



Bauen der Zukunft – eine interdisziplinäre Forschungsinitiative

D. Bayer, K. Berns, S. Carrigan, C. Glock, F. Kaufmann, K. Körkemeyer, O. Kornadt, W. Kurz, S. Liu, M. Pahn, H. Sadegh-Azar, D. Stricker, C. Thiele

ZUSAMMENFASSUNG Dieser Beitrag stellt die Ziele, das Vorgehen und ausgewählte Ergebnisse der interdisziplinären Forschungsinitiative „Bauen der Zukunft – klimagerecht und ressourcenschonend“ (www.bauenderzukunft.org) vor. Die Forschungsinitiative setzt sich aus zwanzig Professorinnen und Professoren der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) sowie weiterer wissenschaftlicher Institute aus Kaiserslautern zusammen und wird vom Land Rheinland-Pfalz gefördert. Das Ziel ist es, die Vorzüge des Bauens zu bewahren und gleichzeitig negative Umwelteinflüsse auf ein Minimum zu reduzieren. Hierfür wurden verschiedene Handlungsfelder identifiziert, unter anderem die Weiterentwicklung von Bauteilen und Tragwerken aus optimierten Baustoffen, die Effizienzsteigerung durch Optimierung von Prozessen und Steigerung von Automatisierung und Digitalisierung im Bauwesen sowie die Konsolidierung des fragmentierten Realisierungsprozesses über die Lebenszyklusphasen Planung, Bau und Betrieb. In verschiedenen Forschungs- und Themenfeldern befassen sich interdisziplinäre Teams aus Architektur, Bau, Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik, Künstliche Intelligenz, Robotik, Werkstoffe und Mathematik mit anwendungsorientierten und theoretischen Themen. Im Beitrag werden ausgewählte Forschungsaktivitäten vorgestellt und zukünftige Herausforderungen benannt.

STICHWÖRTER

Forschung und Entwicklung, Nachhaltigkeit, CO₂-Reduktion, Betonbau, Digitale Methoden

Building the future – an interdisciplinary research initiative

ABSTRACT This article presents the objectives, approach and selected results of the interdisciplinary research initiative “Building the future – climate-friendly and resource-conserving” (www.bauenderzukunft.org). The research initiative is made up of twenty professors from the University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) and other scientific institutes in Kaiserslautern and is funded by the state of Rhineland-Palatinate. The aim is to preserve the benefits of building and at the same time reduce negative environmental impacts to a minimum. To this end, various fields of action have been identified, including the further development of components and supporting structures made of optimized building materials, increasing efficiency by optimizing processes and increasing automation and digitalization in the construction industry, consolidating the fragmented realisation process across the life cycle phases of design, construction and operation. Interdisciplinary teams from architecture, construction, mechanical engineering, electrical engineering, computer science, artificial intelligence, robotics, materials and mathematics are working on application-oriented and theoretical topics in various research and subject areas. The article presents selected research activities and identifies future challenges.

1 Hintergrund

Bauwerke bieten dem Menschen seit jeher Schutz vor äußeren Umwelteinflüssen wie Regen und Kälte und erfüllen elementare Bedürfnisse nach Sicherheit und Geborgenheit. Sie ermöglichen hoch entwickelte Mobilität, Industrieproduktion, Bildung, Gesundheitsversorgung und Kultur. Besondere Bauwerke wie das im Jahr 1901 erbaute Landwasserviadukt [1; 2] beweisen dies eindrucksvoll (Bild 1).

Gleichzeitig sind mit Bautätigkeiten häufig negative Umwelteinflüsse und ein hoher Ressourcenverbrauch verbunden. Im Jahre 2022 lag die Gesamtproduktion von Kies, Sand und gebrochenem Naturstein in Deutschland bei circa 463 Mio. t und damit fast dreimal höher als die der Kohleförderung [3].

