


Von Materialtests zum automatisierten Monitoring von 3D-gedruckten Lehmbauwerken

Jasper Vollmert , P. Peralta and A. Alatassi

Institut für Digitales und Autonomes Bauen, Technische Universität Hamburg, Blohmstraße 15, 21079 Hamburg

E-mail(s): jasper.vollmert@tuhh.de, patricia.peralta.abadia@tuhh.de, adel.alatassi@tuhh.de

Abstract: Das Bauwerksmonitoring (engl. „Structural Health Monitoring“, SHM) ist eine bewährte Praxis zur Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bauwerken. Mit der steigenden Nachfrage nach umweltverträglichen Bauverfahren und der Notwendigkeit, den CO₂-Fußabdruck von Bauprojekten zu reduzieren, gewinnen nachhaltige Materialien wie Lehm an Bedeutung. Lehmgedruckte Strukturen führen zu einem neuen Bereich des Bauwerksmonitorings, der Anpassungen etablierter SHM-Strategien erfordert. Die Forschung zu SHM-Strategien für lehmgedruckte Strukturen ist spärlich, was eine Lücke im Verständnis der langfristigen Leistungsfähigkeit lehmgedruckter Strukturen hinterlässt. Diese Arbeit entwickelt eine Methodik zur experimentellen Untersuchung des strukturellen Verhaltens lehmgedruckter Bauteile – einschließlich Beulverhalten, Schrumpfung und Tragfähigkeit – und leitet daraus zentrale Faktoren für SHM ab. Die Methodik umfasst Zustandsbewertung, Randbedingungen, Designoptimierung, Prototyping und SHM-Strategiedefinition. Anhand eines Wandbauteils wird die Schrumpfung untersucht und eine SHM-Strategie definiert, bestehend aus Sensorwahl, Sensorplatzierung und Festlegung von Entscheidungskriterien. Die Ergebnisse zeigen die Produzierbarkeit stabiler Lehmstrukturen und liefern wertvolle Impulse für nachhaltiges Bauen.

Keywords: Additive Fertigung, Lehmdruck, Bauwerksmonitoring, nachhaltiges Bauen



DOI: 10.18154/RWTH-CONV-254869. Published in the conference proceedings of the 36. Forum Bauinformatik 2025, Aachen, Germany.
© 2025 The copyright for this article lies with the authors. This publication, except for quotations and otherwise indicated parts, is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

1 Einleitung

Digitale Fertigungstechniken, insbesondere der 3D-Druck (engl. „3D Printing“, 3DP), haben in den letzten Jahren in verschiedenen Branchen zunehmend Verbreitung gefunden [1]. Der Trend zur Nutzung von 3DP im Bauwesen hat die Forschung zur Automatisierung von Bauprozessen gefördert, aufgrund gut entwickelter digitaler Baumethoden sowie der Forschung zu 3DP-Materialien wie Beton und Lehm [2]. Daten zur langfristigen Leistungsfähigkeit von 3DP-Strukturen und zum inneren Zustand von 3DP-Materialien sind wesentlich für das Verständnis der Beziehungen zwischen 3DP-Prozessen, Materialien und Geometrien [3]. Durch das Bauwerksmonitoring (engl. „Structural Health Monitoring“, SHM), also der Erfassung und Bewertung struktureller Merkmale, wie Bucklungsverhalten, Schrumpfung und Tragfähigkeit, lässt sich die langfristige Leistungsfähigkeit von 3D-gedruckten Strukturen beurteilen. Allerdings fehlen bislang SHM-Methoden, die speziell auf die Besonderheiten von 3D-gedruckten

Lehmbauten zugeschnitten sind [4].

Im Allgemeinen können eingebettete Sensoren das Monitoring des strukturellen und materiellen Verhaltens von lehmgedruckten Strukturen verbessern [5]. In 3DP-Anwendungen wurden eingebettete Sensoren hauptsächlich für den Betondruck und in geringerem Maße für den Lehmdruck eingesetzt [6]. Da die Sensorik im Betondruck im Vergleich zur Sensorik im Lehmdruck ausgereifter ist [7], können Synergien zwischen Methodiken im Beton- und Lehmdruck genutzt werden, um strukturelle Parameter, wie Dehnung und Verformung, sowie Materialparameter, wie Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt, von lehmgedruckten Strukturen zu überwachen [8].

