Robotergestützte Forschungsanlage für die automatisierte Fertigung adaptiver Betonmodule

Jannik Hoppe und Peter Mark, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland
Claudio Azevedo, B.T. innovation GmbH, Deutschland

Im Beitrag wird eine Forschungsanlage vorgestellt, in der automatisierte Prozesse zur Fertigung geometrisch und mechanisch veränderlicher (adaptiver) Stahlbetonmodule umgesetzt werden. Die Anlage ist mit drei Industrierobotern ausgestattet und bildet die Prozesskette aus Bewehren, Schalen und Schnellhärtung mit integrierten Kontrollen zur Qualitätssicherung ab. Im kooperativen Prozess zweier Roboter werden Bewehrungselemente automatisiert geschweißt, was individuelle Bewehrungsführungen ermöglicht. Das entwickelte Schalungssystem erlaubt variable Querschnitte und Oberflächen (Adaptivität) mit Maßabweichungen unter 2 mm. Prozessbegleitende geometrische und mechanische Kontrollen mittels Laserliniensensor, Stereokamera und Rückprallhammer dienen der Qualitätssicherung und sind zur Regelung von Teilprozessen nutzbar. Eine Härtekammer mit regelbaren Temperatur- und Feuchtebedingungen beschleunigt die Erhärtung des Betons auf Dauern von minimal etwa 1 h. Zum Betrieb und schon während der Errichtung der physischen Anlage dient ein digitales Anlagenmodell der Simulation und virtuellen Inbetriebnahme vorab.

Einleitung und Zielsetzung

Heute noch vorherrschende, klassische Bauweisen führen aufgrund häufig langer Bauzeiten vor Ort zu kollateralen Infrastrukturbelastungen, welche volkswirtschaftliche Schäden und Emissionsausstoß verursachen [1, 2]. Modulare Bauweisen hingegen ermöglichen ressourcenschonendes und schnelles Bauen [3]. Dazu müssen zeitintensive Herstellungsschritte, wie Schalen, Bewehren, Betonieren und Aushärten von Stahlbetonbauteilen von der Baustelle in eine Vorfertigung verlagert werden [4]. Die Ausführung vor Ort wird auf den Transport und die Montage der Bauteile beschränkt. Hierfür sind geeignete Verbindungen [5] sowie hinsichtlich Transport und Handling begrenzte Bauteilgrößen und -gewichte erforderlich. Zugleich müssen die Bauteile mit hoher Präzision gefertigt werden, damit die Montage ohne Verzögerungen oder Nacharbeiten erfolgen kann [6]. Geeignet sind dazu modulare Baukastensysteme mit typisierten Verbindungen, die sich industriell fertigen lassen [7]. Im Vergleich zum klassischen Hochbau erfordern sie jedoch geringere zulässige Toleranzen bis in den Submillimeterbereich [8, 9]. Zudem erfordert die industrielle Fertigung eine durchgängige digitale Verknüpfung von Entwurf, Fertigung, Qualitätskontrolle und Montage, um Produkt- und Prozessdaten konsistent vorzuhalten [10]. Dazu sind Methoden der Lean Production und der Industrie 4.0 auf das Bauwesen zu übertragen.

Fertigungsanlagen, die diesen Anforderungen gerecht werden, sind im Bauwesen derzeit noch wenig verbreitet, auch wenn sich die Fertigteilherstellung deutlich weiterentwickelt [11]. Zunehmend werden einzelne Prozesse, wie das Schweißen von Bewehrungsmatten und Gitterträgern, das Setzen und Entfernen magnetischer Schalungen und die Betonage automatisiert, sodass sich teilautomatisierte Anlagen, vornehmlich für standardisierte Bauteile, wie Wand- und Deckenelemente etablieren. Die Ausführungsgenauigkeit liegt dabei innerhalb der zulässigen Toleranzen für den klassischen Hochbau, also im Zentimeterbereich, was den erhöhten Anforderungen modularer Bauweisen bis in den Submillimeterbereich nicht gerecht wird. Ausnahmen bilden Tübbingfertigungen für den maschinellen Tunnelbau mit bekannt geringen Abweichungen in Neigungen oder Längenabmaßen [12].

