicht den Auftragswinkel des Materials zu ändern und damit eine größere geometrische Variabilität.

Nach der Vorstellung der gängigsten Fertigungsverfahren im 3D-Druck sollen die Plus- und Minuspunkte des Additive Manufacturing hervorgehoben werden.

3. Vorteile und Herausforderungen gegenüber den herkömmlichen Bauweisen

3.1 Vorteile

Die Herstellung von Gebäudestrukturen mithilfe des Additive Manufacturing hat vielerlei Vorteile. Die Pluspunkte liegen in der werkzeuglosen Bearbeitung und der Möglichkeit, das geplante Projekt vor Ort herstellen zu lassen. Dies geht mit einer Reduktion von Transport- und Lagerkosten einher. Ein weiterer Nutzen liegt darin, dass die Errichtung des gewünschten Planungsvorhabens gegenüber der konventionellen Bauweise deutlich schneller abgewickelt werden kann.³⁰

Als Beispiel wurde in der Vorlesung die Firma OFROOM vorgestellt. Die Innovationsagentur gewährte überraschende Einblicke in die Möglichkeiten der additiven Fertigung. Hier wurde unter Mitwirkung des Baustoffherstellers BAUMIT³¹, der Universität Innsbruck und incremental3D ein Betondruckverfahren gezeigt, das mittels des 3D-Drucksystems BauMinator ein freigeformtes, in Echtzeit hergestelltes Objekt druckte. Die Kombination von Drucker und Baumaterial ist dabei entscheidend für die Erstellung komplexer Bauteile (Karaivanov)³².

Durch die Automatisierung des 3D-Verfahrens ist eine grundsätzliche Kostenersparnis zu erwarten. Die Produktivität wird durch den Einsatz von Industrierobotern gesteigert. Mit Unterstützung der KI schafft man eine Optimierung der Prozesskette. Durch die Festlegung der Typologie und Optimierung des Materials lässt sich der Verbrauch verringern. Man kann dadurch leichtere und gleichzeitig robustere Baustrukturen erreichen. Mit dem AM schafft man Designinnovationen, die auf die Optimierungsproblematik der verschiedenen Materialien und ihren Eigenschaften eingehen³³. Dieses Verfahren läuft meistens nach einem iterativen Prozess ab, d.h. der Designentwurf, wird so lange in einer Versuchsreihe weiterentwickelt und verbessert, bis das gewünschte Endprodukt entstanden ist. Der Vorgang wird durch einen Algorithmus entwickelt und anschließend mit einer numerischen Simulation berechnet³⁴.

Die Reduktion an Werkstoffen betrifft auch die Einsparung von Schalung (s. hier auch Punkt 4.3) und den leichteren Rück- und Umbau durch den oben besprochenen optimierten Materialeinsatz, d.h. dass diese Baumethode Modifizierungen ohne größeren Aufwand zulässt und somit hinsichtlich der Energieeffizienz konventioneller Methoden überlegen ist.

Auch recycelte Komponenten finden verstärkt Anwendung. Exemplarisch soll hier ein Produkt der Firma EOOS Social Design, Österreich aus der Vorlesung von Lotte Kristoferitsch³⁵ vorgestellt werden. Eine Besonderheit stellt das ZUV (= zero-emission utility vehicle) dar, ein neuartiges Lastenfahrzeug, das vor Ort in 3D-Druck hergestellt werden kann. EOOS als innovatives Unternehmen kombiniert hier moderne Bautechnologie der additiven Fertigung (durch Industrieroboter) mit einem nachhaltigen Ansatz, indem recycelte Verpackungsabfälle und kompostierbare Materialien Verwendung finden.

3.2 Herausforderungen

Die Herausforderung beim 3D-Druck fängt im Hochbau schon bei der Auswahl geeigneter Baumaterialien an³⁶. Sie müssen eine ausreichende Festigkeit hinsichtlich Rissbildung und Aushärtung haben, um Statikprobleme zu vermeiden und daneben eine Standsicherheit und Langlebigkeit zu gewährleisten. Dies scheint gerade bei größeren Projekten ein Problem zu sein. Daher findet noch häufig Beton als Baustoff Anwendung.

Eine Herstellung eines größeren Bauvolumens ist folglich im Moment noch von einer laufenden Qualitätskontrolle abhängig³⁷. Die Genauigkeit des 3D-Druckers neben der Auswahl geeigneter Baumaterialien, die der jeweilige Drucker überhaupt verarbeiten kann, sind für die Stabilität und Sicherheit des Baus unabdingbar. Er muss präzise arbeiten und die Temperatur im Verarbeitungsprozess genau einhalten, um Risse und Verformungen zu vermeiden. Diese würden, wie oben bereits erwähnt, zu erheblichen Problemen führen, auch haftungsrechtlicher Art, und nicht die gesetzlichen Baunormen erfüllen. Ein weiteres Manko sind die hohen Anschaffungskosten der Drucker und Roboter, um Bauvorhaben

auszuführen. Dies gilt ebenso für die Wahl und Herstellung der Ausgangsmaterialien für einen erfolgreichen Druck.³⁸

Aufgrund der aufgezeigten Probleme ist der 3D-Druck im Hochbau noch nicht massentauglich, sondern füllt ein Nischensegment. Durch die Neuartigkeit des Verfahrens Additive Manufacturing gibt es noch keine langen Beobachtungszeiträume, wie sich das Verfahren im Laufe einer längeren Nutzungsdauer entwickelt. Es braucht ein validiertes Post Processing, um die additive Wertschöpfungskette planbarer und effizienter zu gestalten (Karaivanov)³⁹. Trotz dieser Probleme stellt der 3D-Druck eine Riesenchance in der Bauwirtschaft dar, wenn man den Jetzt-Zustand des Bauwesens und die damit einhergehenden Probleme betrachtet.

