

Monitoring und Simulation von Roboterkinematik basierend auf digitalen Zwillingen für den Lehmdruck

Jasper Vollmert[✉], Patricia Peralta[✉], Aditya Tandon[✉]

Institut für Digitales und Autonomes Bauen, Technische Universität Hamburg,

Blohmstraße 15, 21079 Hamburg, Germany

E-Mail: jasper.vollmert@tuhh.de

Abstract: Die additive Fertigung auf Lehmbasis, auch bekannt als Lehmdruck, hat das Potenzial, den Lehmbau effizienter zu gestalten, als es mit bisherigen Verfahren möglich ist. Allerdings sind die Probleme, die sich aus nicht berücksichtigten kinematischen Effekten (z. B. Ruckbewegungen) von Lehmdruckrobotern, auch bekannt als Lehmdrucker, ergeben, nach wie vor ungelöst und beeinträchtigen die Qualität der gedruckten Bauteile. Um den Lehmdruck zu verbessern, muss die Roboterkinematik im Druckprozess untersucht werden. In diesem Beitrag wird ein auf digitalen Zwillingen basierendes Framework zum Monitoring und zur Simulation von Druckprozessen vorgestellt, um den Einfluss der Roboterkinematik auf Druckprozesse zu untersuchen. Das Framework basiert auf einer substanzwissenschaftlich abgesicherten Referenzarchitektur für digitale Zwillinge und wird prototypisch für einen Lehmdrucker implementiert, der aus einem horizontalen Gelenkarmroboter und einem linearen Ram-Extruder besteht. Das Framework wird über das Monitoring und die Simulation von Druckprozessen einer mit Lehm gedruckten Wand validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die ungewollten kinematischen Effekte, die während des Druckprozesses auftreten, durch das Framework abgeschwächt werden können und das Framework als Grundlage für das autonome Drucken von Lehm dienen kann.

Keywords: Additive Fertigung (AM), digitale Zwillinge (DT), Lehmdruck, Roboterkinematik



Erschienen in Tagungsband 35. Forum Bauinformatik 2024, Hamburg, Deutschland, DOI: 10.15480/882.13540

© 2024 Das Copyright für diesen Beitrag liegt bei den Autoren. Verwendung erlaubt unter Creative Commons Lizenz Namensnennung 4.0 International.

1 Einführung

Lehm als Baumaterial ermöglicht kostengünstiges und nachhaltiges Bauen. Technische Schwierigkeiten im Lehmbau begrenzen jedoch den Übergang vom traditionellen Lehmbau zum digitalen Bauen [1]. Um die Digitalisierung des Lehmbaus voranzutreiben, kann der Lehmbau mit additiver Fertigung („Additive Manufacturing“, AM) und intelligenten Sensortechnologien gekoppelt

und hierbei das in anderen Bereichen, wie dem Betondruck, gewonnene AM-Fachwissen genutzt werden [2].

Das Potenzial von lehm-basierendem AM in der Bauindustrie wurde durch Projekte und Prototypen aufgezeigt, wie in [3] beschrieben. Detailliertere Studien zur Bewertung von erdbasierendem AM wurden durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf Hardwarelösungen für Extruder [4], Materialentwicklung für optimiertes rheologisches Verhalten [1], strukturelle Leistung von Komponenten [5] und Prozessverbesserung durch parametrische Werkzeugwegplanung und Extrusionsregelung [6] lag. Darüber hinaus wird die Materialextrusion üblicherweise für die erdgebundene AM angepasst. Dabei werden AM-Systeme verwendet, die hauptsächlich auf Robotersystemen basieren, ähnlich wie die AM-Systeme, die für den Betondruck verwendet werden [7]. AM-Systeme, die gemeinhin als „Drucker“ bezeichnet werden, zielen auf einen präzisen Materialauftrag ab, wobei geringfügige Abweichungen in Position oder Ausrichtung zu Druckproblemen führen können [8].