Im Beitrag wird eine Forschungsanlage vorgestellt, die in den Versuchshallen KIB-KON der Ruhr-Universität Bochum errichtet wurde. Sie überträgt die beschriebenen Anforderungen an adaptive Modulbauweisen in eine reale Anlage und dient der experimentellen Entwicklung automatisierter, qualitätsgesicherter Prozesse [13]. Im Vordergrund stehen dabei das Anlagenkonzept, die Prozesskette mit Fokus auf einzelne Teilprozesse sowie die Einbindung von Schnellhärtung, Qualitätssicherung und digitalem Anlagenmodell. Die Anlage ist variabel konzipiert, sodass sie für die Fertigung des hier beschriebenen Y-Moduls sowie beliebig anderer stabförmiger oder flächiger Module geeignet ist und perspektivisch

■ Jannik Hoppe ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum. Er absolvierte seinen Abschluss als Master of Science im Bauingenieurwesen an der Universität Duisburg-Essen. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen die automatisierte Fertigung von Stahlbetonbauteilen sowie adaptive Modulbauweisen. Im beschriebenen Projekt ist er Projektleiter seitens der Ruhr-Universität Bochum.
jannik.hoppe@rub.de

■ Claudio Martins A. de Azevedo ist bei der B.T. innovation GmbH im Bereich technische Projektkoordination und Consulting für die industrielle Betonfertigteilproduktion tätig. Er absolvierte seinen Abschluss als Produktionstechnik-Ingenieur an der Universidade Federal de Itajubá in Brasilien mit dem Schwerpunkt Maschinenbau und verfügt über einen Lean-Six-Sigma-Hintergrund. Im beschriebenen Projekt ist er Projektleiter seitens der B.T. innovation GmbH mit der Verantwortung für die technische Projektkoordination, die Anlagenintegration und die Prozessoptimierung.
Claudio.Azevedo@bt-innovation.de

■ Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Peter Mark ist Universitätsprofessor für Massivbau an der Ruhr-Universität Bochum. Er ist Beratender Ingenieur und Prüfingenieur für Baustatik. Prof. Mark ist Sprecher des Sonderforschungsbereichs 1683 zur Wiederverwendung von Bestandstragwerken und Koordinator des Schwerpunktprogramms 2187 zur automatisierten Fließfertigung. Schwerpunkte seiner Forschung bilden die Wiederverwendung von Stahlbeton, die modulare Schnellfertigung, Verfahren der Temperaturinduktion, Verankerungstechnik und das Bauen im Bestand.
peter.mark@rub.de

ebenso zur Zustandsbewertung und Aufbereitung von rückgebauten Bauteilen eingesetzt werden kann [14].

Robotergestützte Forschungsanlage und Prozesskette

Die Forschungsanlage mit einer Grundfläche von ca. 15,0 × 8,5 m ist in den Versuchshallen KIB-KON der Ruhr-Universität Bochum errichtet. Abb. 1 zeigt sie in Aufsicht und Seitenansicht. Gekennzeichnet sind die wesentlichen Stationen der Prozesskette. Die Fertigung erfolgt im Umlaufprinzip auf einem Werkstückträger mit einer Grundfläche von 2,20 x 2,20 m, der die einzelnen Arbeitsstationen mit Hilfe eines autonomen Förderfahrzeugs sukzessive durchläuft. Der Prozess umfasst die Materialbereitstellung, das Bewehren und Schalen, die geometrische Qualitätskontrolle von Schalung und Bewehrung, das Betonieren, die Schnellhärtung, eine geometrische und mechanische Qualitätskontrolle des erhärteten Bauteils sowie die Kennzeichnung dessen mit einem RFID-Tag.

Die automatisierten Teilprozesse werden von drei überkopf an Linearachsen geführten Industrierobotern ausgeführt. Alle Roboter sind mit Werkzeugwechselsystemen ausgestattet, sodass unterschiedliche Endeffektoren eingesetzt werden,