Hinsichtlich der durch die Baubranche verbrauchten Energie und erzeugten Emissionen an CO₂-Äquivalenten ist es notwendig, eine differenzierte Betrachtung zwischen der Baustoffherstel-



Bild 1. Landwasserviadukt. Foto: [2]

Fig. 1. Landwasser Viaduct. Source: [2]

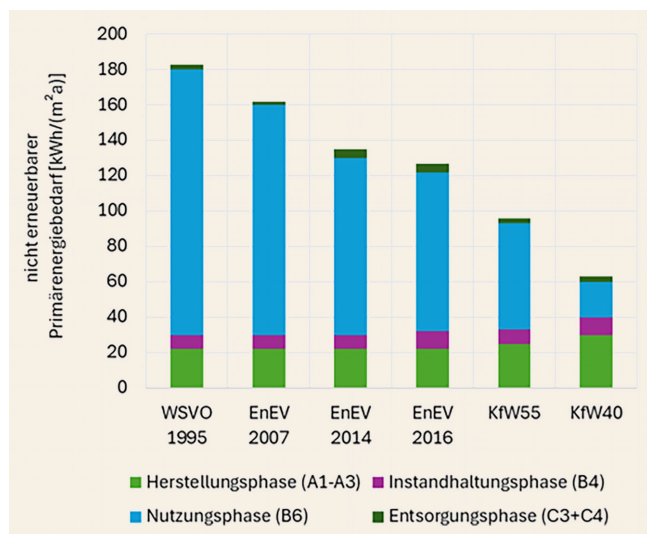


Bild 2. Anteile am Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar, eines Einfamilienhauses über 50 Jahre. Grafik: [7]
Fig. 2. Share of primary energy demand, non-renewable, of a detached house over 50 years. Source: [7]

lung, dem Bauprozess, dem Betreiben von Gebäuden sowie dem Abriss bzw. dem Recycling vorzunehmen. Allein die Herstellung von Zement erzeugt circa 2 % der deutschen und 8 % der weltweiten Emissionen an CO₂-Äquivalenten [4; 5]. Für den Betrieb von Gebäuden werden nach wie vor erhebliche Energiemengen aufgewendet, auch wenn Energiesparmaßnahmen starke Reduktionen ermöglichen. So haben die privaten Haushalte einen Anteil von 28 % am deutschen Endenergieverbrauch und gehören damit zusammen mit Verkehr und Industrie zu den Hauptverbrauchern [6].

Dabei nehmen die Grauen Emissionen, das heißt Emissionen, die bspw. während der Errichtung oder dem Abriss von Gebäuden entstehen, einen immer größeren Raum ein (Bild 2) [7; 8]. Diese Entwicklung ist dem großen Erfolg der Senkung der Betriebsemissionen insbesondere durch Fortschritte bei der Gebäudedämmung zu verdanken.

Darüber hinaus haben Bau- und Abbruchabfälle mit rund 223 Mio. Tonnen einen Anteil von 54 % am Gesamtaufkommen an Abfällen in Deutschland. 88 % dieser Reststoffe sind aber unbelastet von Schadstoffen und werden recycelt beziehungsweise für vielfältige Baumaßnahmen wiedereingesetzt [9].

2 Interdisziplinarität und Vernetzung

Die diskutierten Herausforderungen lassen sich nur im interdisziplinären Verbund verschiedener Disziplinen lösen. Hierzu müssen etablierte Planungs- und Bauweisen kritisch hinterfragt und an heutige Anforderungen angepasst werden. Das derzeitige sequenzielle, fragmentierte Vorgehen ist zu überwinden. Die Forschungsinitiative „Bauen der Zukunft – klimagerecht und ressourcenschonend“ (www.bauenderzukunft.org) der RPTU will hierfür einen Grundstein legen. Sie setzt sich aus zwanzig Professorinnen und Professoren der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) sowie weiterer wissenschaftlicher Institute aus Kaiserslautern zusammen und wird vom Land Rheinland-Pfalz gefördert. Sprecher der Forschungsinitiative ist Prof. Dr.-Ing. Christian Glock. Erste Schritte erfol-