Obwohl die additive Fertigung – und insbesondere der Lehm-Druck – ein Forschungsgebiet von zunehmender Relevanz ist, wurde dem Einfluss kinematischer Effekte auf die Genauigkeit von AM-Systemen im Lehm-Druck bisher nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Unberücksichtigte kinematische Effekte, wie ruckartige Bewegungen und Vibrationen, können zu Abweichungen in der Position und Ausrichtung der Extruder sowie in der Kontinuität des Materialauftrags führen und die Qualität der gedruckten Komponenten beeinträchtigen [9]. Deshalb sind weitere Anstrengungen erforderlich, um die Auswirkungen der Roboterkinematik im Druckprozess zu untersuchen. Von der Interaktion zwischen Prozess und Material bis hin zur Prozessregelung ist die Roboterkinematik der Schlüssel zur Definition des Roboterhaltens, der Randbedingungen, der Prozessparameter und der Regelungsstrategien. Bestehende Ansätze im Lehm-Druck erfordern aufwändige Trial-and-Error, um eine effiziente Prozesssteuerung zu gewährleisten, bevor qualitativ hochwertige gedruckte Komponenten erzielt werden können. Die Erstellung eines digitalen Zwillinges kann das Verständnis der Roboterkinematik verbessern und dazu beitragen, Probleme, die bei Druckprozessen auftreten können, zu mindern.

In diesem Beitrag wird ein auf digitalen Zwillingen basierendes Framework vorgestellt und implementiert, um den Einfluss der Roboterkinematik auf den Druckprozess für den Lehm-Druck zu untersuchen. Digitale Zwillinge sind virtuelle Gegenstücke physischer Einheiten, die „physischen Zwillinge“, die synchronisiert werden, um den Zustand der physischen Einheit zu reflektieren [10]. Hier werden digitale Zwillinge für das Monitoring und die Simulation des Lehm-Drucks eingesetzt, um Druckprobleme aufgrund von kinematischen Effekten zu identifizieren und zu mindern. Der auf digitalen Zwillingen basierende Ansatz wird für einen Lehm-Drucker implementiert und validiert, wobei ein digitaler Zwilling (DT) mit einem physikalisch orientierten Ansatz entwickelt wird, um Geometriemodelle, Mehrkörpermodelle und kinematische Modelle zu integrieren.

2 Ein auf digitalen Zwillingen basierendes Framework für den Lehmdruck

Das DT-basierte Framework ermöglicht das Monitoring und die Simulation von Druckprozessen, die digitale Darstellung von Bewegungen von Lehmdruckern und die Identifikation potenzieller Probleme in Druckprozessen, die durch kinematische Effekte verursacht werden können.

Das Monitoring und die Simulation von Roboterbewegungen hilft bei der Identifizierung von Abweichungen in der Position der Extruder von vordefinierten Trajektorien, die die Materialabscheidung behindern können. Durch die Bewertung der Abweichungen in der Extruderposition ist es möglich, Probleme aufgrund kinematischer Effekte in Druckprozessen während des Entwurfs und der Planung von Druckprojekten zu mindern. In diesem Beitrag geht es um die Identifizierung von Punkten mit erhöhter Vibration und ruckartigen Bewegungen in Druckprozessen, die Vorhersage damit verbundener Probleme und die Definition von Regelungsstrategien zur Minderung von Druckfehlern.

Digitale Zwillinge für Lehmdrucker werden auf der Grundlage einer von den Autoren zuvor entwickelten Referenzarchitektur für digitale Zwillinge konzipiert [11]. Der DT verwendet eine geschichtete, serviceorientierte Systemarchitektur, um die Funktionen und Verhaltensweisen von Lehmdruckern (d. h. physischen Einheiten) in einer digitalen Umgebung darzustellen (Abbildung 1).

