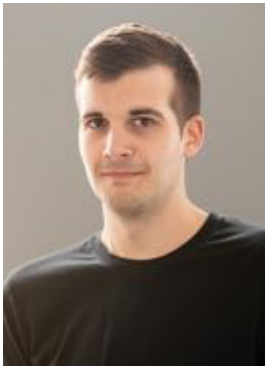


# Datengestützter Beton-3D-Druck

<https://doi.org/10.14459/mbs28.05>

*Daniel Auer, Freek Bos, Oliver Fischer*



**Daniel Auer, M.Sc.**

2016 B.Sc. Bauingenieurwesen, TUM  
2019 M.Sc. Bauingenieurwesen, TUM  
seit 07.2019 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
Lehrstuhl für Massivbau, TUM



**Dr.ir. Freek Bos**

1996-2002 Studium Architektur und Bautechnologie,  
TU Delft, NL  
2003-2004 Statiker/Projektleiter ABT, NL  
2004-2009 Doktorand TU Delft, NL  
2009-2010 Post-Doc, Universität Gent, BE  
2011-2015 Projektleiter/Spezialist Glas,  
Witteveen+Bos, Deventer, NL  
2015-2022 Ass. Prof. Massivbau, TU Eindhoven, NL  
seit 2022 Gruppenleiter Extrusionsbasierte additive  
Fertigung von Beton, Lehrstuhl f. Massivbau, TUM



**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer**

1988 Diplom Bauingenieurwesen, TUM

1989-95 Wissenschaftlicher Assistent, UniBw

1994 Promotion

1996-2009 Verschiedene Fach- und Führungspositionen in der Bauindustrie im In- und Ausland

2007 Diplomwirtschaftsingenieur, Univ. Hagen

seit 10.2009 Ordinarius für Massivbau, TUM

seit 2011 Prüflingenieur und EBA-Prüfer

**Der 3D-Betondruck revolutioniert die Bauindustrie, indem er eine höhere Geschwindigkeit, Kosteneffizienz, weniger Materialverschwendung und die Möglichkeit bietet, komplexe architektonische Entwürfe zu realisieren. Diese Vorteile hängen jedoch von der Bewältigung bedeutender technischer Herausforderungen im Zusammenhang mit der Prozesssteuerung und der Gewährleistung der strukturellen Integrität ab. In diesem Artikel wird die entscheidende Rolle der Echtzeit-Prozessüberwachung bei der Weiterentwicklung der 3D-Betondrucktechnologie hervorgehoben. Wir geben einen detaillierten Überblick über den Druckprozess und heben dabei die Herausforderungen bei der Materialvorbereitung, die Einschränkungen der Ausrüstung und die Notwendigkeit einer präzisen Steuerung von Parametern wie Materialfluss und Schichtdicke hervor. Am Lehrstuhl für Massivbau wurde ein umfassendes Überwachungssystem implementiert, das InfluxDB für die Datenspeicherung und Grafana für die Visualisierung verwendet und etwa 70 Schlüsselkennzahlen erfasst – darunter Umweltbedingungen, Mischer- und Pumpenleistung sowie Roboterbewegungen. Der Einsatz dieses Systems hat zu erheblichen Verbesserungen der Prozessstabilität und Produktqualität geführt, da Anomalien frühzeitig erkannt und Korrekturmaßnahmen schnell eingeleitet werden können. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass ausgeklügelte Überwachungssysteme unerlässlich sind, um die technologische Reife des 3D-Betondrucks zu erhöhen und seine breite Anwendung im Bausektor zu fördern.**

**3D concrete printing is revolutionizing the construction industry by offering increased speed, cost efficiency, reduced material waste, and the ability to create complex architectural designs. However, these benefits hinge on overcoming significant technical challenges related to process control and ensuring structural integrity. This paper underscores the critical role of real-time process monitoring in advancing 3D concrete printing technology. We provide an in-depth overview of the printing process, highlighting challenges in material preparation, equipment limitations, and the necessity for precise control of parameters like material flow and layer thickness. At the Chair of Concrete and Masonry Structures, we implemented a comprehensive monitoring system utilizing InfluxDB for data storage and Grafana for visualization, capturing approximately 70 key metrics – including environmental conditions, mixer and pump performance, and robotic movements. The deployment of this system has demonstrated substantial improvements in process robustness and product quality by enabling early detection of anomalies and facilitating swift corrective actions. These findings emphasize that sophisticated monitoring systems are vital for elevating 3D concrete printing to higher technological readiness and promoting its widespread adoption in the construction sector.**

## **Einleitung**

Die Bauindustrie erlebt mit dem Aufkommen der 3D-Betondrucktechnologie [1] einen transformativen Wandel. Bei dieser innovativen Methode werden computergesteuerte Maschinen eingesetzt, um Gebäude und strukturelle Komponenten durch präzise Schichtung von Betonmaterial herzustellen. Der 3D-Betondruck birgt zwar das Potenzial für eine höhere Bau- geschwindigkeit, Kosteneffizienz, weniger Materialabfall und die Erstellung komplexer architektonischer Entwürfe, doch diese Vorteile hängen weitgehend davon ab, dass die Technologie einen hohen Reifegrad erreicht.