4. Beurteilung der Bauwirtschaft und mögliche Verbesserungen

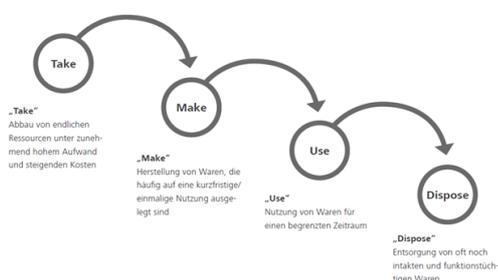
Wie ist der momentane Rohstoffverbrauch?

Derzeit liegt der Ressourcenverbrauch in Österreich bei 19 Tonnen pro Kopf - das entspricht 167 Millionen Tonnen pro Jahr ⁴⁰. Seit den 1970er Jahren gibt es in Österreich wie in anderen Industriestaaten eine Sättigung des Ressourcenverbrauch auf hohem Niveau. Trotz dieses immensen Verbrauchs wird nur wenig an der Reduktion des Materialverbrauchs gearbeitet (Fellner)⁴¹. Es kommt daher immer mehr und mehr zur Verknappung wie beispielsweise bei den nichtmetallischen Mineralstoffen.

Interessanterweise darf in Deutschland nur ein Bruchteil an Recyclingbeton einer Bausubstanz beigemischt werden, ganz anders als in der Schweiz oder USA mit 15% oder Österreich mit 10 bis 15% ⁴². Dies ist den Lobbyisten der Stein- und Erdenindustrie geschuldet, die in den Materialeigenschaften, die im Betondruck eingesetzt werden sollen, Nachteile in der Beständigkeit sehen. Die nötige Qualität des Recyclingbetons ist zumindest in Deutschland noch nicht in Vorschriften fixiert. So wird das recycelte Betongranulat hauptsächlich für Erdarbeiten, Unterfüllungen und Aushüben verwendet und nicht für den Hausbau, ein Innovationshemmnis für den Einsatz recycelten Betons.⁴³

Folglich befindet sich das Bauwesen momentan weitgehend in einem linearen System, das nachfolgend kurz skizziert werden soll.

Lineares Modell



4.1 Das lineare System

„Die lineare Wirtschaft ist ein System, in dem Menschen Produkte kaufen, nutzen und dann wegwerfen“.⁴⁴

Das Produkt geht nur einen Weg, von der Produktion zur Nutzung hin zur Entsorgung. Letztere schließt kein Recycling nach Trennung oder eine

Abbildung 3.: Circular Economy Report, Lineares System, DNGB

Wiederverwendung nach Instandsetzung ein. Durch die mangelnde Wiederverwertbarkeit wird in diesem System immer neue Ware produziert (Abbildung 3). Entsprechend werden Ressourcen ausgebeutet, auf drängende Probleme des Umwelt- und Klimaschutz keine Rücksicht genommen. Die Müllberge wachsen.⁴⁵

Hier stellt sich hinsichtlich der Planung und Ausführung am Bau die Frage, ob die Instandsetzung, Erweiterung und Modernisierung von Bestandsbauten nicht grundsätzlich Vorrang vor Abriss und Neuplanung haben sollten. Wenn schon abgerissen werden muss, so würde die weitgehende Umsetzung von Recycling und der Wiedereinbau von Materialien im Bauwesen eine Kreislaufwirtschaft ermöglichen, die im nächsten Punkt kurz erklärt wird.

4.2 Die Kreislaufwirtschaft

Biosphäre und Technosphäre

(c) Cradle to Cradle NGO

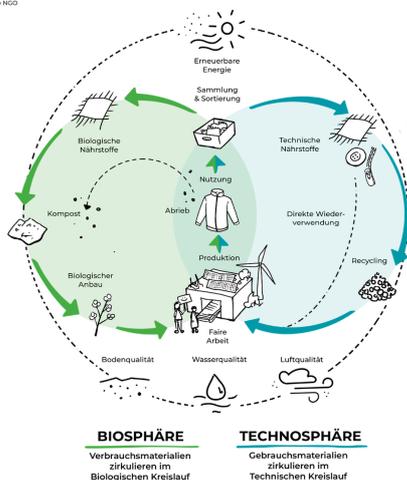


Abbildung 4: Cradle to Cradle NGO, Cradle to Cradel Prinzip biologisch & technisch, Jahr unbekannt

Wie der Name schon impliziert, lebt die Kreislaufwirtschaft (Abbildung 4) von der Wiederverwendung und dem Recyclen bereits hergestellter Produkte, um Müll weitestgehend zu vermeiden und Rohstoffe und Ressourcen zu schonen.⁴⁶ Die Belastung der Umwelt soll so klein wie möglich gehalten werden und die Natur nicht mehr ausgebeutet. In der Stadtplanung wäre diese Punkte gut umsetzbar. Neue Produkte entstünden somit aus bereits verwendeten Stoffen (sog. Sekundärrohstoffe), die möglichst sortenrein, selbst zu Ausgangsmaterial würden.⁴⁷ Das Umdenken in dieser Thematik stellt hohe Ansprüche an alle, die an der Produktion und dem Konsum der Güter beteiligt sind, da die Wiederaufbereitung von Stoffen aus Abrissarbeiten (noch) hohe Kosten verursacht und zeitaufwendig ist.