gen in ausgewählten Forschungsfeldern. Technologien aus Bauwesen, Architektur, Informatik, Künstliche Intelligenz, Robotik, Maschinenbau und Elektrotechnik werden unter Anwendung mathematischer Methoden in einem einzigartigen interdisziplinären Zusammenschluss von Forschenden weiterentwickelt. Die nötige Expertise ist an der RPTU sowie den beteiligten Instituten Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE) und Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) sowohl methodisch als auch experimentell vorhanden und wird durch die Zusammensetzung der Forschergruppe optimal genutzt. Durch die interdisziplinäre Weiterentwicklung von Bauteilen und Tragwerken mit Fokus auf Graue Emissionen, Ressourcenschonung, Automatisierung, intelligente Baumaschinen und neue Materialien konnten bereits Konzepte für Neubau, Bestand und innovative Bauprozesse entwickelt und Forschungsprojekte erfolgreich initiiert werden.

3 Ziele

Die Forschungsinitiative Bauen der Zukunft ist in den Handlungsfeldern Weiterentwicklung von Bauteilen und Tragwerken, Effizienzsteigerung durch Optimierung von Prozessen und Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Bauwerken aktiv.

Auf dem Weg zur weiteren Treibhausgasreduzierung im Bauwesen kommt dem Baustoff Beton eine herausragende Bedeutung zu, da er die gebaute Umwelt wie kein anderer Baustoff prägt und in sehr großen Mengen genutzt wird [10; 11].

In den letzten Jahren wurden erhebliche Anstrengungen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit von Beton unternommen und ein verstärkter Einsatz von Recyclingprodukten angestrebt [12]. Durch Senkung des Klinkergehaltes im Zement und den Einsatz alternativer Brennstoffe konnte bei der Herstellung von Zement bereits eine beachtliche Reduktion der CO₂-Emissionen um etwa 20 % in den letzten 20 Jahren erreicht werden [11; 13]. Weitere Senkungen sind jedoch nur mit einem ganz erheblichen Aufwand wie der Speicherung von CO₂ zum Beispiel mit der Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)-Technologie möglich [14]. Daher kommt nun insbesondere der Optimierung des Tragwerks eine entscheidende Rolle zu. Zur Optimierung von Entwurf, Tragwerk, Bauteilen und Bauprodukten existieren bereits viele Ansätze, die den Wirkungsebenen Architektur und Entwurf, Bauweise und Tragstruktur, Bauteile sowie Werkstoffe zugeordnet werden können (Bild 3). Bezogen auf den Massivbau ist insbesondere die Optimierung von Stahlbetonbauteilen hinsichtlich eines minimierten Materialverbrauches wichtig [10; 11; 15; 16].

In gleichem Maße wie die technische Weiterentwicklung von Entwurf, Tragwerk, Bauteilen und Werkstoffen beeinflussen die Prozesse die Effizienz und damit die Ressourceneffektivität im Bauwesen. Während im Bauwesen die Arbeitsproduktivität in den letzten 50 Jahren nur geringfügig gesteigert werden konnte, hat sich diese in anderen Industriezweigen mehr als verdreifacht (Bild 4) [17].

Die Diskrepanz der Arbeitsproduktivität lässt sich zumindest teilweise durch fortschreitende Automatisierung und Digitalisierung erklären, die im Bauwesen aber bislang rückständig ist. Wenngleich moderne Werkstoffe, Bauhilfsstoffe, Baugeräte und Maschinen zu einer Steigerung der Arbeitsproduktivität beitragen konnten, bleiben die Lohnkosten der limitierende Faktor. Zur