In ihrem derzeitigen Entwicklungsstadium erfordert die Realisierung dieser Vorteile die Überwindung erheblicher technischer Herausforderungen. Eine genaue Überwachung des Druckprozesses ist unerlässlich, um die Qualität und strukturelle Integrität der gedruckten Strukturen zu gewährleisten. Die Beobachtung und Steuerung in Echtzeit ermöglicht die Anpas-

sung kritischer Faktoren wie Materialfluss, Schichtdicke und Aushärtungsbedingungen, die für die Vermeidung von Defekten und die Einhaltung von Sicherheitsstandards unerlässlich sind. Dieser Artikel untersucht den Aufstieg des 3D-Betondrucks im Bausektor und hebt die entscheidende Rolle hervor, die die Prozessüberwachung bei der Weiterentwicklung dieser neuartigen Technologie hin zu einer höheren technologischen Bereitschaft und einer breiten Akzeptanz spielt.

## Ablauf eines 3D Drucks im Bauwesen

Die Durchführung eines 3D-Betondrucks [2] umfasst eine Reihe sorgfältig geplanter und ausgeführter Schritte, um die strukturelle Integrität und Qualität des Endprodukts sicherzustellen. Der Prozess beginnt mit der Entwurfsphase, in der Ingenieure mithilfe von CAD-Software (Computer-Aided Design) ein detailliertes digitales Modell der geplanten Struktur erstellen. Die Struktur wird unter Berücksichtigung der Prinzipien des „Design for Additive Manufacturing“ entworfen, um sicherzustellen, dass die Geometrie, der Materialeinsatz und die strukturellen Anforderungen für den 3D-Druckprozess optimiert sind. Dieses Modell wird dann in ein für den 3D-Druck geeignetes Format umgewandelt, wobei das Modell in horizontale Schichten geschnitten und ein Werkzeugpfad generiert wird, der die Bewegungen des Industrieroboters bestimmt. In der Regel wird ein Probelauf des Industrieroboters durchgeführt, um sicherzustellen, dass der geplante Werkzeugpfad wie vorgesehen ausgeführt werden kann, da die Dynamik der Bewegungen und deren Beschränkungen nur mit spezialisierter, proprietärer Software überprüft werden kann.

Als Nächstes folgt die Materialvorbereitung, bei der eine spezielle formulierte Beton- bzw. Mörtelmischung oder ein kommerzielles erhältliches Material von großen Zementherstellern verwendet wird, um die erforderlichen rheologischen Eigenschaften, wie optimale Viskosität und Abbindezeit, zu besitzen, die eine reibungslose Extrusion und eine angemessene strukturelle Unterstützung während des Druckvorgangs ermöglichen. Anschließend erfolgt die Druckereinrichtung, bei der die Hardwarekomponenten (Roboter, Mischer, Pumpe) des 3D-Druckers zusammengebaut werden. Das trockene Material wird aus einem Silo oder manuell in einen Durchlaufmischer befördert, wo es mit einer festgelegten Menge Wasser über eine definierte Strecke in einer Mischkammer vermischt wird und

dann in den Materialtrichter der Betonpumpe fällt, in der Regel eine Exzentrerschneckenpumpe.