Im Vergleich zum Gesamtbestand benötigte die Stadt Wien im Jahr 2013 380 Mio. Tonnen an Baumaterial (Fellner)⁴⁸. Die Anforderungen an das zirkuläre Bauen sind folglich, den pro Kopf Verbrauch an Baustoffen deutlich zu verringern. Es hängt von der Planungsphase ab, wie sich diese Ziele Baustoffwahl, Langlebigkeit, selektiver Rückbau und Wiederverwertbarkeit⁴⁹ am besten umsetzen lassen, um eine deutlich verbesserte Ökobilanz und Umweltverträglichkeit zu erhalten. Der Einsatz von recycelten Ersatzbaustoffen spielt hier ebenfalls eine immer wichtigere Rolle.

Für eine Nachverdichtung im Städtebau kommen in der Gebäudeanpassung Umnutzbarkeit, Aufstockung und Aufrüstung der bestehenden Gebäude in Frage. Hier ist die Anwendung von BIM Technologien, die Bauwerksmodellierung mittels

Softwareprogrammen, die vernetzte Planung und Umsetzung von Fertigungs- und Industrieprozessen für die Forderungen an die „Industrie 4.0“ essentiell.⁵⁰

Aus der Vorlesung (Fellner)⁵¹ wurden hier nochmal die Vorgaben für ein umweltfreundliches Bauen vertieft, wie durch additive Verfahren wie den 3D-Druck mittels geeigneter Materialien wie Holz als nachwachsender Rohstoff. Gleichzeitig müssen sich die verwendeten Materialien grundsätzlich rückbauen lassen, wenn die Nutzungsdauer aus verschiedensten Gründe abgelaufen ist.⁵² Die Ausgangsstoffe müssen sich neu verwerten lassen und einem neuen Zweck zugeführt werden. Durch dieses sogenannte **Urban Mining**, die Stadtschürfung⁵³, lassen sich Rohstoffe in großem Maße zurückgewinnen (Sekundärrohstoffe). Die Stadt mit ihren Bauwerken als stellt somit eine riesige Ressource zur Wiederaufarbeitung von Baustoffen und eine Wertschöpfungskette dar. Diese Quelle wird an Bedeutung gewinnen, die auch für den 3D-Druck von Nutzen sein wird.

Das Urban Mining bedient gleichzeitig die Vorgaben aus der Taxonomieverordnung der EU aus 2020, wie sie auch in der Vorlesung (Bauer)⁵⁴ vorgestellt wurde:

- (1) „Klimaschutz“, (2) „Anpassung an den Klimawandel“, (3) [...], (4) „Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft“, (5) „Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ und (6) „Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme“ ([Verordnung \(EU\) 2020/852](#) über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen).⁵⁵

4.3. Ökologisches Potenzial und Nachhaltigkeit des Additive Manufacturing

Die Abfallvermeidung durch weniger Materialverbrauch und Überproduktion, die Verwendung neuartiger Materialien und das konsequente Recyceln und der Wiedereinbau von Abbruchmaterial ist eines der großen Ziele, die Bauwirtschaft nachhaltig zu machen.

„Die Stadt der Zukunft unterscheidet nicht mehr zwischen Abfall und Rohstofflager“.
Zitat von Architekt Mitchell Joachim.⁵⁶

Bei den jetzt üblichen Fertigungsmethoden am Bau entsteht deutlich mehr Abfall als mit Additive Manufacturing (nachfolgend AM), da mehr Material geordert wird, als für den Bauprozess tatsächlich verbraucht wird.⁵⁷ Dies ist der Art der Herstellung geschuldet, die in einem Aushöhlungsprozess erfolgt. Leider wird die Überkapazität selten für andere Bauvorhaben genutzt und verursacht Lagerabfälle durch überschüssige Komponenten und Überproduktion.⁵⁸

Die Art der Errichtung eines Projekts durch AM kommt mit weit weniger Materialverlust aus (s. auch Punkt 3), die den schichtweisen Aufbau des Objektes und seinen genauen Verbrauch berechnet. Durch hohle Füllstrukturen, die im AM Anwendung finden, wird zusätzlich Material gespart.⁵⁹

Die additive Fertigung fördert Nachhaltigkeit durch die Entwicklung neuer Baustoffe. Bei der Materialentwicklung und Herstellung für das AM versucht man biologisch abbaubare

Stoffe und recycelte Materialien einzubeziehen, die Nachhaltigkeitskriterien erfüllen - mit der Auflage, den derzeit hohen Energieverbrauch in der herkömmlichen Herstellung und im Abfallaufkommen zu drosseln und den CO₂-Abdruck zu verkleinern. Thermoplaste aus der Müllverwertung, Holz und Biopolymere stellen hier einen vielversprechenden Ansatz dar (s. ausführlicher im Punkt 4.4).

Obwohl im Moment im 3D-Druckverfahren bei der Gebäudeerrichtung noch hauptsächlich Beton verwendet wird, so lässt sich bei diesem Verfahren erheblich Baustoff einsparen. Konkret vermindert sich in dem von der Universität Braunschweig entwickelten Shotcrete-3D-Druckverfahren der Betonverbrauch um bis zu 60% (s. Punkt 2.3). Auch hier werden CO₂-Freisetzungen deutlich eingespart.