2.1 Ein digitaler Zwilling für Lehmdrucker

Das DT-basierte Framework wurde für einen Lehmdrucker, einen SCARA-Roboter mit 3 Freiheitsgraden (DOF) implementiert. Der digitale Zwilling für den 3-DOF SCARA-Lehmdrucker, bestehend aus einem Scara Roboter mit Linearantrieb Extruder, wird mit MATLAB und Simulink [12] als Modellierungs- und Simulationswerkzeug implementiert. Ein geometrisches Modell des Lehmdruckers wird verwendet, um ein Mehrkörpermodell zu erstellen, das die Komponenten und die physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Robotersystems darstellt und zu einem Mehrkörpersystem mit starren Körpern führt, wie in Abbildung 2 dargestellt. Darüber hinaus wird ein kinematisches Modell, das die Roboterglieder und -gelenke auf der Grundlage der DH-Parameter des Roboters berücksichtigt [13]. Mit dem Kinematikmodell werden die Positionen der einzelnen Gelenke der Roboter durch eine numerische Lösung des Problems der inversen Kinematik geschätzt, wobei ein numerischer Löser auf der Grundlage des Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet wird. Durch die Integration und Replizierung des Robotermodells in das Modell der Simulationsumgebung werden Monitorings- und Simulationsdienste entwickelt. Die Dienste replizieren die Bewegung von Lehmdruckern für benutzerdefinierte Trajektorien und prozessbezogene Parameter (z. B. Druckgeschwindigkeit und Materialbeladung) unter Verwendung von PID-Reglern, um das Verhalten des Lehmdruckers basierend auf einer Rückkopplungsschleife für die Gelenkpositionen anzupassen. Im folgenden Unterabschnitt wird ein Überblick über den Simulationsdienst gegeben.

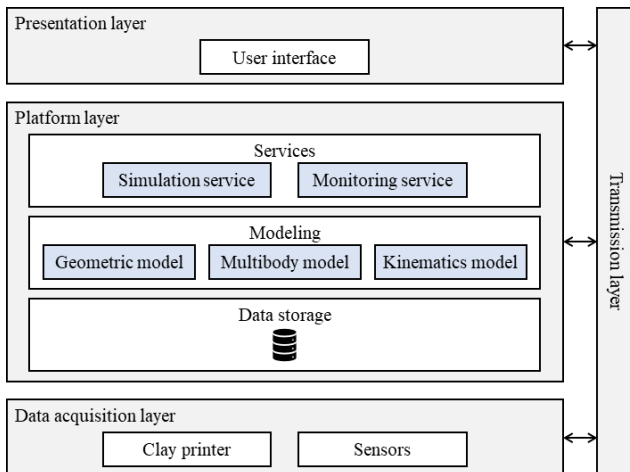


Abbildung 1. Systemarchitektur für den digitalen Zwilling für den Lehmdruck.

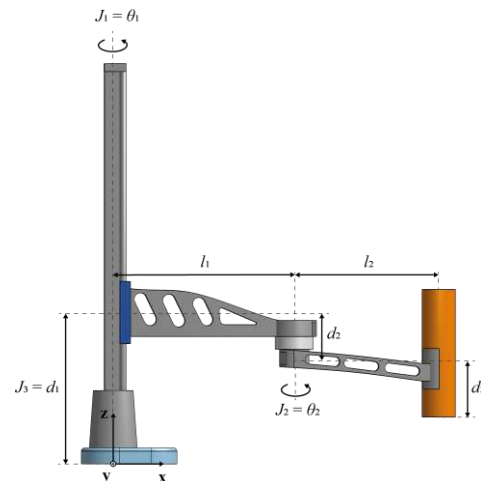


Abbildung 2. Mehrkörpermodell des SCARA-Lehmdruckers.