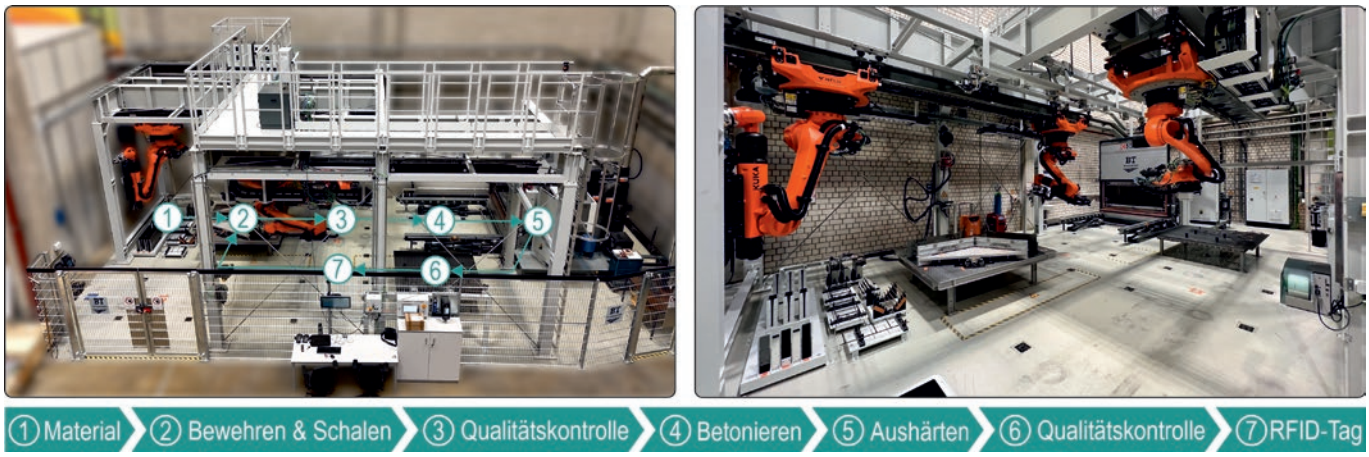

Abb. 1: Robotergestützte Forschungsanlage in den Versuchshallen KIB-KON der Ruhr-Universität Bochum mit Kennzeichnung der Prozesskette im Umlaufprinzip

die in Magazinen innerhalb der Anlage bereitstehen. An den Stationen eins bis drei arbeiten zwei an einer gemeinsamen Linearachse geführte Roboter (Nenn-Traglast je 250 kg) teilweise kooperativ, insbesondere beim Bewehren und Schalen, sowie bei der Qualitätskontrolle. Die Stationen vier und fünf dienen der Betonage sowie der Aushärtung unter kontrollierten Temperatur- und Feuchtebedingungen in einer Härtekammer. An den Stationen sechs und sieben erfolgt durch den dritten Roboter (Nenn-Traglast 50 kg) das Ausschalen, die geometrische und die zerstörungsfrei mechanische Qualitätskontrolle mittels Rückprallhammer sowie die Kennzeichnung des Moduls durch einen RFID-Tag. Letzterer ermöglicht die eindeutige Identifikation des Moduls und schafft die Grundlage, Bauteil-, Prozess- und Qualitätsdaten stationsübergreifend zuzuordnen.

Die Anlage ist als experimentelle Forschungsplattform konzipiert, in der einzelne Teilprozesse separat entwickelt, anschließend miteinander verknüpft und ebenso im Gesamtprozess erprobt werden. Der variable Aufbau ermöglicht es unterschiedliche Bauteilgeometrien und verschiedene Umsetzungen der Automatisierung zu untersuchen. Im Folgenden werden das adaptive Schalungskonzept und exemplarische Teilprozesse vorgestellt. Die Weiterentwicklung der Prozesse inkl. der Untersuchung der erzielbaren Genauigkeiten läuft derzeit, wobei geometrische Genauigkeiten von bis zu ± 0,35 mm im Teilprozess [15] erwartbar sind. Ergänzend zur physisch errichteten Anlage wurde ein digitales Modell aufgebaut, mit dem sich Prozesse numerisch simulieren lassen. Entsprechend können Bewegungsabläufe der Roboter, Taktzeiten und mögliche Kollisionen analysiert und vorab für den realen Anlagenbetrieb optimiert werden. Die Anlage schafft mit dem Umlaufprinzip, den integrierten Sensoren, der digitalen Anbindung und der bauteilbezogenen Kennzeichnung die Grundlage für die Fertigung im Sinne der kooperativen Methoden der Industrie 4.0.

Adaptive Schalung und Demonstrator

Grundlage für die Entwicklung der Fertigungsprozesse ist das zu fertigende Bauteil mit dem zugehörigen adaptiven

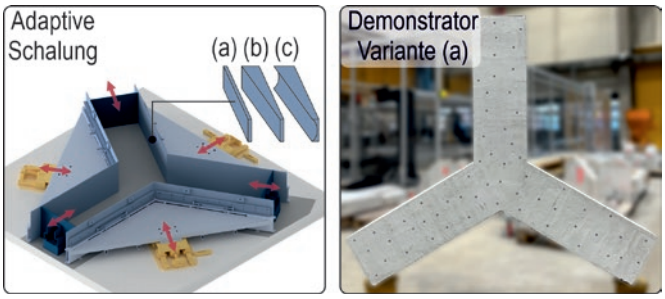

Abb. 2: Konstruktion der adaptiven Schalung sowie exemplarisch gefertigter Demonstrator

Schalungskonzept. Betrachtet wurde zunächst ein Y-förmiges Modul als Teil einer modularisierten Tragstruktur, wobei die einzelnen Module über Schraubverbindungen gefügt werden und so eine wandartige Wabenstruktur bilden [16]. Abhängig von ihrer Position in der Tragstruktur unterscheiden sich die Module innerhalb der Grundform in Größe, Bewehrungsführung, Querschnitt und Oberfläche (Adaptivität). Entsprechend leitet sich ein adaptives Schalungskonzept ab, das die unterschiedlichen Geometrien innerhalb der Grundform abbildet. Das Konzept für die Y-förmige Grundform zeigt Abb. 2 links. Lineare Verstelleinheiten erlauben eine Anpassung der Armbreiten und austauschbare Freiformschalungen variable Querschnitte, hier bspw. (a) mit konstant rechteckigem, (b) mit gevoutet rechteckigem und (c) mit gevoutet abgerundetem Querschnitt. Die variabel positionierbaren Stirnschalungen definieren die Armlängen und ermöglichen zugleich die Integration von Einbauteilen für spätere Verbindungen. Der rechts dargestellte Demonstrator zeigt die grundsätzliche Eignung des Systems, das die für modulare Bauweisen erforderliche Präzision sicher und reproduzierbar gewährleistet.