Dadurch dass beim 3D-Druck keine Schalung notwendig ist, lassen sich eingesetzte Materialien bei Ablauf der Nutzungsdauer besser recyceln. Bei der klassischen Schalung wird häufig behandeltes Sperrholz aufgrund seiner leichten Bearbeitbarkeit eingesetzt. Durch den Kontakt mit frischem feuchtem Beton verdirbt das Holz und schränkt so die Nutzungsdauer des Baus erheblich ein. Das mit Leim und chemischen Stoffen versetzte Holz lässt sich nicht recyceln, sondern obliegt als Sonderabfall besonderen Entsorgungsrichtlinien. Diese Problematik fällt beim AM weg.⁶⁰

Durch das 3D-Druckverfahren wird ein weitgehender Rückbau eines solch hergestellten Gebäudes möglich sein, da grundsätzlich weniger unterschiedliche Baukomponenten wie beim herkömmlichen Hausbau eingesetzt werden müssen, um gleiche Funktionalität zu gewährleisten. Der einfachere Rückbau, in der Planungsphase schon berücksichtigt, ermöglicht die Aufarbeitung der eingesetzten Materialien in sortenreinere Komponenten.⁶¹

4.4 Materialentwicklung und Digitalisierung

Die additive Fertigung hinsichtlich der Materialien sind noch im Frühstadium, mit denen computerbasierten Drucker und die Robotik arbeiten können. Die am häufigsten verbreitete Form des 3D-Drucks ist auf Beton spezialisiert. Die Entwicklung von Bauelementen erfolgt hauptsächlich durch selektives Binden oder Beton-Extrusion (s. Punkt 2.3). Die Verwendung von Beton ist ein Nachteil, den man durch Neuentwicklung von Baustoffen aus erneuerbaren oder recycelten Baustoffen umgehen kann. Mineralische Baustoffe benötigen hohen Anteil an Bindemittel und werden nach wie vor aus nicht erneuerbaren Ressourcen gewonnen. Es müssen langfristige Lösungen gefunden werden, um den Einsatz von Beton auf ein Minimum zu reduzieren. Die Industrie ist bei der Herstellung von Zement für 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich.⁶² Ein neuer Ansatz besteht auch in der Einarbeitung von CO₂ in die Betonmasse, die im 3D-Druckverfahren eingesetzt wird. Er kann den ökologischen Fußabdruck von Beton und Zement noch weiter minimieren. Die additive Fertigung bietet nun das Potenzial, nicht nur in der Gestaltung innovativ zu sein, sondern auch kreativ in der Weiterentwicklung innovativer Materialien⁶³. Von der Firma i.tech 3D wurde ein Hightech-Beton⁶⁴ entwickelt, der fast vollständig recycelbar ist. Das Material wurde für ein Einfamilienhaus in Beckum verwendet, das das erste dieser Art in Deutschland war.⁶⁵ Hier liegt folglich das

ökologisches Potenzial des 3D-Druckverfahrens, das als additive Methode deutlich weniger Beton während des Bauprozesses verbraucht und somit eine bessere Klimabilanz hinsichtlich der CO₂-Produktion hat.

Alternativ lässt sich nachhaltiges Material wie beispielsweise Naturfasern wie aus Holz oder Biopolymeren in Bauelementen wie Fassadenteilen verarbeiten (Kromoser)⁶⁶. Bislang werden die anfallenden Restholzbestände **aus Holz** wie Sägemehl, Hackschnitzel und Holzspäne von der Industrie nicht umfassend aufgebraucht. AM bietet hier das Potenzial, Holzabfälle weiter zu verwerten. Ein entsprechendes Verfahren beforscht die Technische Universität in München und das Fraunhofer Institut: die Methode der Individual Layer Fabrication (ILF).⁶⁷ Mit ihrer Hilfe kann man Bauteile mit einem Holzanteil von bis zu 85% herstellen, die hinsichtlich Festigkeit den üblichen Normen der Holzwerkstoffe entsprechen. Die Herstellung erfolgt durch Laminieren des Holzmaterials durch Binder Jetting (s. Punkt 2.3).

Ein ähnliches Prinzip wurde uns in der Vorlesung von Benjamin Kromoser vorgestellt. Als Ausgangsmaterial des vorgestellten biobasierten Wandsystem finden hier die Abfallprodukte der Primär- und Sekundärproduktion aus der Holzindustrie Weiterverwendung. Die einzelnen Schichten werden mit einem biobasierten Bindemittel verbunden - gewonnen aus dem **Biopolymer** Lignin, ein Abfallprodukt aus der Papierindustrie, das sonst verbrannt würde. Hergestellt wurde diese 3D-Biowall mit ein 6-achsigen Roboterarmsystem. Der Werkstoff der „Biowall“ ist 100% recyclingfähig.

Die jeweilige Substanz zum 3D-Druck bildet eine Herstellungseinheit mit dem Drucker oder Roboter. Durch **digital gesteuerte Bauprozesse** unter Einbezug von Industrierobotern mit entsprechendem Materialauftragskopf lässt sich das Potential des 3D-Drucks in der Fertigung ausschöpfen, s. auch VDI Norm 2860⁶⁸. Der vielversprechender Ansatz ist aus der Notwendigkeit geboren, mittels AM große Objekte genauer und wiederholt additiv herzustellen und mit dem 3D-Druck eine stärker automatisierte und integrierte Produktion zu erreichen, vor allem, weil die exakt programmierten Roboter keine Fehler machen. Ebenso wird er der Herstellung individualisierter Bauteile gerecht. Der Begriff Industrie 4.0 findet hier Anwendung, der die Digitalisierung in der industriellen (Bau-)Produktion bezeichnet, d. h. die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine oder Maschine zu Maschine.⁶⁹

5. Heutige Einsatzmöglichkeiten

Nachdem der Hochbau mit 3D-Druck noch ein Nischendasein im Hausbau einnimmt, so könnte die additive Fertigung im Bestandsbau eine interessante Lücke füllen, da sie sich in die jeweiligen Vorgaben der Erweiterung wie Aufstockung, Ergänzung und Sanierung perfekt einpassen oder aufbauen lässt. Dies ist der Leichtbauweise der Bauelemente durch den 3D-Druck geschuldet.