Der Simulationsdienst wird mit dem Simscape-Simulationswerkzeug in Simulink implementiert, wie in Abbildung 3 dargestellt. Um die Bewegung des Lehmdruckers zu simulieren, verwendet der Simulationsdienst Zieltrajektorien, Zielendzeiten und die Materialnutzlast als Eingaben. Die Zieltrajektorien sind definiert als ein Vektor von Zielpunkten $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i)$, die die Koordinaten des Extruders darstellen. Aus den Zieldruckgeschwindigkeiten werden jedem Zielpunkt diskretisierte Zeitschritte zugewiesen und ein trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil erzeugt. Der Block für inverse Kinematik löst die Zieltrajektorie numerisch in geschätzte Gelenkpositionen $(\theta_1, \theta_2, d_1)$ auf. Die geschätzten Gelenkpositionen werden den PID-Reglern zugeführt, die die Gelenkpositionen in prozessbezogene Parameter für Drehmoment und Kraft umwandeln. Die Drehmoment- und Kraftparameter werden zur Vorhersage des Verhaltens des Lehmdruckers verwendet, ausgedrückt als Ausgangstrajektorie, Ausgangsgeschwindigkeit, Ausgangsbeschleunigung und Ausgangsdrehmoment. Zur Verfeinerung der Simulation wird eine Rückkopplungsschleife eingesetzt, um die tatsächlichen Fügepositionen, die aus der Ausgangsbahn abgeleitet werden, an die PID-Regler zurückzugeben. Mithilfe des Monitoringdiensts werden Punkte erhöhter Vibrationen und Ruckbewegungen als Spitzen im Ausgangsdrehmoment bzw. in der Ausgangsgeschwindigkeit identifiziert. Im folgenden Abschnitt wird die Validierung des DT-basierten Frameworks vorgestellt.

2.2 Fallstudie

Die Fallstudie beschreibt den Druckprozess einer Teststruktur, die aus einem rechteckigen Wanelement mit einer gezackten Innenstruktur besteht. Der Druckprozess für jede Schicht ist in drei Schritte unterteilt, nämlich Umfangsstruktur, Füllstruktur und Schichtübergang. Zunächst wird die Umfangsstruktur der Wand gedruckt, indem Material entlang des Umrisses der Wand aufgetragen wird, wie in Abbildung 4 dargestellt. Zweitens wird die Füllstruktur der Wand gedruckt, die für Stabilität sorgt. Drittens fährt der Extruder in eine Ausgangsposition zurück, während er zur nächsten Schicht übergeht und den Extruder auf die nächste Schichthöhe bewegt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis das Wanelement fertig gedruckt ist.

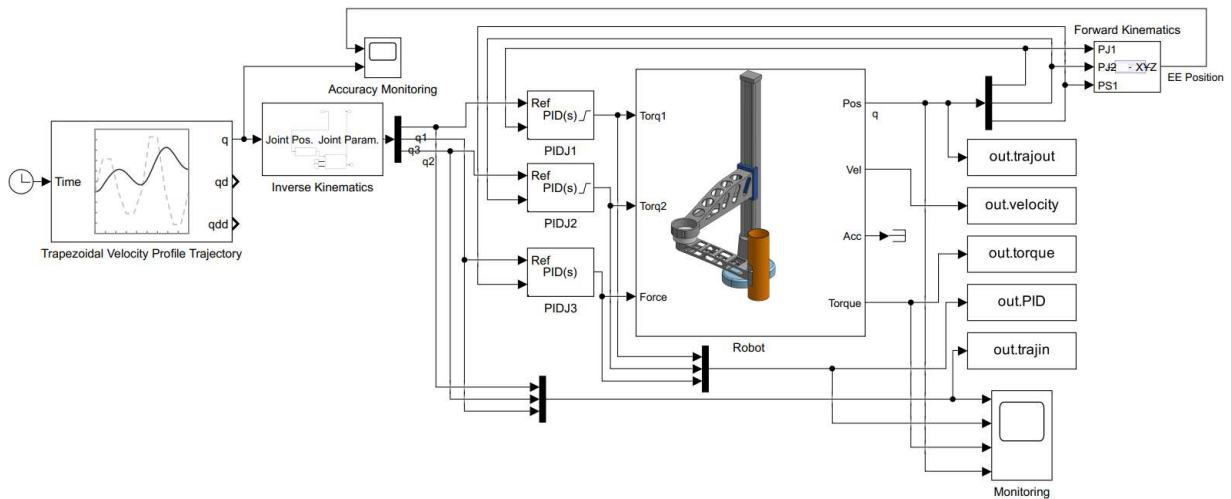


Abbildung 3. Simscape-Simulationsarchitektur.