Eine Exzentrerschneckenpumpe arbeitet mit einem schraubenförmigen Rotor, der sich in einem Doppelhelix-Stator dreht und eine Reihe von abgedichteten Hohlräumen erzeugt. Während sich der Rotor dreht, wandern diese Hohlräume vom Einlass der Pumpe zum Auslass und transportieren die Flüssigkeit mit einem gleichmäßigen, kontinuierlichen Fluss, der Pulsationen minimiert, sodass sie sich für die Handhabung von viskosen und scherempfindlichen Materialien eignet. Die Umdrehungen pro Minute (U/min) müssen in der Regel je nach Steigung und Exzentrizität des Rotors kalibriert werden, um die gewünschte Durchflussrate und den gewünschten Druck zu erreichen. Um Verstopfungen zu Beginn des Pumpvorgangs zu vermeiden, wird der Materialschlauch oft intensiv mit Wasser gespült und dann Tapenkleister vorgeschmiert. Im Zusammenhang mit dem 3D-Betondruck treten jedoch mehrere Probleme auf. Die abrasiven Partikel in Betonmischungen können zu einem schnellen Verschleiß der Rotor- und Statoroberflächen führen, was zu einer verminderten Pumpenleistung und einer kürzeren Lebensdauer führt. Darüber hinaus können die hohe Viskosität und die heterogene Beschaffenheit von Beton zu Verstopfungen und ungleichmäßigen Durchflussraten führen, was für die bei 3D-Druckverfahren erforderliche Präzision ein kritischer Faktor ist. Ein wesentlicher Nachteil der Mörtelpumpen der aktuellen Generation besteht darin, dass sie für die Förderung großer Materialmengen bei hohen Geschwindigkeiten ausgelegt sind, was für traditionelle Bauverfahren optimal ist, für den 3D-Betondruck jedoch hinsichtlich der Entwicklung der Standfestigkeit nicht anwendbar ist. Der Prozess erfordert eine präzise Steuerung des Materialflusses, um Genauigkeit und Detailtreue in den gedruckten Strukturen zu gewährleisten; eine zu hohe Geschwindigkeit kann zu Überextrusion, verminderter Präzision und einer Beeinträchtigung der strukturellen Integrität führen.

Wenn der Druckvorgang beginnt, werden die Prozessüberwachung und -steuerung entscheidend. Dies beinhaltet die kontinuierliche Beobachtung von Parametern wie Materialflussrate, Schichtdicke und Umgebungsbedingungen mithilfe von Sensoren und Feedbacksystemen, um bei Bedarf Anpassungen in Echtzeit vorzunehmen. Nach Abschluss des Drucks wird die Struktur einer Aushärtungsphase unterzogen, um die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Schließlich werden Nachbearbeitungs-

schritte wie die Oberflächenveredelung und der Einbau zusätzlicher Verstärkungen durchgeführt, gefolgt von strengen Qualitäts- und Konformitätsprüfungen, um sicherzustellen, dass die Struktur alle relevanten Bauvorschriften und Sicherheitsstandards erfüllt. Nachbearbeitungsschritte, wie z.B. Fräsen und Schleifen werden teilweise gleich nach der additiven Fertigung eingeleitet, um sich durch den noch nicht erhärteten Beton einen Vorteil zu verschaffen. Bei gleichzeitiger Anwendung von additiven und subtraktiven Technologien und der Kombination der Vorteile beider Technologien spricht man von „hybrid manufacturing“.

Während des gesamten Prozesses ist eine sorgfältige Überwachung unerlässlich, um technische Herausforderungen umgehend zu bewältigen und so die Technologie auf einen höheren Bereitschaftsgrad zu bringen und sicherzustellen, dass die Vorteile des 3D-Betondrucks voll ausgeschöpft werden [3].

## Monitoring und Kontrolle des Prozesses

Die Prozessüberwachung umfasst die kontinuierliche Beobachtung und Sammlung von Daten über die Leistung eines Prozesses, ohne diesen direkt zu beeinflussen, während die Prozesssteuerung Prozessparameter aktiv maßgebende Parameter beeinflusst, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Die Datenerfassung durch Überwachung ist ein wesentlicher erster Schritt, um die Feinheiten eines Prozesses zu verstehen und die notwendigen Erkenntnisse für fundierte Anpassungen zu gewinnen. Zunächst können diese Anpassungen manuell vorgenommen werden, um die Leistung zu optimieren. Auf einer anspruchsvolleren Ebene ermöglicht die Automatisierung eine automatische Prozesssteuerung ohne menschliches Eingreifen, wodurch die Effizienz und Konsistenz verbessert wird.

Darüber hinaus können einige Phänomene innerhalb eines Prozesses sofort verstanden und angegangen werden, da sie in direktem Zusammenhang stehen, wie z. B. die Beziehung zwischen Mörtelkonsistenz und der zugegebenen Wassermenge im Durchlaufmischer. Diese direkten Zusammenhänge ermöglichen eine schnelle Interpretation und unkomplizierte Anpassungen. Umgekehrt hängen andere Phänomene von mehreren miteinander verbundenen Parametern ab und erfordern ein tiefgreifendes Verständnis, um effektiv angepasst zu werden zu können. Die Analyse dieser komplexen Wechselwirkungen erfordert oft eine fortgeschrittene Datenanalyse und

Modellierung, um zugrunde liegende Muster aufzudecken und eine präzisere und fundiertere Prozesssteuerung zu ermöglichen.