Eine erste Bauinvention dieser Art gab es in Lindau/ Deutschland, wo ein bestehendes Einfamilienhaus aus den 1960er Jahren um ein Stockwerk erweitert werden sollte. Diese wurde mit der Firma Peri⁷⁰ und dem Architekturbüro Baldauf geplant und umgesetzt. Sie setzten bei der Erstellung des Stockwerks eine Neptungrasdämmung neben einer Schüttdämmung im äußersten Zwischenraum der Wände ein, die dreischalig gedruckt wurden. Das Holzfaltdach in 3D-Plänen wurde montagefertig erstellt und eine 3D-gedruckten Tragstruktur gefertigt. Die Wände wurden ebenso in 3D mit allen benötigten Leitungen wie Leerrohren und Anschlüssen geplant und gedruckt. Die Herstellung und der Errichtung des Stockwerks lief durch die Vorarbeiten nahezu CO₂-neutral ab.⁷¹

Das zum Druck eingesetzte Material "i.tech 3D" wurde von HeidelbergCement speziell für den 3D-Druck entwickelt. Seine Eigenschaften harmonisiert sehr gut mit dem BOD2, einem Spezialdrucker über drei Achsen auf einem Metallrahmen. Er kann jede benötigte Position einnehmen und muss nur einmal kalibriert werden.⁷²

Nachdem die additive Fertigung auch sehr gut im kleinerem Maßstab einsetzbar ist, wäre sie eine ausgezeichnete Maßnahme zum Erhalt, zur Modernisierung oder Erweiterung im Denkmalschutz. Die ursprüngliche Bausubstanz bliebe erhalten, die Neuerungen wären 1:1 im Stil des Baudenkmals umsetzbar. Mittels der digitalisierten Planung (s. Rapid Manufacturing, Punkt 2.2) können die gewünschten Umbaumaßnahmen hinsichtlich Statik passgenau entwickelt werden. Eine geschickte Materialauswahl, die beispielsweise Sandstein ähnelt, könnte mittels 3D-Extrusionsverfahren aufgebaut werden (s. Punkt 2.3). Die Nutzungsdauer von Altimmobilien, Bestandssubstanz oder historischen Gebäuden können durch geeignete Modernisierungen deutlich verlängert werden: Instandsetzung vor Abriss als Beitrag zur Nachhaltigkeit.⁷³

Die heutige Architektur benötigt solche Inventionen, um die Digitalisierung in der Baufertigung voranzutreiben und die Errichtung deutlich schneller zu gestalten. Die Digitalisierung wirkt auch dem Fachkräftemangel am Bau entgegen. Weniger Arbeitende werden in völlig neuen Betätigungsfeldern eingesetzt werden können. Sie könnte die Nachfrage an Wohnraum besser bewältigen und Engpässe im Bauwesen schneller beseitigen. Die Bauberufe werden durch den Einsatz von 3D-Druckern anspruchsvoller und interessanter.⁷⁴

6. Resümee

Der Bausektor steht vor einer Vielzahl an Herausforderungen, die innovative Lösungsansätze in der Zukunft benötigt. Daher braucht man Technologien, um den Bauprozess und den Erhalt der Gebäude effizienter zu gestalten, Ressourcen zu sparen, und den Focus auf Klimaschutz zu setzen. Ein vielversprechender Ansatzpunkt bietet hier die Beschäftigung mit der Additiven Fertigung.

Sie bietet viele Aspekte, die Bauwirtschaft zu revolutionieren. Durch die Einsparung an Material wie Beton und die Herstellung von Werkzeugen vor Ort ist der CO₂-Fußabdruck

dieser Methode deutlich geringer. Durch die Entwicklung neuer Baustoffe aus Recyclingmaterial (Thermoplaste), recycelten Betons und nachwachsender Rohstoffen wie Holz lassen sich schon in der Planungsphase Parameter durch entsprechende Software (BIM) festlegen, wie diese Materialien sich später wiederverwenden lassen. Urban Mining zur Rohstoffgewinnung wird eine tragende Rolle in der Materialbeschaffung spielen, die Kreislaufwirtschaft am Bau kann sich entwickeln.

Umweltaspekte wie die Einsparung an Baumaterial, an Lagerhaltung und ein verringerter Energiebedarf bei der Herstellung und Fertigung tragen zur Klimafreundlichkeit bei. Der Transport und seine nachgelagerte Logistik fallen beim 3D-Druck nur noch sehr eingeschränkt an, da direkt vor Ort gearbeitet werden kann. Die additive Fertigung führt somit zur grundlegenden Änderung bei der Etablierung der Kreislaufwirtschaft am Bau.

Dieses Verfahren lässt zudem eine größere Variabilität hinsichtlich Design und nachträglichen Veränderungen zu. Bauwerke mittels 3D-Druck zu errichten, gehen mit einer immensen Zeitersparnis einher und sind daher auch um ein Vielfaches kostengünstiger.

Große Fortschritte sind in der Anwendung als Hybridbauweise bei Großbauteilen festzustellen, d.h. additive mit subtraktiven Verfahren werden kombiniert. Praktisch erfolgt die Herstellung des gewünschten Bauteils, dessen Oberflächen nur noch durch Schleifen und Polieren bearbeitet werden muss. Teile können ähnlich wie in der Fertigungsbauweise vorgefertigt und in den eigentlichen Bau verbracht werden oder werden direkt an der Baustelle gefertigt (s. als Beispiel die Aufstockung eines Hauses in Lindau, s. Punkt 5). Das 3D-Druck-Verfahren wird eine Bereicherung in der klassischen Fertigung sein, da die gefertigten Teile neben der Kosten- und Zeitersparnis in der genauen Ausführung und Überführung in ihre Funktion herkömmlichen Verfahren überlegen sind. Auch im Denkmalschutz wird der 3D-Druck gut einsetzbar sein.