Exemplarische Teilprozesse

Die Forschungsanlage dient der schrittweisen Umsetzung und Erprobung automatisierter Teilprozesse entlang der dargelegten Prozesskette. Abb. 3 zeigt exemplarisch drei

zentrale Teilprozesse, die in der Anlage umgesetzt wurden: (a) Pick & Place der Freiformschalung, (b) das kooperative Schweißen von Bewehrungsstäben sowie (c) die geometrische Kontrolle des gefertigten Moduls.

Das automatisierte Schalen mit dem beschriebenen adaptiven Schalungssystem beinhaltet, ausgehend von den vormontierten Schalungsträgern mit linearen Verstelleinheiten auf dem Werkstückträger, das Einhängen der austauschbaren Freiformschalungen, das Positionieren und magnetische Fixieren der Stirnschalungen sowie das stufenlose Bedienen der linearen Verstelleinheiten mit einem robotergeführten Schraubwerkzeug. Die grundsätzliche Eignung des Schalungssystems wurde am Demonstrator gezeigt; die Automatisierung innerhalb der Anlage umgesetzt. Das Ziel der weiteren Prozessentwicklung ist die Integration optischer Kontrollen der geometrischen Genauigkeit, sodass Messdaten prozessbegleitend erfasst, in Echtzeit ausgewertet und im Sinne einer In-Loop-Regelung in den Prozess zurückgeführt werden.

Das Bewehren umfasst in der Forschungsanlage das Positionieren von Abstandhaltern, einzelner Bewehrungsstäbe und vorgefertigter Bewehrungselemente direkt auf dem Werkstückträger wie auch das Verbinden der Bewehrung durch Schweißen vorab. Hierzu werden die Bewehrungselemente auf einem separaten Schweißtisch von einem Roboter positioniert, fixiert oder gehalten, während der andere Roboter im MAG-Verfahren (Metall-Aktivgas-Schweißen) schweißt. Exemplarisch zeigt Abb. 3 (b) den kooperativen Prozess für einen beidseitig geschweißten Kreuzungsstoß sowie bereits automatisiert gefertigte Überlappstöße nach DIN EN ISO 17660-1 [17], die unterschiedliche Qualitäten aus der fortschreitenden Prozessentwicklung aufweisen. Gegenstand laufender Untersuchungen sind die erzielbaren geometrischen Genauigkeiten, die Qualität der Schweißverbindungen sowie die Erweiterung des Prozesses auf alternative Geometrien und komplexe Bewehrungsführungen. Insbesondere sind dabei die Inhomogenität der Oberfläche durch die Rippung und vor allem die unvermeidliche geometrische Abweichung von den Sollformen, sowohl bei geraden als auch bei gebogenen Stäben, zu beachten [18].

Qualitätskontrollen an Schalung und Bewehrung erfolgen prozessbegleitend geometrisch sowie am ausgehärteten Modul geometrisch und mechanisch. Für die geometrischen Kontrollen stehen Stereokameras und ein Laserliniensensor zur Verfügung. Einen exemplarischen Ablauf zeigt Abb. 3 (c) am gefertigten Demonstrator, bei dem die Oberfläche des Moduls mit einer robotergeführten Stereokamera erfasst wird. Aus den Messdaten lässt sich eine Punktwolke an Oberflächenkoordinaten erzeugen, mit der lokale und globale Formen von Oberflächen in Schalung und Bewehrung bestimmt werden. Diese Ist-Daten werden den Soll-Daten des Bauteilentwurfs gegenübergestellt, Abweichungen ermittelt und diese gegenüber zulässigen Toleranzen bewertet. Die