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur Definition einer SHM-Strategie für lehmgedruckte Strukturen vorgeschlagen. Die Methodik berücksichtigt strukturelles und materielles Verhalten und umfasst Zustandsbewertung, Randbedingungsdefinition, Designoptimierung, Prototyping und schließlich SHM-Strategiedefinition. Der Rest dieser Arbeit ist wie folgt strukturiert: Zunächst wird ein Überblick über die vorgeschlagene Methodik gegeben, diese experimentell getestet, um eine SHM-Strategie abzuleiten, anschließend die Wirksamkeit der SHM-Strategie durch Einbettung von Sensoren zum Monitoring des Feuchtigkeitsgehalts validiert. Abschließend wird mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse geschlossen.

2 Methodik und experimentelle Tests

Die Methodik besteht aus fünf Phasen: Zustandsbewertung, Randbedingungsdefinition, Designoptimierung, Prototyping und SHM-Strategiedefinition (Abbildung 1). In der ersten Phase werden die Ausgangsbedingungen festgelegt, um Klimabedingungen, Materialeigenschaften, verfügbare Geräte und Softwareanwendungen zu identifizieren. Lehmmischungen werden durch Materialtests auf Extrudierbarkeit, Baubarkeit, kleinskalige Schrumpfung und Rissbildungsverhalten bewertet. In der zweiten Phase werden Randbedingungen durch strukturelle, fertigungstechnische und sensorische Einschränkungen definiert, wobei fertigungstechnische Randbedingungen durch Prozessparameter-tests bestimmt werden [9]. Die dritte Phase umfasst die Designoptimierung, bei der Designvariablen identifiziert und auf Grundlage der definierten Randbedingungen optimiert werden, wobei parametrisches Design für Füllmuster und Verbindungen genutzt wird und Softwareanwendungen wie Rhino 8 [10] mit Grasshopper 3D verwendet werden. In der vierten Phase werden physische Prototypen entwickelt und evaluiert, um das Design zu verfeinern und strukturelle Integrität sowie Herstellbarkeit zu gewährleisten, wobei ein Prototyp pro Lehmmischung produziert wird. Die fünfte Phase definiert die SHM-Strategie basierend auf dem experimentell bewerteten Strukturverhalten, berücksichtigt Wechselwirkungen zwischen Strukturverhalten und parametrischem Design bei der Definition von Sensortyp und -Positionen und bestimmt Sensorpositionen anhand potenzieller Ausfallszenarien. Eine Rückkopplungsschleife erleichtert die Anpassung des parametrischen Designs an die definierte SHM-Strategie, wobei Sensoren in lehmgedruckte Prototypen eingebettet werden, um die SHM-Strategie zu validieren. Die Methodik wird durch experimentelle Tests implementiert, um die SHM-Strategie abzuleiten. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den experimentellen Phasen des Prototyping und der SHM-Strategiedefinition (Phasen 4-5), während die Phasen 1-3 im Folgenden nicht weiter vertieft werden.