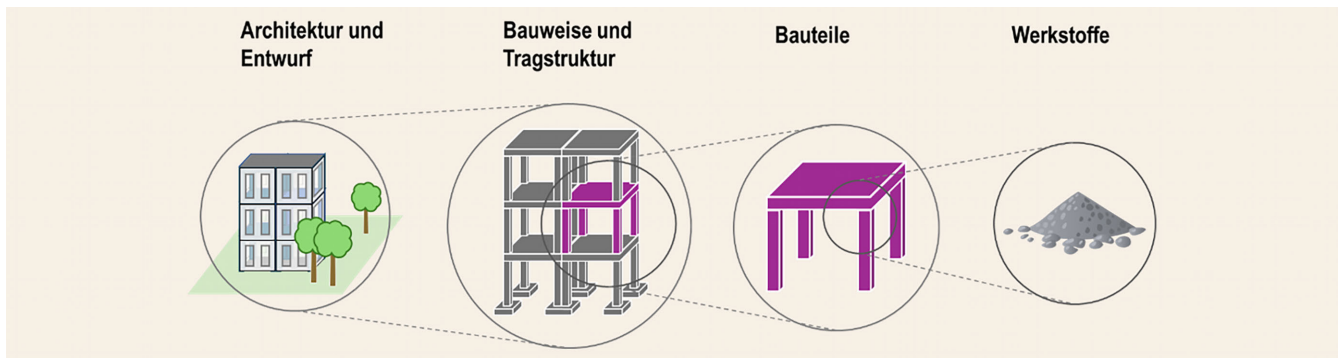


Bild 3. Wirkungsebenen von Optimierungsansätzen. Grafik: eigene Darstellung
Fig. 3. Impact levels of optimization approaches. Source: own representation

Steigerung der Arbeitsproduktivität braucht es daher automatisierungsgerechte Prozesse, den Einsatz digitaler Planungs- und Bauabwicklungsmethoden und den Einsatz von Robotik und autonomen Maschinen.

Beim Bauen der Zukunft muss das Bauwerk und die komplette Lebenszyklusbetrachtung von der Projektidee bis hin zur Nutzungsphase im Mittelpunkt stehen. Hierzu müssen Bauteile und Tragwerke von der Planung über Errichtung, Betrieb und Abriss mit dem Kriterium der größtmöglichen Effizienz und Vermeidung von Verschwendung weiterentwickelt werden und deren Wiederverwendbarkeit bereits bei der Planung berücksichtigt werden. So ist es Ziel der Forschungsinitiative, das gesamte Bauwerk und all seine Einzelkomponenten zu optimieren und auch Verfahren zur hochwertigen Analyse von Bestandsbauwerken [18], Tragwerken und Bauteilen zu entwickeln. Dabei sollen die Nutzungsdauern verlängert, Sanierungsmaßnahmen optimiert und die vermehrte Wiederverwendung von Bauteilen in Kreisläufen ermöglicht werden.

4 Forschungsaktivitäten und Lösungsansätze

4.1 CO₂-Reduktion und Ressourceneffizienz bei Planung, Herstellung und Rückbau von Bauwerken

In den kommenden Jahren braucht es große Anstrengungen zur Reduktion der CO₂-Emissionen im gesamten Lebenszyklus von Bauwerken, daher kommt dem Erhalt und der Nutzung von bestehenden baulichen Strukturen eine wesentliche Bedeutung zu. Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgedankens sollte folgende Priorisierung Grundlage zukünftiger Entscheidungen werden:

1. Reuse, das heißt die Weiternutzung von Bestandsbauwerken
2. Rebuild, das heißt der Umbau und die Wiederverwendung ganzer Bauteile
3. Recycle, das heißt die Wiederverwendung des Bestandes in Form rezyklierter Baustoffe

Für die Maßnahmen Reuse und Rebuild ist es notwendig, das Bauwerk zu erfassen und die Potenziale zur Weiternutzung und Wiederverwendung von Bauteilen mittels Building Information Modeling (BIM) in einem digitalen Zwilling verfügbar zu machen. Hierfür ist eine digitale Bestandserfassung zur Generierung dreidimensionaler Punktwolken in Verbindung mit KI-basierten Methoden zur automatisierten Erzeugung von BIM-Bestandsmodellen erforderlich [19 bis 22; 18].

