

Effizienter Brückenbau: Additive und konventionelle Fertigung im konkreten Vergleich

SCHEIDT, David

03711710

Abstract

Additive Fertigung als Ersatz für aufwändige Schalung oder individuelle Wohnungsbauprojekte bietet im Bauwesen zunehmend neue Möglichkeiten. Doch auch abseits des Hochbaus eröffnen sich durch das Herstellungsverfahren innovative Anwendungsbereiche. Ob die neue Technologie allerdings schon wettbewerbsfähig gegenüber der konventionellen Fertigung ist und auch für Ingenieurbauwerke eingesetzt werden kann, soll anhand einer Vergleichsrechnung zwischen konventioneller und additiver Fertigung erörtert werden.

Schlagwörter: additive Fertigung, Beton, Produktivität, Strukturoptimierung, Nachhaltigkeit

1 Einleitung

Additive Fertigung ist in der metallverarbeitenden Industrie bereits weit verbreitet. Bei Herstellern wie BMW [1] und Airbus [2] ist die Technologie fester Bestandteil der Serienfertigung. Auch das Bauwesen entdeckt nach und nach die Vorteile der additiven Fertigung [3]. Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit dem Vergleich zwischen der konventionellen und der additiven Fertigung am Beispiel des von der Forschungsgruppe „Create“ (University of Southern Denmark) gefertigten Demonstrators „3DLightBeam+“ [4]. Ziel ist es dabei, die 3D-gedruckte Struktur hinsichtlich Materialaufwand und Nachhaltigkeit in einen Kontext zur konventionellen Bauweise mit Schalung und Ort beton zu setzen.

2 3DLightBeam+

Der betrachtete additiv gefertigte Träger „3DLightBeam+“ (Abb. 1) entstand 2023 im Zuge der Strukturoptimierung des Vorgängers „3DLightBeam“ [5] mit dem Fokus, die Analyse von 3D-gedruckten Strukturen zu vereinfachen und den CO₂-Fußabdruck von Betonteilen aus dem 3D-Drucker zu reduzieren. Der Balken ($l = 300$ cm; $b = 16$ cm; $h = 45,5$ cm) selbst wurde im Materialextrusionsverfahren mittels eines 6-Achs-Roboters entlang der Trägerlängsachse lagenweise monolithisch gefertigt, wobei händisch Bewehrung ($\varnothing 6$ mm nach Lage 4 & 12) zugelegt wurde. Die vom Roboter geführte Düse konnte mit ihrem Durchmesser von 25 mm abhängig von der Druckgeschwindigkeit 25 mm (550 mm/s) bis 55 mm (150 mm/s) breite und 10 mm hohe Lagen drucken. Dabei kam ein Faserverstärker Zement der Firma Weber Saint Gobain zum Einsatz [4].

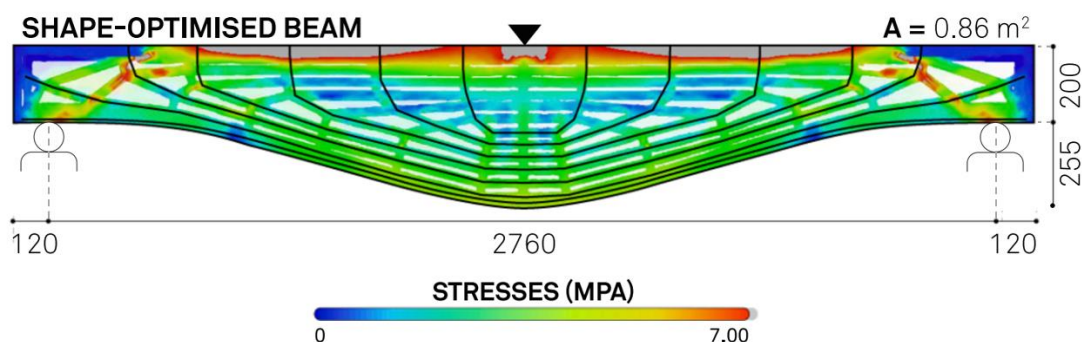


Abbildung 1: "3DLightBeam+" Abmessungen und Spannungsverteilung [3].