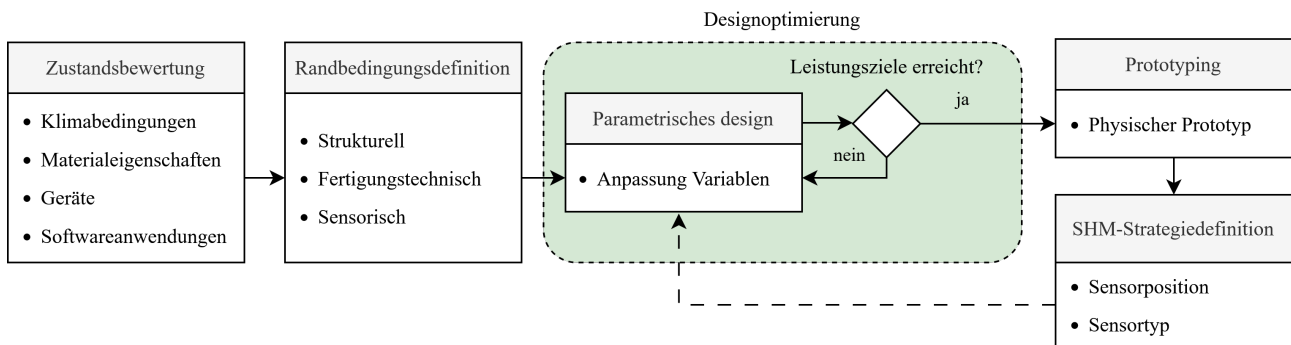


Abbildung 1: Allgemeiner Arbeitsablauf zur Festlegung von SHM-Strategien.

2.1 Prototyping

Zwei Prototypenexemplare einer Wandkomponente, Prototyp A (bestehend aus Lehm A) und Prototyp B (bestehend aus Lehm B), werden gedruckt und auf Beulverhalten, Überhangwinkel und Oberflächenqualität unmittelbar nach der Herstellung sowie auf Schrumpfung und Rissbildung während und nach dem Trocknungsprozess bewertet. Die Prototypen werden als druckbar angesehen, ohne Ausfälle oder signifikantes Beulen, zeigen jedoch nicht einheitliche Trocknungsmuster mit einem gerichteten Gradienten von oben nach unten und von äußeren Oberflächen zur inneren Füllung. Die Feuchtigkeitsgehaltsbewertung nach sechstägiger Trocknungsperiode zeigt Unterschiede zwischen den Prototypen: Prototyp A demonstriert eine schnellere Trocknungsrate mit schnellerer Feuchtigkeitsabgabe, während Prototyp B eine langsamere Trocknungsrate aufweist, erkennbar durch dunklere Verfärbung der Füllung und Konturen, was auf zurückgehaltene Feuchtigkeit hinweist.

Trocknungsrisse werden während des Trocknungsprozesses dokumentiert. Prototyp A entwickelt mehrere Trocknungsrisse (Abbildung 2), wobei die ersten Risse nach Tag vier in der Mittellinie-Region erscheinen und von unten nach oben fortschreiten. Weitere Risse entstehen an den Tagen sechs und acht in der Mittellinie und vorderen Region. Der Hauptriss in der Mittellinie-Region stellt aufgrund seiner Lage und Größe einen potenziellen Schwachpunkt dar. Prototyp B zeigt deutlich reduzierte Trocknungsrisse mit nur einem einzigen Riss nach acht Tagen in der Mittellinie-Region, der ähnlich von unten nach oben fortschreitet, jedoch mit geringerer Schwere.

Nach dem Trocknen zeigen die Prototypen ungleichmäßige Schrumpfung: Prototyp A weist eine geringere horizontale Schrumpfung als Prototyp B. Das unterschiedliche Schrumpfungsverhalten resultiert aus der Trocknungsrate und Druckfehlern, wobei erhöhter Wassergehalt zu verstärkter Schrumpfung führt und Druckfehler zusätzliche Rissbildung durch innere Spannungen verursachen können. Für die SHM-Strategie wird eine zweite Prototypiteration mit eingebetteten Feuchtigkeitssensoren durchgeführt, wobei die Mischung von Lehm B für Prototyp B2 gewählt wird, um die Genauigkeit des SHM-Systems zu bewerten und die Sensorpositionierung zu optimieren.

2.2 Sensorintegration zur SHM-Strategiedefinition

Als Grundlage für die Definition der SHM-Strategie wird die Integration verschiedener Sensortypen und -positionen untersucht. Ein Validierungstest wird durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit von resistiven und kapazitiven Feuchtigkeitssensoren sowie die Auswirkungen der Sensorpositionen