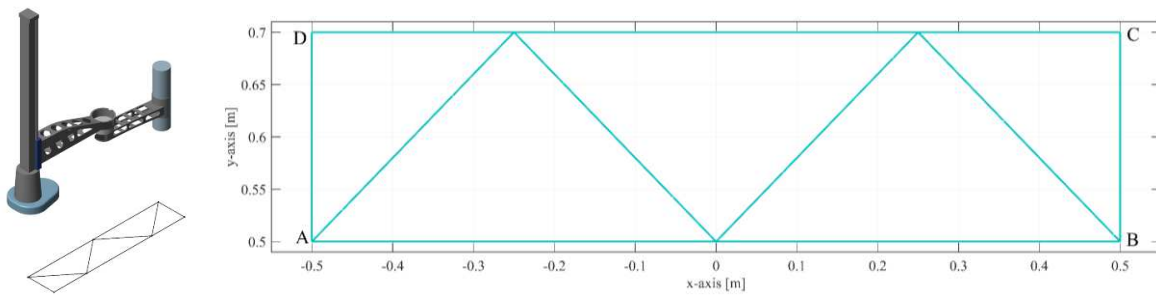


Abbildung 4. Teststruktur (Druckreihenfolge A, B, C, D, A, B)

2.3 Ergebnisse

Der Zieldruckpfad für das Wandelement wird als Zieltrajektorie für die Simulation mit einer Zieldruckgeschwindigkeit von 0,1 m/s definiert. Um mögliche Änderungen der Genauigkeit während des Druckprozesses zu untersuchen, wird die Materialbeladung des Extruders während des gesamten Simulationsprozesses variiert. Das Material wird Schicht für Schicht aufgetragen, so dass die Materialbeladung mit jeder weiteren Schicht konstant abnimmt. Aufgrund der geringen Druckgeschwindigkeit, bleibt die Materiallast über jede Schicht nahezu konstant. Die Beziehung zwischen prozessbezogenen Parametern, der Materialbeladung, und den kinematischen Effekten sind einige der wichtigsten Unsicherheitsfaktoren für den SCARA-Lehmdrucker. Um die Beziehungen zwischen den Parametern zu untersuchen, werden vier Druckszenarien mit unterschiedlichen Materialbeladungen eingeführt. Die Materialbeladung beginnt bei voller Extrusionskapazität und wird in jedem Szenario um ein Drittel der Kapazität verringert, bis der Extruder vollständig entleert ist. Die Gewichtsveränderung wird als Veränderung der Masse und Trägheit modelliert. Deshalb werden die vier Druckszenarien, die einer Materialauslastung von 100 %, 66 %, 33 % und 0 % entsprechen, in den nachfolgenden Simulationsergebnissen verglichen.

Der tatsächliche Druckpfad, d. h. die Ausgangstrajektorie, wird beobachtet und als Abweichungsdiagramm für jedes Gelenk dargestellt (Abbildung 5). Die Abweichung für jede Gelenkposition wird anschließend mit Simulationen mit unterschiedlichen Materialnutzlasten verglichen, die 100 %, 66 %, 33 % und 0 % der Materialnutzlast umfassen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell des Lehmdruckers den angestrebten Druckpfad mit nur geringen Abweichungen verfolgt. Es ist zu beobachten, dass anfängliche Abweichungen durch die Einschwingzeit der PID-Regler entstehen. Außerdem werden die Fehler an den Ecken der gedruckten Struktur mit der Verringerung der Materialbelastung vergleichsweise reduziert. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Ausgangsdrehmomente über die Simulationsexperimente hinweg abnehmen, insbesondere an ihren Spitzen (Abbildung 6), und die Ausgangsgeschwindigkeiten während der Simulationsexperimente gleich bleiben. Im Vergleich dazu nimmt die Kraft für das Gelenk J_1 aufgrund der abnehmenden Materialbelastung im Extruder ab, die Fehler über die gesamte Simulation sind jedoch vernachlässigbar.

Die Ergebnisse von Experimenten, die in der Simulationsumgebung durchgeführt wurden, zeigen, dass die geschätzten Gelenkpositionen für die Gelenke des Lehmdruckers die Zieltrajektorien mit minimaler Abweichung erfolgreich verfolgen. Die Simulationsumgebung zeichnet sich durch Echtzeitleistung und latenzfreie Schätzung der Gelenkpositionen aus und ist zudem robust gegenüber Robotersingularitäten. Die Ergebnisse validieren somit das implementierte Simulationssystem für weitere Experimente mit realen Daten, um Extrusionsratenfehler aus den Simulationsdaten zu bewerten und Regelungsstrategien zu definieren.