3 Kennwerte des 3D-Drucks

Um eine Vergleichsrechnung mit der konventionellen Bauweise durchführen zu können, müssen zunächst einige Materialparameter ausgewertet werden. Die maximale vertikale Durchsenkung (w_{\max}) des Demonstrators lässt sich zu 13 mm auslesen und wird in der Mitte des Trägers gemessen. Die Druckfestigkeit ist entsprechend des additiven Fertigungsverfahrens stark anisotrop. Für die Vergleichsrechnung wird daher die an einem Referenzzylinder ($\varnothing 100 \times 200$ mm) in monolithischer Form ermittelte Druckfestigkeit von 50,5 MPa herangezogen. Die Dehnung belief sich dabei auf 0,82 mm bis zum Bruch. Daraus lässt sich das E-Modul zu 12.561 MPa errechnen.

Für die Vergleichsrechnung wird im Folgenden ein konventioneller Beton C50/60 angesetzt. Die Zylinderdruckfestigkeit beläuft sich hier auf 50 MPa und entspricht in etwa der Referenzprobe. Der E-Modul wird dementsprechend zu 37.000 MPa [6] gewählt. Der erhöhte E-Modul verglichen mit dem des Druckbetons begründet sich auf dem Anteil der Gesteinskörnung im Normalbeton. Dieser Zusammenhang wird in [7] näher erläutert. Den E-Modul an dieser Stelle dem Normalbeton entsprechend zu wählen, ist in diesem Zusammenhang also sinnvoll.

4 Auslegung des Konventionellen Bauteils

Um die Durchsenkung von bei einer Auflast von 70 kN in Feldmitte ($l = 1,38$ m) entsprechend der des Demonstrators zu gestalten muss zunächst das benötigte Trägheitsmoment für das angesetzte E-Modul von 37000 MPa anhand von Gleichung (1) errechnet werden.

$$w_{\text{mitte}} = F * l^3 / 48 * EI \quad (1)$$

Das benötigte Trägheitsmoment beläuft sich somit auf $0,000062 \text{ m}^4$. Der für die weitere Berechnung gewählte Querschnitt ist in Abb. 2 mit seinen Abmessungen und Kennwerten dargestellt.

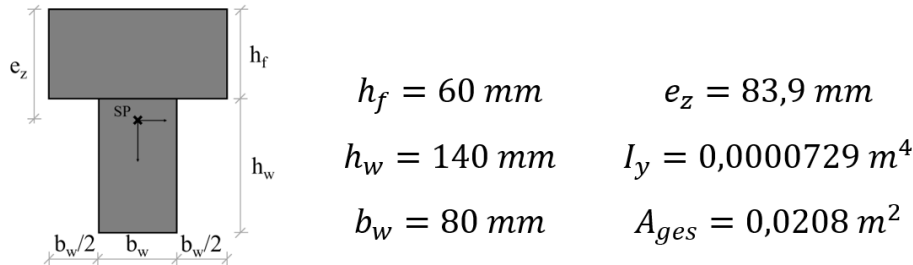


Abbildung 2: Kennwerte des Vergleichsquerschnitts

Im weiteren Verlauf wird nur eine Bemessung für die Längsbewehrung des Trägers auf charakteristischem Niveau durchgeführt um eine hypothetische Machbarkeit des Trägers nachzuweisen. Berechnungen zu Querkrafttragfähigkeit, Rissbreitenbegrenzung und Stabilitätsversagen werden nicht angeführt, sind für eine reale Bemessung aber zu beachten. Zunächst wird das Bemessungsmoment bestimmt, welches sich aus Eigengewicht und Auflast zu 48,8 kNm nach Gleichung (2) berechnet.

$$M_{Eds} = 0,25 * F * l + 0,125 * A_{ges} * 25 \text{ kN/m}^3 * l^2 \quad (2)$$

Für die Bemessung muss zunächst der Hebelarm der inneren Kräfte ermittelt werden. Hierfür wird von einer Betondeckung von 2,5 cm und einer Querbewehrung von 8 mm ausgegangen. Damit entspricht die Betondeckung der maximal möglichen Betondeckung des Demonstrators ausgehend von 55 mm Lagenbreite und 6 mm Bewehrung. Die Bewehrung des konventionellen Querschnitts wird zweilagig ausgeführt. Die statische Nutzhöhe „d“ des Querschnitts ergibt sich so zu ca. 14 cm. Anhand von [6] lässt sich der dimensionslose Beiwert mit Gleichung (3) zu 0,298 berechnen. Die Druckfestigkeit wird dabei charakteristisch zu 50 MPa angesetzt.