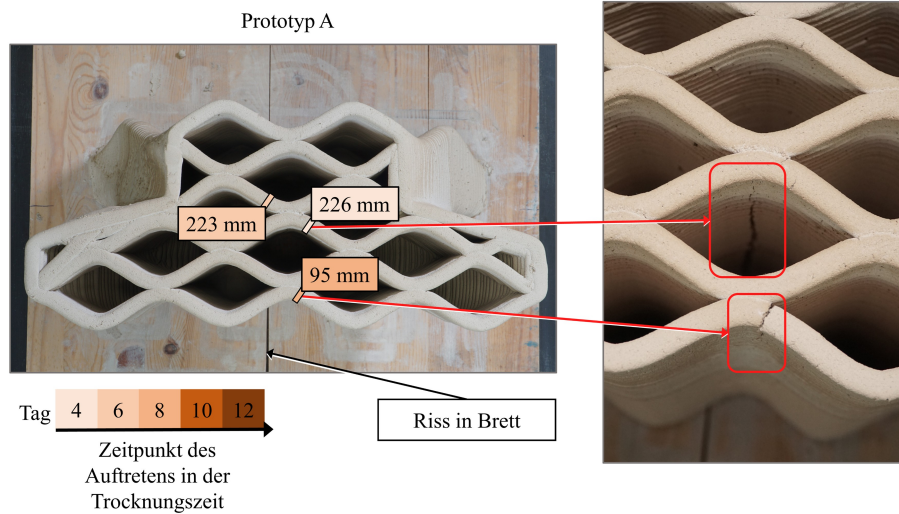


Abbildung 2: Austrocknungsrisse in Prototyp A.

zu bewerten. Resistive und kapazitive Feuchtigkeitssensoren werden typischerweise zur Messung des Bodenfeuchtigkeitsgehalts mittels verschiedener Messprinzipien verwendet, wobei der Einsatz beider Sensortypen zum Monitoring von Trocknungsprozessen im Lehmdruck einen Vergleich der Empfindlichkeit für die Erkennung von Feuchtigkeitsänderungen ermöglicht. Wie in Abbildung 3 dargestellt, werden zwei Sensorsysteme zum Monitoring des Prototyps B2 verwendet: Sensorsystem I, ein kommerzielles System mit einem resistiven Feuchtigkeitssensor zum Bodenmonitoring, und Sensorsystem II, ein maßgeschneidertes SHM-System mit einem Feuchtigkeitssensorknoten (drei kapazitive Feuchtigkeitssensoren) und einem Umgebungssensorknoten zum kontinuierlichen Monitoring des Lehmfeuchtigkeitsgehalts und der Umgebungsbedingungen.

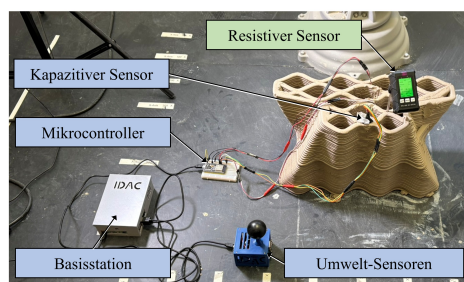


Abbildung 3: Komponenten des Sensorsystems I (blau) und des Sensorsystems II (grün)

Die resistiven und kapazitiven Feuchtigkeitssensoren werden in verschiedenen Einbettungstiefen positioniert und in äußeren und inneren Lagen des Prototyps B2 verteilt, um den Trocknungsprozess gemäß dem beobachteten Trocknungsgradienten zu überwachen. Sensorsystem I ist für Bodenfeuchtigkeit durch Widerstandswerte zwischen zwei Sonden ausgelegt, während Sensorsystem II gleichzeitig für Echtzeitdatenaufzeichnung des kapazitiven Feuchtigkeitsgehalts und der Umgebungsbedingungen

konzipiert ist. Der Feuchtigkeitssensorknoten umfasst drei eingebettete kapazitive Sensoren. Die Positionierung wird durch geometrische Einschränkungen bestimmt: der resistive Sensor besteht aus zwei 180 mm langen Sonden im Abstand von 30 mm, während die kapazitiven Sensoren 98×23×4 mm messen. Bei 11 mm Schichtbreite werden die Sensoren vertikal an überlappenden Punkten eingebettet, um strukturelle Stabilität zu gewährleisten. Die kapazitiven Sensoren werden gemäß Druckprozess positioniert: Sensor 1 und Sensor 2 vollständig eingebettet, Sensor 3 und der resistive Sensor 4 teilweise eingebettet. Prototyp B2 wird über 10 Tage beobachtet ohne strukturelle Instabilitäten oder sensorinduzierte Risse. Die Umgebungsdaten zeigen Feuchtigkeit zwischen 15-40% und Temperaturen zwischen 18,1-23,8°C, wobei der abnehmende Feuchtigkeitsgehalt in der Struktur diesen Umgebungsänderungen entspricht (Abbildung 4). Kapazitive Sensoren zeigen eine 25-stündige Stabilisierungsphase, während vollständig eingebettete Sensoren nahezu identische Trends aufweisen und der teilweise eingebettete Sensor 3 in den ersten 160 Stunden höhere anfängliche Feuchtigkeitswerte zeigt.