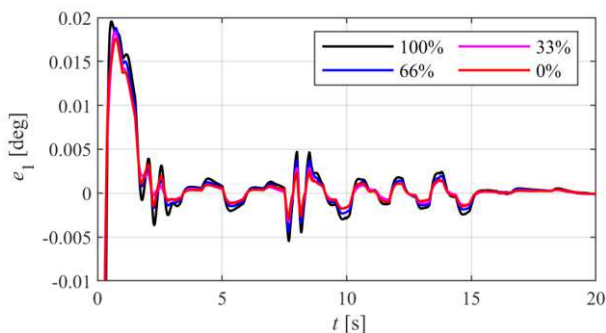


Abbildung 5. Feherverfolgung für die Position des Gelenks J_1 .

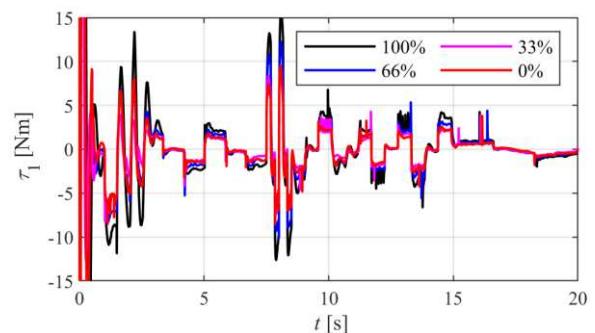


Abbildung 6. Drehmoment des Gelenks J_1 .

3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde der Einfluss der Roboterkinematik auf den Druckprozess mit Hilfe eines auf einem digitalen Zwilling basierenden Ansatzes untersucht. Ein digitaler Zwilling wurde entwickelt, um die Bewegung von Lehmdruckern nachzubilden und dadurch Druckprobleme zu identifizieren, die durch kinematische Effekte verursacht werden, und um die Druckwegplanung zu validieren. Zur Validierung wurde der Druckprozess an einem 3-DOF SCARA Lehmdrucker simuliert.

Zur Umsetzung des Konzept des digitalen Zwillings wurde eine etablierte Referenzarchitektur für digitale Zwillinge verwendet [14] und auf die Erkenntnisse im Bereich intelligenter Sensortechnologien zurückgegriffen [15], die mit dem Lehmdruck gekoppelt wurden. Der digitale Zwilling wurde konkret mit Hilfe von Modellierungs- und Berechnungswerkzeugen für die Modellierung der Geometrie, des Mehrkörpersystems und der Kinematik des SCARA-Lehmdruckers umgesetzt. Als Eingangsparameter verwendet der vom digitalen Zwilling bereitgestellte Simulationsdienst die inverse Kinematik, um die Bewegungen des Roboters anhand von Zieltrajektorien, Zieldruckgeschwindigkeiten und der Materialbelastung des Extruders zu replizieren. Die Validierung wurde an einem rechteckigen Wanelement mit einer gezackten Innenstruktur unter Berücksichtigung unterschiedlicher Materialbelastungen durchgeführt. Zur Darstellung der Simulationsergebnisse wurden Vergleichskurven verwendet. Es wurde festgestellt, dass sich die Genauigkeit des Lehmdruckers verbessert, wenn die Materialnutzlast während des Druckvorgangs aufgrund von Materialextrudierung abnimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz, der für die Modellierung eines SCARA-Lehmdruckers verwendet wurde, praktikabel ist. Das Modell stellt eine robuste und schnelle Simulationsumgebung dar, die zur Optimierung kinematischer Abweichungen verwendet werden kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Probleme, die sich aus der Roboterkinematik ergeben, durch die Bewertung von Druckparametern über Simulationen der Druckerbewegungen durch die Entwicklung geeigneter Druckstrategien entschärft werden können. Die Validierung wurde an einer Teststruktur durchgeführt, bei der kinematische Effekte durch Vibrationen und Ruckbewegungen zu erwarten sind, z. B. erhöhte Fehlerraten an scharfen Ecken. Der vom digitalen Zwilling erbrachte Simulationsdienst stößt jedoch an seine Grenzen, da Sensordaten aus dem SCARA-Lehmdrucker als Eingaben benötigt werden, um den Kompromiss zwischen Druckgenauigkeit und Druckgeschwindigkeit weiter zu analysieren. In Zukunft könnte die Forschung auf die Entwicklung von DT-Diensten für das Echtzeitmonitoring und Geräteregeung beim Lehmdruck zur Archivierung des adaptiven Drucks ausgeweitet werden.