Eine große Einschränkung stellt im Moment noch die Umsetzbarkeit im großen Stil dar. Deswegen eignet sich das Verfahren derzeit nur für Einzelanfertigungen und kleine Stückzahlen. Auch ist die Anwendung im Hochbau über mehrere Stockwerke begrenzt, da das Verfahren hinsichtlich Stabilität und Statik noch nicht in jedem Fall tragfähig ist. Der Einsatz neuartiger, nachwachsender Baustoffe könnte hier Abhilfe schaffen. Ein Problem stellen auch die Roboter dar, die vor Ort eingesetzt werden. Sie sind in der Anschaffung teuer. Des Weiteren müssen sie mit bestimmten Baustoffen und ihren spezifischen Materialeigenschaften (Dichte Festigkeit, Temperatur und Gewicht) drucken können.

Verbindliche Prüfmethode und Normen für die eingesetzten Baustoffe sind unabdingbar, ebenso wie die gesetzliche Regelung für das Additive Manufacturing in der EU. Eine vollständige Beherrschung der Fließeigenschaften, mögliche Verformungen und Trocknungsprozesse des eingesetzten Materials sind erforderlich, ebenso wie die Bewehrung in den Bauprozess des 3D-Drucks integriert werden muss.

Unter Einsatz der Digitalisierung und KI, ebenso spezieller Robotersystemen und neuartiger recyclebarer bzw. nachwachsender Baustoffe lassen sich die Vorteile der additiven Fertigung im Bauwesen in der Zukunft optimal umsetzen, vor allem wenn sie eine breite wirtschaftliche Basis und Umsetzung findet. Zukünftig wird das AM das Bauwesen entscheidend verändern.

Quellen:

- 01 Johann Fellner: „Material Cycles in the Building Sector - Opportunities and Limitations“. Vorlesung vom 02.12.2024
- 02 Die Bauwirtschaft: ein relevanter Treiber der CO2 -Emissionen [[Website](#), abgerufen 18.01.2025]
- 03 UN, Beyond foundations, Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector [[Website](#), abgerufen am 15.12.2024]
- 04 s. Fn. 03
- 05 statista, Entwicklung der Weltbevölkerungszahl von Christi Geburt bis zum Jahr 2023 [[Website](#), abgerufen am 12.12.2024]
- 06 Benjamin Kromoser: „3D Druck mit Holz“. Vorlesung vom 14.10.2024
- 07 Baustoffe und ihre Eigenschaften - Werkstoffe, S. 6 [[Website](#), abgerufen 15.01.2025]
- 08 s. Fn. 06
- 09 Makerverse, 7 Wege, wie AM die Nachhaltigkeit fördert [[Website](#), abgerufen am 28.12.2024]
- 10 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Klimaschutzplan 2050, S. 45 [[Website](#), abgerufen 12.01.2025]
- 11 Blog [[Website](#), abgerufen am 11.12.2024]
- 12 BFT, Additive Fertigung im Betonbau – aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen [[Website](#), abgerufen am 11.12.2024]
- 13 s. Fn. 11
- 14 s. Fn. 11
- 15 s. Fn. 11
- 16 PERI, 3D-Betondruck [[Website](#), abgerufen am 03.01.2025]
- 17 Alexander Karaivanov: „Additiv Manufacturing in the Construction Industry“. Vorlesung vom 11.11.2024
- 18 s. Fn. 11
- 19 s. Fn. 11
- 20 ingenieur.de, Was ist additive Fertigung? Definition, Anwendung, Potenzial [[Website](#), abgerufen am 26.01.2025]
- 21 Marcel Thum, Neue ISO/ASTM-Norm für 3D-Druck im Bauwesen veröffentlicht [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- 22 s. Fn. 12
- 23 Andreas Gebhardt, Additive Fertigungsverfahren, Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion [[Website](#), abgerufen am 28.12.2024]
- 24 s. Fn. 23
- 25 s. Fn. 23
- 26 Gerrit Placzek, Veränderungen in der Bauproduktionsstrategie durch die Integration der additiven Fertigung [[Website](#), abgerufen am 04.01.2025]
- 27 s. Fn. 23
- 28 s. Fn. 23
- 29 BFT, Additive Fertigung im Betonbau – aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen [[Website](#), abgerufen am 26.01.2025]
- 30 Additive vs. Subtraktive Fertigung [[Website](#), abgerufen am 31.12.2024]
- 31 Baunit BauMinator®: 3D-Betondruck erstmals live [[Website](#), abgerufen am 28.12.2025]
- 32 s. Fn. 17
- 33 Tobias Rosnitschek et.al., Leichtbau - Topologieoptimierung für die Additive Fertigung [[Website](#), abgerufen am 28.12.2024]