Darüber hinaus zeigt, wie aus Abbildung 4 ersichtlich, der resistive Sensor (Sensor 4) im Vergleich zu den kapazitiven Sensoren in den ersten 195 Stunden der Messung höhere Feuchtigkeitswerte, gefolgt von einem starken Abfall des Feuchtigkeitsgehalts. Obwohl ein ähnlicher Feuchtigkeitsgehaltstrend zwischen Sensor 2 und Sensor 4 erwartet wurde, deuten die für Sensor 4 beobachteten Werte darauf hin, dass das widerstandsbasierte Messprinzip im Vergleich zum kapazitiven Messprinzip nicht so empfindlich gegenüber der Änderung des Feuchtigkeitsgehalts ist. Durch Beobachtung des kumulativen Bodenfeuchtigkeitsverlustes im Zeitverlauf (Abbildung 5) wird ein Gesamtfeuchtigkeitsverlust von 43% bis 48% beobachtet. Die gemessenen kumulativen Feuchtigkeitsverluste von Sensor 1 und Sensor 3 sind vergleichbar, während Sensor 2 leicht in einem akzeptablen Bereich abweicht. Im Gegensatz dazu weicht Sensor 4 erheblich ab, was auf eine begrenzte Genauigkeit und Ansprechbarkeit hinweist.

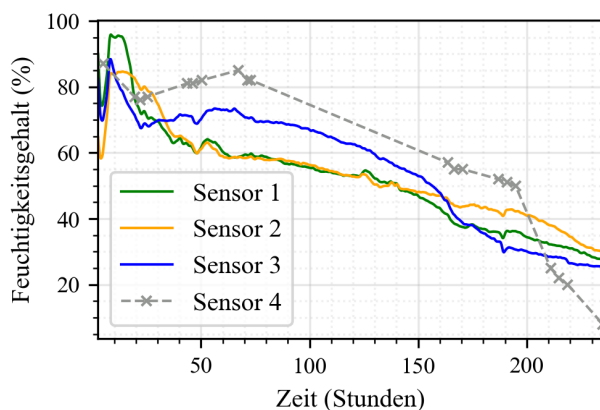


Abbildung 4: Messwerte der Feuchtesensoren.

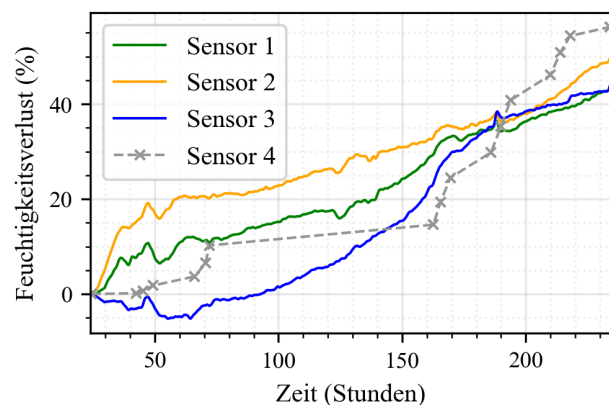


Abbildung 5: Kumulativer Feuchtigkeitsverlust über die Zeit (beginnend mit t = 25 h).