Danksagungen

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Sachbeihilfen mit den Geschäftszeichen SM 281/17-1 und SM 281/22-1 sowie durch die Technische Universität Hamburg im Rahmen des Juniorprojekts „Digitalization of earth printing to advance climate-informed engineering“ im Programm I³. Unser herzlicher Dank geht auch an die HC Hagemann GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, für die großzügige Bereitstellung der für diese Studie genutzten Infrastruktur. Die in diesem Beitrag geäußerten Meinungen, Erkenntnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen sind die der Autoren und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der vorgenannten Institutionen und Partner wider.

References

- [1] Perrot, A., Rangeard, D., & Courteille, E. (2018). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 172(2018), S. 670-676.
- [2] Smarsly, K., Peralta, P., Luckey, D., Heine, S., & Ludwig, H.-M. (2020). 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, Brasilien, 18.08.2020.
- [3] Wolf, A., Rosendahl, P.L., & Knaack, U. (2022). Additive manufacturing of clay and ceramic building components. *Automation in Construction*, 133(2022), 103956.
- [4] Gomaa, M., Jabi, W., Veliz Reyes, A., & Soebarto, V. (2021a). 3D printing system for earth-based construction: Case study of cob. *Automation in Construction*, 124(2021), 103577.
- [5] Gomaa, M., Vaculik, J., Soebarto, V., Griffith, M., & Jabi, W. (2021b). Feasibility of 3DP cob walls under compression loads in low-rise construction. *Construction and Building Materials*, 301(2021), 124079.
- [6] Peralta, P., Heine, S., Ludwig, H.-M., & Smarsly, K. (2020). A BIM-based approach towards additive manufacturing of concrete structures. In: *Proceedings of the 27th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE)*. Berlin, 01.07.2020.
- [7] Kontovourkis, O. & Tryfonos, G. (2020). Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design. *Automation in Construction*, 110(2020), 103005.
- [8] Dörfler, K., Dielemans, G., Lachmayer, L., Recker, T., Ratz, A., Lowke, D., & Gerke, M. (2022). Additive manufacturing using mobile robots: Opportunities and challenges for building construction. *Cement and Concrete Research*, 158(2022), 106772.
- [9] Dai, C., Lefèbvre, S., Yu, K., Geraedts, J.M.P., & Wang, C.C.L. (2020). Planning jerk-optimized trajectory with discrete time constraints for redundant robots. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(4), S. 1711-1724.
- [10] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(2018), S. 3563-3576.
- [11] Smarsly, K., Ahmad, M. E., Peralta, P., Al-Zuriqat, T., Al-Nasser, H., Dragos, K., & Chillón Geck, C. (2024). Digital twins, architectures, and elements in civil engineering – A multivocal literature review. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*. Montréal, Kanada, 25.08.2024.
- [12] MathWorks (2024). Simulink: Simulation and model-based design, online: <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>. Zugriff am 27.03.2024.
- [13] Denavit, J. and Hartenberg, R.S. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22(2), S.215-221.
- [14] Smarsly, K., Peralta, P., Dragos, K., Ahmad, M. E., Al-Zuriqat, T., Chillón Geck, C., & Al-Nasser, H., (2024). A multivocal literature review of digital twins, architectures, and elements in civil engineering. In: *Proceedings of the 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*. Potsdam, 10.06.2024.
- [15] Smarsly, K. & Tauscher, E. (2016). Monitoring information modeling for semantic mapping of structural health monitoring systems. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*. Osaka, Japan, 06.07.2016.