$$\mu_{Eds} = M_{Eds} / (b_f * d^2 * f_{ck}) \quad (3)$$

Der erforderliche Bewehrungsstahl lässt sich anhand der Tafeln mit dimensionslosen Beiwerten und Gleichung (4) ermitteln und beläuft sich bei charakteristischer Streckgrenze von 500 MPa auf 8,5 cm² wobei der Beiwert ω_1 sich nach [6] zu 0,3701 bestimmt.

$$A_{s,erf} = (\omega_1 * d * b * f_{ck}) * \frac{1}{f_{yk}} \quad (4)$$

Gewählt wird demnach eine Bewehrung 2Ø16 ($A_s = 4,02 \text{ cm}^2$) in der unteren Lage und 1Ø25 ($A_s = 4,91 \text{ cm}^2$) in der oberen Lage. Der vorhandene Bewehrungsquerschnitt beläuft sich auf 8,98 cm² und ist somit größer als die rechnerisch erforderliche Bewehrung des Querschnitts.

5 Fazit

Die oben gezeigte Bemessung führt zu einem rund 156 kg schweren Träger in konventioneller Bauweise. Damit ist dieser dem additiv gefertigten Balken um 19 kg überlegen, bei gleichzeitig geringerer Durchsenkung aufgrund eines ca. 15% höheren Flächenträgheitsmoments des T-Querschnitts. Trotz aufwendiger Optimierung bleibt der gedruckte Träger somit noch weit hinter der konventionellen Bauweise zurück. Wie bereits erwähnt, ist dies vor allem den in [7] erwähnten Effekten aus der Gesteinskörnung geschuldet. Die in [5] berechnete CO₂-Ersparnis der konventionellen Fertigung kann dementsprechend weiter erhöht werden und so ihren Vorsprung zur gedruckten Struktur, unabhängig von dem in [5] verwendeten Schalungskonzept, weiter ausbauen. Festzuhalten bleibt allerdings, dass der Aufwand an Personal und die deutlich gesteigerte Produktivität einer ausgereiften additiven Fertigung einen klaren Fortschritt gegenüber dem heutigen Technologiestandard versprechen. Besonders Neuentwicklungen in der Drucktechnik, welche die Zugabe von Gesteinskörnung größeren Durchmessers ermöglichen, sind dabei, wie oben gezeigt, wettbewerbsentscheidend. Aktuelle Forschungsergebnisse, wie z.B. die der TU Dresden [9], liefern hierzu bereits vielversprechende Fortschritte, um in Zukunft den knapp 200-jährigen Vorsprung des Ortbetons aufzuholen.

6 Quellen

- [1] ExOne, "Inside the Pioneering Additive Manufacturing Journey of BMW and ExOne," 2023. [Online]. Verfügbar: <https://www.exone.com/en-US/Resources/News/BMW>. [Zugriff am: 21-Mai-2024].
- [2] Airbus, "Airbus Helicopters steigert Wettbewerbsfähigkeit mit 3D-Druck," 2023. [Online]. Verfügbar: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-10-airbus-helicopters-boosts-competitiveness-with-3d-printing>. [Zugriff am: 21-Mai-2024].
- [3] voxeljet, "Mit 3D-Druck effizienter zur komplexen Betonschalung," 2023. [Online]. Verfügbar: <https://www.voxeljet.de/additive-fertigung/case-studies/architektur/mit-3d-druck-effizienter-zur-komplexen-betonschalung/>. [Zugriff am: 21-Mai-2024].
- [4] L. Breseghello, H. Hajikarimian, H. B. Jørgensen, und R. Naboni, "3DLightBeam+. Design, simulation, and testing of carbon-efficient reinforced 3D concrete printed beams," *Engineering Structures*, Bd. 292, 2023.
- [5] S. Gislason, S. Bruhn, L. Breseghello, B. Sen, G. Liu und R. Naboni, "Porous 3D printed concrete beams show an environmental promise: a cradle-to-grave comparative life cycle assessment," *Clean Technologies and Environmental Policy*, Springer, 2022.
- [6] Schneider, *Schneider Bautabellen*, 23. Auflage. Köln: Rudolf Müller, 2023.
- [7] O. Graf, *Die Eigenschaften des Betons*. Berlin: Springer, 1960.
- [8] B. Wietek, "Lebenszyklus," in *Stahlbetonerhaltung*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [9] M. Taubert und V. Mechtcherine, "3D-druckbarer Normalbeton mit grober Gesteinskörnung," 61. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), Dresden, 2023.