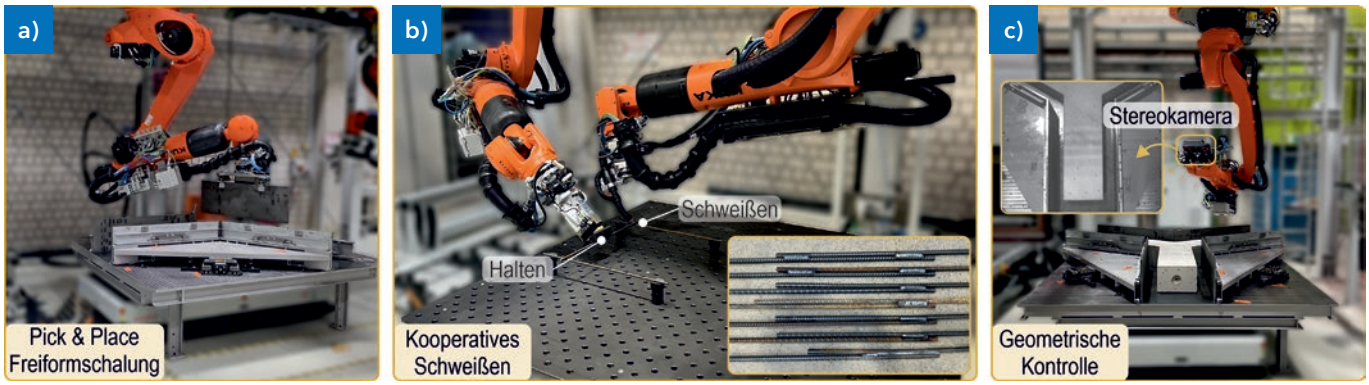

Abb. 3: Exemplarische Teilprozesse der Fertigungsanlage: (a) Pick & Place Freiformschalung, (b) robotergestütztes, kooperatives Schweißen von Bewehrungsstäben sowie exemplarisch hergestellte Überlappstöße und (c) geometrische Kontrolle des Demonstrators zur Qualitätssicherung

Fertigungsqualität wird so erfasst und bietet eine Grundlage zur Optimierung von Prozessen und Anlagenkomponenten. Die am Demonstrator erfassten Abweichungen der Grundabmessungen von max. ± 2,0 mm belegen, dass das Schalungssystem für eine präzise Fertigung für Modulbauweisen grundsätzlich geeignet ist. Ziel ist es, diese Qualität im automatisierten Prozess weiter zu steigern und mittels durchgehender Kontrollen reproduzierbar sicherzustellen. Im Fokus stehen dabei die besonders geometrierelevanten Bereiche wie Modulverbindungen, die Genauigkeiten bis in den Submillimeterbereich erfordern. Die mechanische Kontrolle der gefertigten Bauteile erfolgt mit einem robotergeführten Rückprallhammer, der für normalfeste wie auch hochfeste Betone mit Festigkeiten > 100 MPa geeignet ist. Mit diesem werden Rückprallzahlen an der Oberfläche erfasst, von denen sich die erwartbare Druckfestigkeit des Betons bereits prozessbegleitend ableiten lässt [19]. Zu untersuchen ist der Einfluss verschiedener Prozess- und Bauteilparameter, wie die automatisierte Prüfungsdurchführung, die Art und Dauer der Wärmebehandlung, das Betonalter und die Oberflächenbeschaffenheit auf die Messwerte. Mit den mechanischen und den geometrischen Kenngrößen lassen sich dann die Tragfähigkeiten der Module bestimmen [20].

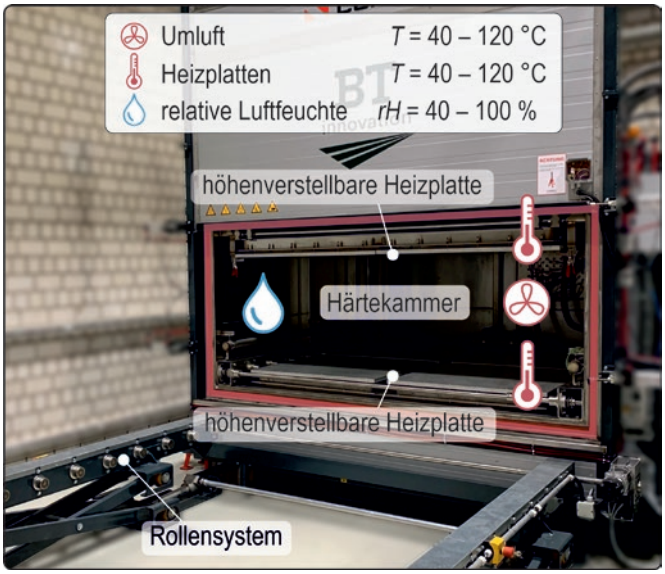

Abb. 4: Härtekammer mit regelbarer Umluftheizung, höhenverstellbaren Heizplatten und relativer Luftfeuchte; Übergabe des Werkstückträgers mit Hilfe des Rollensystems