- 34 Philipp Süß, Wie funktioniert Topologieoptimierung für die additive Fertigung? [[Website](#), abgerufen am 28.12.2024]
- 35 Lotte Kristoferitsch: „Social Design/ EOOS Social Design“. Vorlesung vom 25.11.2024
- 36 Stefan Guggenberger, 3D-Insights - Diese Probleme muss die additive Fertigung lösen [[Website](#), abgerufen am 04.01.2025]
- 37 s. Fn. 36
- 38 s. Fn. 36
- 39 s. Fn. 17
- 40 Nina Eisenmenger et.al., Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Ressourcennutzung in Österreich 2020, Band 3, Key Messages [[Website](#), abgerufen am 03.01.2025]
- 41 s. Fn. 01
- 42 VDI, Inkonsequenz bremst Recyclingbeton [[Website](#), abgerufen am 14.01.2025]
- 43 s. Fn. 42
- 44 Europäische Investitionsbank, Lineare Wirtschaft – was ist das? [[Website](#), abgerufen am 05.01.2025]
- 45 s. Fn. 44
- 46 Madita Harnisch, Nachhaltiges Bauen: Cradle to Cradle als Zukunft der Materialwirtschaft [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- 47 Europäisches Parlament, Kreislaufwirtschaft [[Website](#), abgerufen am 28.12.2025]
- 48 s. Fn. 01
- 49 Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung - ErsatzbaustoffV) [[Website](#), abgerufen am 28.12.2024]
- 50 Industrie 4.0 [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- 51 s. Fn. 01
- 52 Umweltbundesamt, Urban Mining [[Website](#), abgerufen am 04.01.2025]
- 53 s. Fn. 52
- 54 Peter Bauer: „Geometrie, Tragwerk und Ressourcen“. Vorlesung vom 21.10.2024
- 55 Verordnung (EU) 2020/852 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen [[Website](#), abgerufen am 18.01.2025]
- 56 Baunetz_Wissen; Ökobilanz, Datengrundlage für die ökologische Bewertung eines Bauwerks [[Website](#), abgerufen 04.01.2025]
- 57 s. Fn. 09
- 58 s. Fn. 30
- 59 VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 35: Ressourceneffizienz durch additive Fertigung, S. 26, 55 – 57, 61 [[Website](#), abgerufen am 12.12.2024]
- 60 s. Fn. 59
- 61 s. Fn. 59
- 62 WWF, Klimaschutz in der Beton und Zementindustrie Hintergrund und Handlungsoptionen, S. 6 [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- 63 Astrid Z , Neue Methode für 3D-Betondruck reduziert ökologischen Fußabdruck [[Website](#), abgerufen am 05.01.2025]
- 64 Heidelberg Materials, Hightech-Material für den 3D-Betondruck [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- 65 s. Fn. 16
- 66 s. Fn. 06
- 67 Joram, Ein neues Verfahren für den 3D-Druck mit Holz [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]

- 68 Helmut Naber, Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente, Grundlagen mobiler Roboter [[Website](#), abgerufen am 20.12.2024]
- 69 s. Fn. 50
- 70 s. Fn. 16
- 71 3Druck.com, Weltweit erste Wohnhausaufstockung mit 3D-Drucktechnologie [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- 72 s. Fn. 64
- 73 Stephan Partschefeld, et.al., Additive Fertigung mineralischer Formkörper zur Nachbildung von Natursteinen für die Denkmalpflege [[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- 74 subauftrag, Gebäude aus dem 3D-Drucker: Mit 3D-Druck ein Haus bauen [[Website](#), abgerufen am 18.01.2025]

Bildnachweise:

- Seite 03: Abbildung 1: I.Hamilton & H. Kennard 2020 Global Status Report for Buildings and Construction, Umweltprogramm der Vereinten Nation; adaptiert aus „IEA World Statistics and Balances“ and Energy Technologies Perspectives (IEA; 2020d; IEA 2020b)
[[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- Seite 06: Abbildung 2: Additive Manufacturing Gehard & Hötter 2016 4 - rapid prototyping. In Gebhardt & Hötter (Eds.), Additive manufacturing (S. 291-352) Hanser
[[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- Seite 09: Abbildung 3: Circular Economy Report, Lineares System, DNGB 2019
[[Website](#), abgerufen am 10.01.2025]
- Seite 10: Abbildung 4: Cradle to Cradle NGO, Cradle to Cradel Prinzip biologisch & technisch, Jahr unbekannt
[[Website](#), abgerufen 18.01.2025]