Mit Blick auf das hohe Potenzial für den Ansatz von Rebuild gibt es aktuell eine Vielzahl an Anwendung und Forschung zur

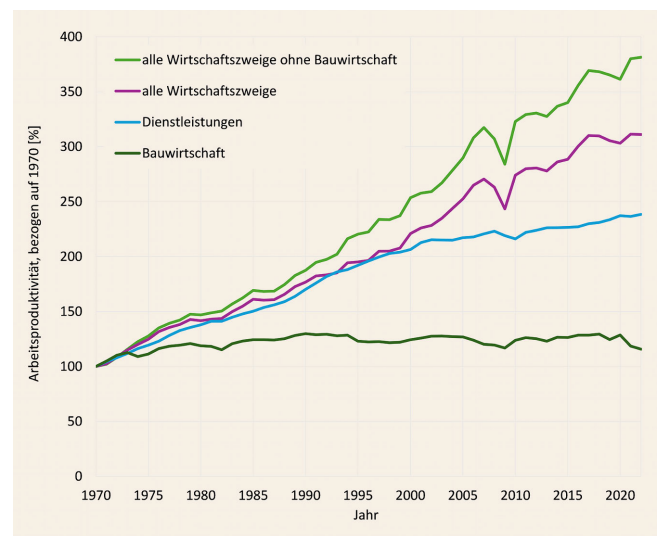


Bild 4. Vergleich der Arbeitsproduktivität in der Bauwirtschaft mit anderen Branchen. Grafik: [17]
Fig. 4. Comparison of labor productivity in the construction industry with other sectors. Source: [17]

Wiederverwendung ganzer Bauteile, zum Beispiel die Untersuchungen zur Wiederverwendung von Holz-Beton-Verbunddecken [23]. In einem Forschungsvorhaben an der RPTU [24] konnte gezeigt werden, dass der Ausbau von Spannbetonhohldielen mit moderatem Aufwand möglich ist und die Tragfähigkeit solcher bereits eingesetzten Deckenbauteile auch in der Zweitnutzung noch hohen Anforderungen entsprechen kann. **Bild 5** zeigt links den Rückbau einer Spannbetonhohldiele aus einem Deckenfeld mittels Mobilkran und rechts den Vergleich von rückgebauten (I-VII) mit neuen unbenutzten Spannbetonhohldielen (N1-N3) anhand des Last-Verformungs-Diagramms [22].

Im vergangenen Jahr veröffentlichte der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb) eine neue Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ [20], die in [25] vorgestellt wird. Ziel der Richtlinie ist es, spezifische Anforderungen und Maßnahmen zu definieren, mittels derer die Einhaltung der international und national vorgegebenen Treibhausgasreduktionsziele bei der Errichtung und Entsorgung von Tragwerken aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton sichergestellt wird. Aufgrund der besonderen Bedeutung von Deckenbauteilen und im Sinne einer praxistauglichen Anwendung, werden diese in einem Richtlinienenteil gesondert betrachtet. Im Rahmen