Schnellhärtung

Die Schnellhärtung des Betons erfolgt unter regelbaren Temperatur- und Feuchtebedingungen. Abb. 4 zeigt die in der Anlage integrierte Härtekammer, die über ein höhenverstellbares Rollensystem an das Fördersystem der Anlage angeschlossen ist. Auf der Rollenbahn wird manuell betoniert, der Werkstückträger mit gefüllter Schalung anschließend automatisiert in die Härtekammer gefahren. In der Kammer ist die Wärme variabel konvektiv über Umluft und/oder konduktiv über den direkten Kontakt höhenverstellbarer Heizplatten übertragbar. Unabhängig voneinander lassen sich Umluft- und Heizplattentemperatur von 40 bis 120 °C und die relative Luftfeuchte von 40 bis 100 % regeln. Durch eine Wärmebehandlung mit einer Umlufttemperatur T = 80 °C und einer relativen Luftfeuchte rH = 60 % erreicht der bisher genutzte hochfeste Beton auf Basis des Bindemittels Nanodur Compound 5941 [21] bereits nach zwei bis vier Stunden Festigkeiten bis über 80 % seiner 28-Tage-Festigkeit [19, 22]. Frühfestigkeiten für das Ausschalen werden bereits in Dauern nahe 1 h erreicht. Ziel ist die Optimierung der Wärmebehandlung zur beschleunigten Erhärtung des Betons bei zugleich möglichst geringen Eigenspannungen und Gefügeschäden [23, 24]. Hierfür relevante Messgrößen werden über Temperatur- und Feuchtesensoren in der Härtekammer und am Betonmodul erfasst und dienen der Regelung des Prozesses.

Digitales Anlagenmodell

Das digitale Modell der Anlage zeigt Abb. 5 (a). Mit den Konstruktionsdaten der realen Anlage bildet es die Komponenten und die Arbeitsbereiche realitätsnah ab. Es dient der virtuellen Erprobung von Prozessen, wodurch insbesondere Roboterinteraktionen, Bewegungsabläufe, Taktzeiten und potenzielle Kollisionen vorab analysiert werden können. Es ermöglicht die virtuelle Inbetriebnahme [25] und unterstützt

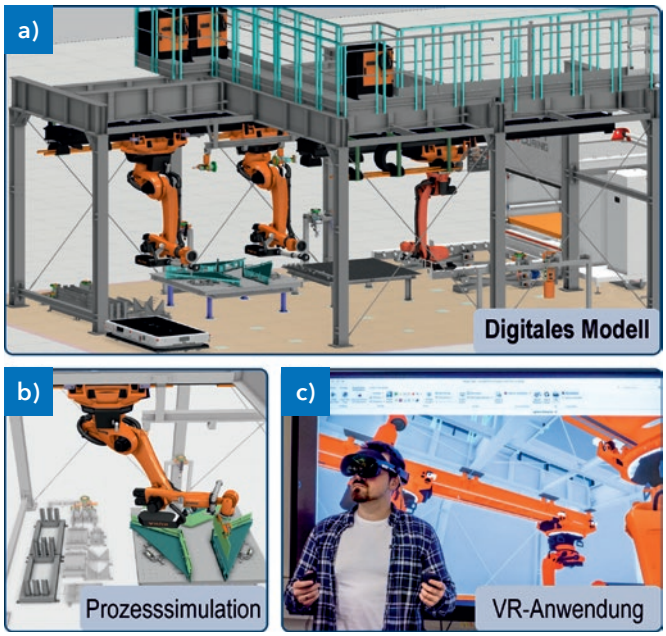

Abb. 5: (a) Digitales Anlagenmodell, (b) Teilprozess „Pick & Place Freiformschalung" in der Simulation und (c) Nutzung des digitalen Modells in Virtual Reality zur immersiven Beobachtung der Simulation oder zu Schulungszwecken

durch Machbarkeitsstudien die Umsetzung der Prozesse in der realen Anlage. Exemplarisch zeigt Abb. 5 (b) den Teilprozess „Pick & Place Freiformschalung" in der numerischen Simulation. Die Schalung erfordert aufgrund der geringen Toleranzen hohe Wiederholgenauigkeiten der Roboter und birgt Kollisionsrisiko. Vor der Umsetzung des Prozesses konnten im digitalen Modell vorab verschiedene Prozessvarianten bspw. durch die Änderung der Reihenfolge beim Platzieren der einzelnen Schalungselemente auf dem Werkstückträger oder durch angepasste Bahnbewegungen der Roboter gegenübergestellt werden. Der Prozessablauf wurde so im Digitalen optimiert, wodurch das Kollisionsrisiko bei der Umsetzung in der realen Anlage minimiert wurde. Das digitale Modell schafft ebenso die Grundlage für Interaktionen in der virtuellen Realität (Virtual Reality (VR)) zur immersiven Beobachtung der Simulation oder zu Schulungszwecken. Die exemplarische Nutzung mit einem Head-Mounted Display (HMD) zeigt Abb. 5 (c). Perspektivisch wird das digitale Anlagenmodell Teil des digitalen Zwillings in Form einer Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS) [26–28], der die wesentlichen Spezifikationen beschreibt und Prozessdaten in einem bidirektionalen Datentransfer zur Überwachung und Optimierung der Abläufe direkt im Prozess nutzt.