3 Diskussion und Definition der SHM-Strategie

3.1 Allgemeine Diskussion der Ergebnisse

Die Feuchtigkeitssensoren haben unterschiedliche Genauigkeiten gezeigt. Vollständig eingebettete Sensoren haben nahezu identische Werte gezeigt, während die teilweise eingebetteten Sensoren

tendenziell höhere Feuchtigkeitswerte aufgezeichnet haben. Nach anfänglichem Oberflächenwasserverlust haben sich die Sensorwerte mit den visuellen Beobachtungen in Einklang gebracht und reflektieren die Trocknungsbedingungen des Prototyps B2. Während die absoluten Feuchtigkeitsmessungen zwischen den Sensortypen inkonsistent waren, haben die aufgezeichneten Trends der kapazitiven Bodenfeuchtigkeitssensoren mit den visuellen Bewertungen korreliert, was die Eignung kapazitiver Messungen für das Monitoring nahelegt. Die durchlässigen Membranen haben die Feuchtigkeitspenetration verzögert und zusätzliche Zeit für die Sensorstabilisierung verursacht. Kapazitive Änderungen wurden von den eingebetteten Sensoren mit unterschiedlicher Genauigkeit erfasst, abhängig von Sensortyp und Position; die Messungen der kapazitiven Feuchtigkeitsensoren haben jedoch erfolgreich den Trocknungsgradienten innerhalb des Prototyps B2 erfasst. Die Umgebungsbedingungen haben den Trocknungsprozess erheblich beeinflusst, wobei ein beschleunigter Feuchtigkeitsverlust bei niedrigerer Luftfeuchtigkeit und erhöhter Temperatur beobachtet wurde. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse die Anwendbarkeit von Feuchtigkeitsensoren zum Monitoring des Feuchtigkeitsverlusts in additiv gefertigten Lehmstrukturen und bilden die Grundlage für die Entwicklung einer maßgeschneiderten SHM-Strategie.

3.2 SHM-Strategie

Die Definition einer SHM-Strategie für lehmgedruckte Strukturen erfordert eine gezielte Sensorauswahl zum Monitoring von Lehmfeuchtigkeit und struktureller Integrität. Kapazitive Feuchtigkeitsensoren erwiesen sich als zuverlässiger und empfindlicher als resistive Sensoren, die anfälliger für Korrosion sind. Die Sensorplatzierung sollte den Trocknungsgradienten folgen, um Feuchtigkeitsmigration zu verfolgen und rissanfällige Zonen zu identifizieren.

Ein zentrales Problem stellt der Einbettungszeitpunkt dar. Kabelgebundene Sensoren bergen Rissbildungsrisiken an Übergangspunkten durch Lehmschrumpfung und sind aufgrund der geometrischen Komplexität 3D-gedruckter Komponenten schwer skalierbar. Drahtlose Lösungen sind daher unerlässlich, jedoch stellen die hohe Dielektrizitätskonstante und Feuchtigkeitsretention von Lehm erhebliche Herausforderungen für die Signalübertragung dar. Erhöhte Feuchtigkeit verstärkt die Signaldämpfung durch gesteigerte Materialkonduktivität, während Mehrwegeinterferenz zu Signalverzerrung führen kann.

Für zuverlässige drahtlose Sensorik sind adaptive Kommunikationsprotokolle und sorgfältige Frequenzwahl erforderlich, die den variablen elektromagnetischen Eigenschaften während des Trocknungsprozesses Rechnung tragen. Aktuelle technologische Limitationen umfassen unzureichende Genauigkeit kostengünstiger kapazitiver Sensoren, Korrosionsanfälligkeit von Widerstandssensoren und begrenzte Empfindlichkeit gegenüber graduellen Feuchtigkeitsänderungen. Die Implementierung erfolgreicher SHM-Strategien erfordert daher die Entwicklung robuster, miniaturisierter drahtloser Sensoren mit verbesserter Messgenauigkeit für langfristige Echtzeitdatenerfassung in der anspruchsvollen Umgebung lehmgedruckter Strukturen.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit der zunehmenden Aufmerksamkeit für Lehmdruck in Forschung und Praxis müssen SHM-Strategien an Lehmdrucktechnologien angepasst werden. In dieser Studie wurde eine SHM-Strategie vorgeschlagen, und die strukturellen Eigenschaften von lehmgedruckten Strukturen, einschließlich Beulen, Schrumpfung und Tragfähigkeit, wurden experimentell bestimmt. Prototyping und Validierung der Sensorplatzierung haben die Machbarkeit der Konstruktion strukturell stabiler lehmgedruckter Strukturen demonstriert und wichtige Einblicke in das Materialverhalten (d.h. Schrumpfung) für die Ableitung von Strategien zur Sensorpositionierung geliefert.