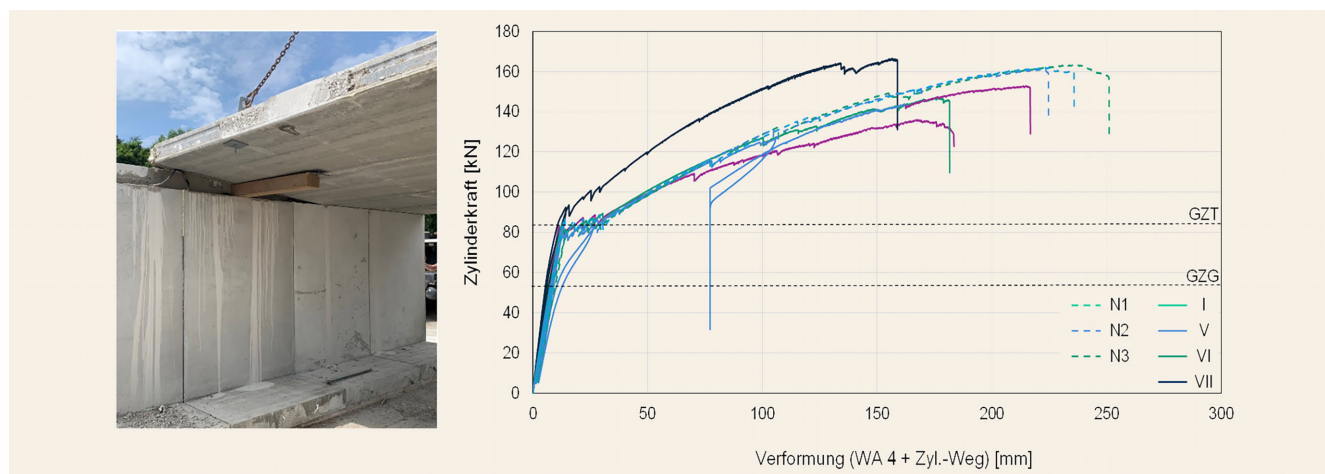


Bild 5. Rückbau einer Decke aus Spannbetonhohldielen und Last-Verformungs-Diagramm der rückgebauten (I-VII) und neuen Spannbetonhohldielen (N1-N3). Grafik: [24]

Fig. 5. Deconstruction of prestressed hollow core slabs, load-deformation diagram of deconstructed (I-VII) and unused slabs (N1-N3). Source: [24]

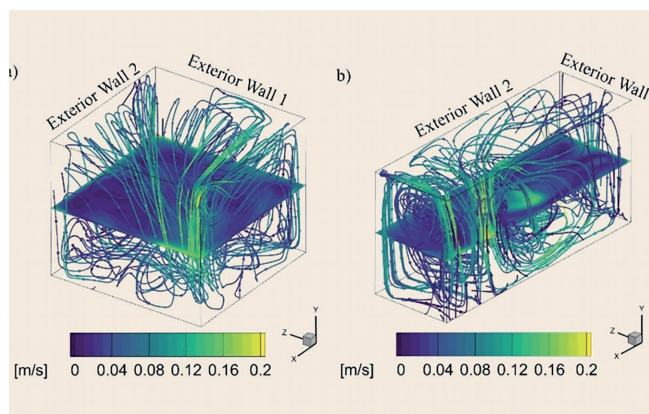


Bild 6. Strömungsfeld in Räumen unterschiedlicher Geometrien bei gleichbleibendem Volumen, mit Fußbodenheizung. Grafik: [31]

Fig. 6. Flow field in rooms of different geometries with constant volume, with underfloor heating. Source: [31]

der Forschungsinitiative wurden vielfältige Untersuchungen zum Status quo und dem Potenzial von Deckensystemen durchgeführt [15; 26].

4.2 Reduktion von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Betrieb

Die bisherigen Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudebetrieb stellen eine beachtliche Erfolgsstory für das Bauwesen dar. In den letzten 50 Jahren wurde der Primärenergiebedarf für Neubauten von circa 250 auf etwa 40 kWh/m²a gesenkt – rund ein Sechstel des ursprünglichen Werts [27]. Im Branchenvergleich ist dies eine herausragende Entwicklung.

Neben dem Energiebedarf zum Beheizen der Gebäude gewinnt vor dem Hintergrund des Klimawandels der sommerliche Wärmeschutz zunehmend an Bedeutung. Dafür sind ganzheitliche Energiekonzepte gefragt, die Energieerzeugung aus regenerativen Quellen und Energiespeicherung auf verschiedenen Temperaturniveaus kombinieren. Innovative Systeme nutzen zunehmend

Phasenwechselmaterialien zur Speicherung von Energie auf verschiedenen Temperaturniveaus sowie Peltier-Elemente zur Anpassung der Temperatur [28; 29].

Ein energieeffizienter Betrieb erfordert darüber hinaus die Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen. Studien zeigen, dass abweichendes Lüftungsverhalten gegenüber normativen Annahmen zu Differenzen im Nutzwärmeenergiebedarf von über 20 % führen kann – trotz gleichem Gesamttagesluftwechsel [30].