Schlussfolgerungen

Im Beitrag wird die Errichtung einer Forschungsanlage für adaptive Betonmodule in den Versuchshallen KIB-KON der Ruhr-Universität Bochum gezeigt. Die Anlage überträgt die Anforderungen an adaptive Modulbauweisen in eine robotergestützte Fertigung und schafft damit die Grundlage automatisierte, qualitätsgesicherte Prozesse experimentell zu entwickeln. Aus der bisherigen Prozessentwicklung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Das Bewehren wurde als robotergestützter Teilprozess in der Anlage umgesetzt. Dabei wurde die Machbarkeit des kooperativen Schweißens an standardisierten, geraden Stoßgeometrien nachgewiesen. Die mechanische Qualität der Schweißverbindung zeigt sich dabei empfindlich gegenüber unvermeidlichen Abständen zwischen den zu verbindenden Bewehrungsstäben. Für eine robuste Anwendung sind die Positioniergenauigkeit der Bewehrungselemente und die Qualität der Schweißverbindung näher zu untersuchen. Relevant sind dazu insbesondere auch räumliche Bewehrungskörbe wie sie bei Verbindungen aus Längsstäben mit Schubzulagen oder Bügeln auftreten.
- Die Eignung des adaptiven Schalungssystems wurde mit der Fertigung eines Demonstrators untersucht. Die geometrische Qualitätskontrolle liefert insgesamt Abweichungen von maximal ± 2,0 mm in den Grundabmessungen. Durch bedarfsgerecht integrierte Kontrollen mit direkter Rückkopplung in den Prozess werden die Knotenpunkte als Modulanschlüsse im Tragwerk besonders präzise ausgeführt, während einzelne Querschnittsabmessungen der Modularme unproblematisch auch höhere Abweichungen besitzen können.

Tab.1: Übersicht der Beteiligten bei der Planung und der Errichtung der Anlage sowie bei der laufenden Forschung

Institution	Beteiligung
Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum	Leitung der Forschung, Konzeptentwicklung, Begleitung von Planung und Bau
B.T. innovation GmbH mit: • Kraft Curing Systems GmbH • Kuka Deutschland GmbH • Schunk SE & Co. KG	Planung und Bau (Generalunternehmer) • Härtekammer • Programmierung der Steuerung und der Roboter • Endeffektoren
Ruhr-Universität Bochum: • Lehrstuhl für Digital Engineering • Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen • Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS)	 • Digitales Modell und Verwaltungsschale (AAS) • Verwaltungsschale (AAS) • Unterstützung bei Planung und Programmierung

- Die integrierte Härtekammer ermöglicht durch geregelte Temperatur- und Feuchtebedingungen die Schnellhärtung des Betons. Frühfestigkeiten für das Ausschalen werden in Dauern nahe 1 h erreicht.
- Das digitale Anlagenmodell bildet die Anlage realitätsnah ab. Die virtuelle Erprobung und anschließende Umsetzung wurde am Teilprozess „Pick & Place Freiformschalung" demonstriert. Der Vergleich von Simulation und realem Teilprozess zeigt die Eignung des Modells für die virtuelle Inbetriebnahme.

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung des Forschungsgroßgeräts im Rahmen des Vorhabens 501824812. Dank gilt ebenso allen Beteiligten (siehe Tab. 1) für die erfolgreiche Zusammenarbeit bei der Planung und der Errichtung der Anlage. Weitergehende Information zur Anlage und zu Anlagenkomponenten werden in folgenden Beiträgen der Beteiligten veröffentlicht.