Die in dieser Studie vorgeschlagene Methodik hat einen strukturierten Ansatz zum Verständnis von Lehm als 3DP-Material geboten, der sowohl die Materialcharakterisierung als auch eine SHM-Strategie umfasst. Die experimentellen Ergebnisse haben gezeigt, dass eine effektive Sensorplatzierung durch systematische Analyse des Materialverhaltens erreicht werden kann, wobei der Fokus insbesondere auf Trocknungsmustern und potenziellen Fehlerstellen liegt. Darüber hinaus hat die Studie die Beziehungen zwischen kleinmaßstäblichen Labortests und größeren Prototypen behandelt und wesentliche Skalierbarkeitsüberlegungen für SHM-Sensornetzwerke großer Strukturen aufgestellt. Zusammenfassend tragen die Ergebnisse zur Weiterentwicklung des Bereichs nachhaltigen Bauens bei, indem sie die Lebensfähigkeit des Lehmdrucks auf der Grundlage einer fundierten SHM-Strategie demonstrieren. Zukünftige Forschungen könnten die Erweiterung der SHM-Strategie von kabelbasierten zu drahtlosen Systemen umfassen.

Acknowledgements

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Projekte SM 281/22-1 und SM 281/31-1 sowie durch die Technische Universität Hamburg über das I³-Programm im Rahmen des Nachwuchsprojekts „Digitalization of Earth Printing to Advance Climate-Informed Engineering“. Die Autoren danken außerdem der Goerg & Schneider GmbH & Co. KG für die Bereitstellung des Tonmaterials. Die in diesem Beitrag dargestellten Meinungen, Erkenntnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen stammen ausschließlich von den Autoren und spiegeln nicht zwangsläufig die Ansichten der fördernden Organisationen wider.

Literatur

- [1] A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran und B. Khoshnevis, »Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture«, *Construction and Building Materials*, Jg. 145, S. 639–647, 2017.
- [2] P. Peralta und K. Smarsly, »Requirements analysis of additive manufacturing for concrete printing - A systematic review«, in *Proceedings of the 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Bogota, Colombia, Juli 2022.
- [3] K. Smarsly, P. Peralta, D. Luckey, S. Heine und H.-M. Ludwig, »BIM-based concrete printing«, in *Proceedings of the International ICCCBE and CIB W78 Joint Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2020*, Sao Paolo, Brazil, Aug. 2020.

- [4] P. Peralta, M. E. Ahmad und K. Smarsly, »Printing Information Modeling (PIM) for Additive Manufacturing of Concrete Structures«, *Applied Sciences*, Jg. 13, Nr. 23, 2023.
- [5] G. Ma, Y. Li, L. Wang, J. Zhang und L. Li, »Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers«, *Construction and Building Materials*, Jg. 241, 2020.
- [6] C. Hong, Y. Zhang und L. Borana, »Performance investigation of 3D printed clay soil using fiber Bragg grating technology«, *Acta Geotechnica*, Jg. 17, Nr. 2, S. 453–462, 2022.
- [7] P. Peralta, S. Heine, H.-M. Ludwig und K. Smarsly, »A BIM-based approach towards additive manufacturing of concrete structures«, in *Proceedings of the 27th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering*, Berlin, Germany, Juli 2020.
- [8] A. Perrot, D. Rangeard und T. Lecompte, »Field-oriented tests to evaluate the workability of cob and adobe«, *Materials and Structures*, Jg. 51, 2018.
- [9] A. Curth, N. Pearl, A. Castro-Salazar, C. Mueller und L. Sass, »3D printing earth: Local, circular material processing, fabrication methods, and life cycle assessment«, *Construction and Building Materials*, Jg. 421, 2024.
- [10] Robert McNeel & Associates, *Rhinoceros 3D*, <https://www.rhino3d.com>.