Submission

Masterprogramm Architektur

Emergent Fields in Architecture

Schwerpunkt: Additive Manufacturing

verfasst von Sophia Meyer MatrikelNr. 12236531 WS 2024/25

Unter der Leitung von

Senior Lecturer Dr.in Dipl.ing.in Sandra Häuplik-Meusburger

Institut für Architektur und Entwerfen

E253-05 Forschungsbereich Hochbau, Konstruktion und Entwerfen

Submission

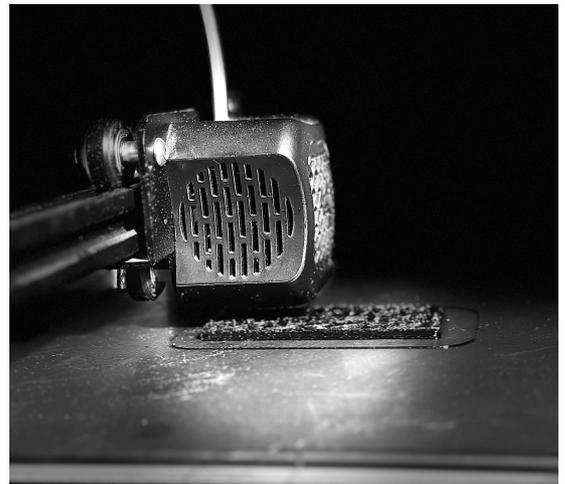
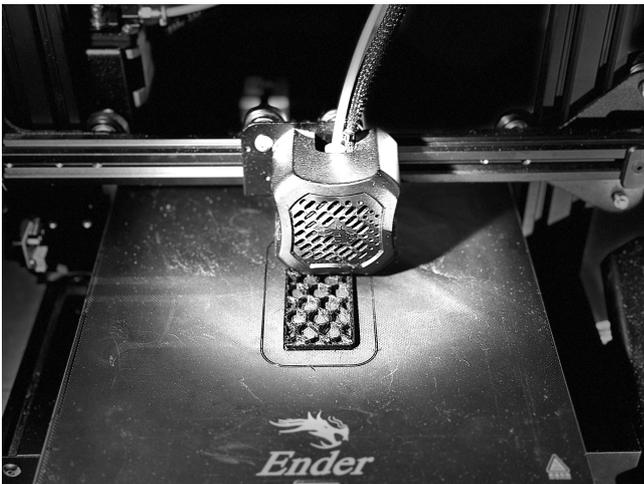
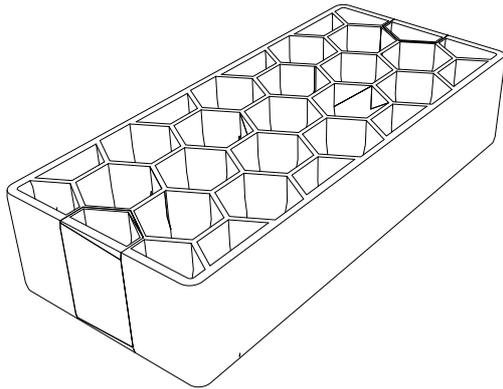
Wie in meiner Arbeit „Additive Manufacturing“ aus dem Modul „Emergent Fields in Architecture“ ausführlich dargelegt, wird sich das Architekturwesen in der Zukunft immer mehr mit dem Bauen im Bestand auseinandersetzen müssen, um den Ressourcenverbrauch und die damit verbundenen Umweltbelastung zu verringern. Nachdem die additive Fertigung auch sehr gut im kleinerem Maßstab einsetzbar ist, wäre sie eine ausgezeichnete Maßnahme zum Erhalt, zur Modernisierung oder Erweiterung in Bestandsbauten oder im Denkmalschutz. Die ursprüngliche Bausubstanz bliebe erhalten; zu ersetzende Teile oder Aufbauten können mittels der digitalisierten Planung in die gewünschten Umbaumaßnahmen hinsichtlich Statik passgenau entwickelt und hergestellt werden (Prototyping und Rapid Manufacturing). Eine geschickte Materialauswahl, die beispielsweise Sandstein ähnelt, könnte mittels 3D-Extrusionsverfahren aufgebaut werden. Die Nutzungsdauer von Altimmobilien, historischen Gebäuden oder der Bestandssubstanz ganz allgemein kann durch geeignete Modernisierungen deutlich verlängert werden: Instandsetzung vor Abriss als Beitrag zur Nachhaltigkeit, zur Verminderung des Ressourcenverbrauchs und der Umweltbelastung. Der Bestand wird so modernisiert und ertüchtigt: mit weniger Material, schnellerer Bauzeit und überlegenen, recyclingfähigen und damit umweltfreundlichen Materialien. Der 3D-Druck wird einen Paradigmenwechsel beim Bauen im Bestand durch die Synthese traditioneller und neuer digitaler Fertigungstechniken herbeiführen.

Daher habe ich als Kernüberlegung die mögliche Sanierung einer Bestandswand mittels 3D-Druck ausgewählt, um die Einsatzmöglichkeit der additiven Fertigung darzustellen. Neuerungen wären 1:1 im Stil des Baudenkmals umsetzbar. Mein Beispiel zeigt eine effektive Sanierung ohne allzu große Eingriffe in eine bestehende Wand. Umgesetzt wurde

das Modell mittels einer binomischen Leichtbauweise: Die vertikale Stützstruktur dient zur Ertüchtigung (Support) der verwendeten Wabenstruktur (Infill). Das 3D-Modell wurde durch das Programm Rhino 3D in eine STL-Datei als Datenübertragungsformat für das Druckvorhaben übersetzt. Als Filament wurde ein biologisch abbaubares Material aus PLA (Polylactid aus Stärke) verwendet, um das Objekt mit dem ENDER-3 3D-Drucker zu drucken, der auf dieses Material geeicht ist. Die Drucktemperatur des PLA betrug 195 Grad Celsius, die Druckplatte wurde mit 60 Grad beheizt, um eine Haftung zu gewährleisten.

Ziel war eine Synthese zwischen den unterschiedlichen Fertigungstechnologien des Objektes zu schaffen - der durch subtraktive Fertigung entstandenen Bestandsmauer (weiß) und dem durch additive Fertigung neu eingefügten, im 3D-Druck hergestellten Ersatzteil (schwarz). Die lange Druckdauer war der schwierigen Einstellung des Nullpunktes geschuldet. Unebenheiten konnten letztendlich mittels des Slicers ausgeglichen werden, übersetzt von der STL-Datei in einen verständlichen Code. In einem Post-processing sind die Waben des Modells nachgeschliffen worden. Das Modell ist ein Prototyp, der als Vorlage für das Rapid Manufacturing des letztendlich benötigten Endbauteils verwendet werden kann. Der Verlauf der Entwicklung des Modells zeigen nachfolgend eine Skizze des Modells und Fotos.

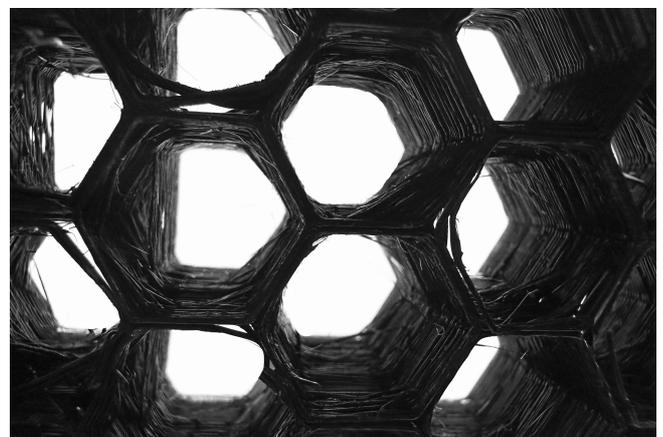
Produktion des Prototypen



Post Processing



Vorher



Nachher