## Implementation des Monitoringkonzepts

Am Lehrstuhl für Massivbau wurde ein umfassendes System zum Überwachen und Steuern des 3D – Drucks konzeptioniert und realisiert. Das System nutzt InfluxDB als leistungsstarke Zeitreihendatenbank, um große Mengen zeitgestempelter Daten effizient zu speichern und zu verwalten. InfluxDB kann Daten über verschiedene Protokolle aufnehmen und bietet eine Vielzahl von Client-Bibliotheken, wodurch es flexibel und einfach in verschiedene Systeme integriert werden kann. Zur Visualisierung verwenden wir Grafana, das interaktive und anpassbare Dashboards bereitstellt, mit denen wir Echtzeit-Metriken und historische Trends effektiv analysieren können. Über eine speicherprogrammierbare Steuerung, die auf die Daten zugreifen kann, können am Prozess beteiligte Maschinen angesteuert werden.

Das System versieht jeden Druckprozess mit einer einzigartigen Kennziffer, einem Zeitstempel und Ort, sowie beteiligten Personen, Maschinen und Materialien. Ferner nimmt das System alle relevanten Wettermetriken auf, darunter z.B. Außentemperatur, Bewölkungsgrad, relative Luftfeuchte, Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel), Sonneneinstrahlung und Sonnenstand, den UV – Index und Zeitpunkte des Sonnenauf- sowie untergangs. Für die Anwendung in der Fabrik sind diese Metriken nur von untergeordneter Bedeutung, meist nur zur Referenz, aber für „on-site“ Druckvorhaben sind diese relevant.

Der Durchlaufmischer wird hinsichtlich dem „AN/AUS“ Status überwacht, seiner Drehzahl, seinem Energiekonsum, dem Wasserfluss und der Wassertemperatur überwacht. Hieraus lassen sich durch Integration und Ableitung nach der Zeit weitere Metriken ableiten.

Der Produktionsraum wird mittels mehrerer über den Raum gleichmäßig verteilten Sensoren hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchte überwacht. Das Druckbett, auf dem der Roboter das Material austrägt, wird mittels vier Lastzellen hinsichtlich des aktuellen Gewichts überwacht.

Die Pumpe wird hinsichtlich der Umdrehungszahl, dem Energieverbrauch und dem Füllstandlevel beobachtet. Der am Materialbehälter der Pumpe

angebrachte Außenrüttler wird hinsichtlich seines „AN/AUS“ Zustands überwacht.

Der Industrieroboter liefert Daten hinsichtlich seiner Achswinkel, Achsgeschwindigkeiten, Achsbeschleunigungen sowie kartesischen Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Ferner werden roboterspezifische Daten geloggt. Am Mörtelschlauch werden am Anfang und Ende des Schlauchs Mörteldruck und Materialtemperatur gemessen. Die speicherprogrammierbare Steuerung speichert alle analogen Signale, die von Sensoren erzeugt werden oder an Aktoren gesendet werden. Sensoren sind z.B. Abstandssensoren vom Düsenkopf zur obersten Lage des Extrusionsprozesses, Aktoren sind Bauteile, die den Prozess beeinflussen, also z.B. Wasserteile.

## Zusammenfassung

Die Einführung eines umfassenden Überwachungssystems, das rund 70 zentrale Messgrößen erfasst, hat gezeigt, dass es ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Robustheit und Produkt Durch die Bereitstellung von Echtzeit-Einblicken in verschiedene Betriebsparameter ermöglicht dieses System die frühzeitige Erkennung von Anomalien und erleichtert die schnelle Einleitung von Korrekturmaßnahmen. Dieser proaktive Ansatz minimiert nicht nur Ausfallzeiten, sondern optimiert auch die Ressourcennutzung, was zu einer verbesserten Effizienz und Konsistenz im Druckprozess führt. Die Fülle der gesammelten Daten bietet wertvolle Möglichkeiten für kontinuierliche Verbesserungen und Innovationen und festigt die Rolle des Überwachungssystems als entscheidende Komponente bei der Weiterentwicklung der 3D-Betondrucktechnologie.



## Literatur

- [1] D. Auer, F. P. Bos, and O. Fischer, "3DCP.fyi: A Comprehensive Citation Network Graph on the State of the Art in 3D Concrete Printing," in *Proceedings of the Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, 2024, pp. 533–538.
- [2] F. P. Bos, C. Menna, M. Pradena, E. L. Kreiger, and W. R. L. da Silva *et al.*, "The Realities of Additively Manufactured Concrete Structures in Practice," *Cement and Concrete Research*, vol. 156, 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106746.
- [3] S. Li, T. Lan, H.-X. Nguyen, and J. P. Tran, "Frontiers in Construction 3D Printing: Self-Monitoring, Multi-Robot, Drone-Assisted Processes," *Progress in Additive Manufacturing*, 2024, doi: 10.1007/s40964-024-00794-8.