Literatur

[1] Pishue, B.: 2023 INRIX Global Traffic Scorecard. mit Q1 2024 Update. Inrix Research.
[2] Hoppe, J.; Sanio, D.; Hormel, A. et al.: CO2-Bilanzierung bei Straßenbrücken – Ein Bewertungsansatz für die Planungsphase von Baumaßnahmen. Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 354–365.
[3] Mark, P.; Lanza, G.; Lordick, D. et al.: Vom Handwerk zur individualisierten Serienfertigung. Bautechnik 98 (2021), Heft 3, S. 243–256.
[4] Forman, P.; Glock, C.; Mark, P.: Schnelles Bauen – Motivation, Historie und Konzepte. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Sonderheft S2 Schneller bauen, S. 2–11.
[5] Tillmann, M.: Knotenverbindungen für Betonfertigteile - Hinweise für Bemessung und Konstruktion. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 8, S. 583–593.
[6] Stindt, J.; Frey, A. M.; Forman, P. et al.: Toleranzfreie Montage modularer Betontragwerke. Bautechnik 100 (2023), Heft 11, S. 674–688.
[7] Rettinger, M.; Moser, G.; Frank, N. et al.: Design for Manufacturing and Assembly als Entwurfsprinzip für den modularen Betonfertigteilbau. Bautechnik 102 (2025), Heft 8, S. 458–470.
[8] Forman, P.; Mark, P.: Fertigungstoleranzen von Betonfertigteilen für die modulare Bauweise. Beton- und Stahlbetonbau 117 (2022), Heft 5, S. 286–295.
[9] Forman, P.; Ahrens, M. A.; Mark, P.: Sensitivity-Based Permutation to Balance Geometric Inaccuracies in Modular Structures. Sustainability 16 (2024), Heft 7, S. 3016.
[10] Glock, C.: Digitalisierung im konstruktiven Bauwesen. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), Heft 8, S. 614–622.
[11] Brell-Çokcan, S.; Schmitt, R. H. (Hrsg.): IoC - Internet of Construction. Informationsnetzwerke zur unternehmensübergreifenden Kollaboration in den Fertigungsketten des Bauwesens. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2024.
[12] Meschke, G.; Breitenbücher, R.; Freitag, S. et al.: Interaction Modeling in Mechanized Tunneling. Springer Nature Switzerland; Imprint Springer, Cham, 2023.
[13] Hoppe, J.; Mark, P.: Robot-Assisted Flow Production of Modular Concrete Components: Research Facility and Digital Model. Beton- und Stahlbetonbau (2026).
[14] Forman, P.; Sanio, D.; Hoppe, J. et al.: Modulare Zirkularität – bauen, wiederverwenden, reparieren, wandeln. Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 10, S. 771–783.
[15] Hoppe, J.; Forman, P.; Wolf, M. et al.: Automatisierte, qualitätsgesicherte Prozesse zur Schnellfertigung adaptiver, bewehrter Betonmodule – Umsetzung in eine Forschungsanlage. Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 7, S. 504–516.
[16] Stindt, J.; Frey, A. M.; Forman, P. et al.: CO2 reduction of resolved wall structures: A load-bearing capacity-based modularization and assembly approach. Engineering Structures 300 (2024), S. 117197.
[17] DIN EN ISO 17660-1:2006-09: Schweißen - Schweißen von Betonstahl - Teil 1: Tragende Schweißverbindungen.
[18] Zöller, R.; Ochlast, A.; Zimmert, F. et al.: Entwicklung von Prozessen zur automatisierten Planung und Herstellung von Stahlbetonbauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 117 (2022), Heft 4, S. 222–234.
[19] Hoppe, J.; Schwarz, Y.; Stindt, J. et al.: Prozessbegleitende Ableitung mechanischer Eigenschaften hochfester Betone bei Schnellfertigung. Beton- und Stahlbetonbau (2024).
[20] Forman, P.; Mark, P.: Interaktionsbemessung für schlanke Querschnitte aus UHPC. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Heft 8, S. 607–619.
[21] Sagmeister, B.: Maschinenteile aus zementgebundenem Beton. Beuth Praxis. Beuth Verlag, Berlin, 2017.
[22] Stindt, J.; Forman, P.; Mark, P.: Influence of Rapid Heat Treatment on the Shrinkage and Strength of High-Performance Concrete. Materials (Basel, Switzerland) 14 (2021), Heft 15.
[23] Rose, J.; Forman, P.; Mark, P.: Einfluss rapider Wärmebehandlung auf das kurzzeitige Kriechen von hochfestem Beton. Beton- und Stahlbetonbau (2024).
[24] Schwarz, Y.; Sanio, D.; Mark, P.: Einfluss einer Wärmebehandlung auf das Verbundkriechen von hochfestem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 119 (2024), Heft 4, S. 253–264.
[25] VDI/VDE 3693 Blatt 1: Virtuelle Inbetriebnahme - Modellarten und Begriffe.
[26] Industrial Digital Twin Association: Specification of the Asset Administration Shell. Part 1: Metamodel, IDTA Number: 01001-3-0-1. Industrial Digital Twin Association, 2024.
[27] Kosse, S.; Forman, P.; Stindt, J. et al.: Industry 4.0 Enabled Modular Precast Concrete Components: A Case Study. In: RILEM Bookseries. International RILEM Conference on Synergising expertise towards sustainability and robustness of CBMs and concrete structures, S. 229–240. Springer, Cham., 2023.
[28] Kosse, S.; König, M.; Vogt, O. et al.: Digitaler Zwilling für die automatisierte Produktion von Betonfertigteilen. Bautechnik 99 (2022), Heft 6, S. 463–470.

WEITERE INFORMATIONEN

RUHR UNIVERSITÄT BOCHUM
RUB
www.ruhr-uni-bochum.de

BT innovation
www.bt-innovation.de

KRAFT CURING
www.kraftcuring.com

KUKA
www.kuka.com

SCHUNK
www.schunk.com