Um den Energieverbrauch zum Beispiel nach Sanierungen präzise vorhersagen zu können, sind detaillierte Kenntnisse der wärmetechnischen Prozesse in Innenräumen nötig. Derzeit wird hierzu der Wärmeübergang von der Raumluft auf raumseitige Außenwandoberflächen untersucht. Dazu sind Strahlungs- und Konvektionsprozesse zu betrachten. **Bild 6** zeigt exemplarisch, wie sich unterschiedliche Raumgeometrien auf das Strömungsfeld bei Fußbodenheizung auswirken [31]. Auch Künstliche Intelligenz (KI) kann zur Betriebsoptimierung beitragen. In einem aktuellen Projekt wird der Einsatz KI-basierter Methoden für schnelle, praxisnahe Vorhersagen des sommerlichen Wärmeschutzes erforscht [32]. Durch die Verwendung von Zukunftsklimadaten, die Prognosen für 2045 auf km²-Basis liefern [33], lässt sich schon heute das Verhalten von Neubauten und sanierten Gebäuden unter künftigen Klimabedingungen analysieren.

Zentrale Elemente bei der Entwicklung moderner, hoch effizienter Energieversorgungssysteme sind Steuerungs- und Regelungssysteme. Modellprädiktive Regelungen in Kombination mit KI-basierten Lern- und Prognoseverfahren steigern Energieeffizienz und Komfort nachweislich [34 bis 36].

Im Fokus der Forschungsinitiative steht die weitergehende Erforschung und Entwicklung innovativer Energieerzeugungs- und -speichersysteme und KI-gesteuerter Gesamtgebäudesysteme unter Berücksichtigung individueller Nutzerbedürfnisse und zukünftigen Klimabedingungen, um weitere Reduktionen des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen im Gebäudebetrieb zu erreichen und für die Standzeit der Gebäude zu gewährleisten.

4.3 Hybride Bauteile und Fügetechniken

Durch hybride Bauteile und fortschrittliche Fügetechnik können spezifische Eigenschaften der jeweiligen Baustoffe vorteilhaft

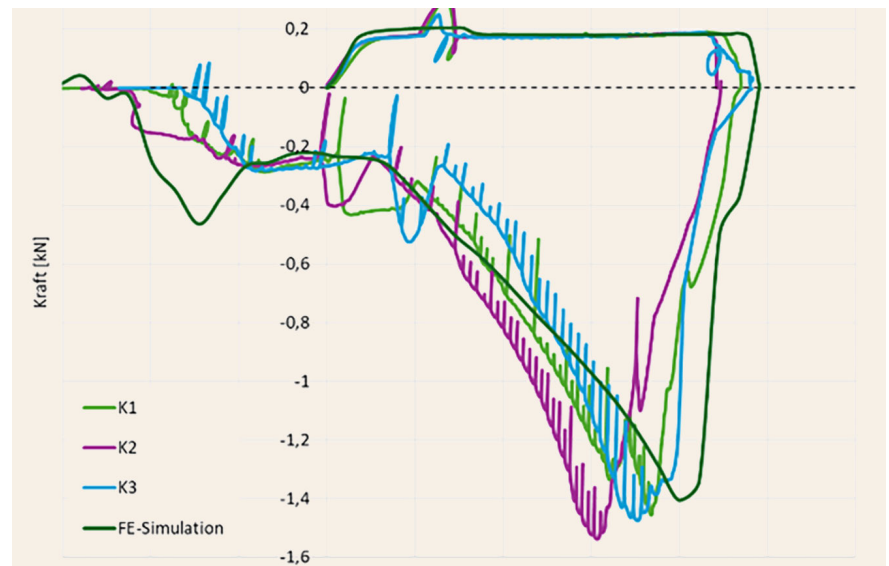
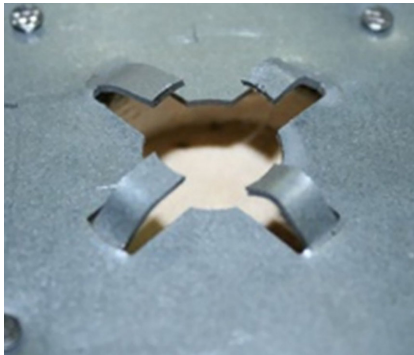


Bild 7. Prinzip der Schnappverbindung mit Detail eines miniaturisierten Versuchskörpers und Last-Verformungskurve im Zugversuch. Grafik: [39]
 Fig. 7. Principle of the snap connection with detail of a miniaturized test specimen and load-deformation curve in the tensile test. Source: [39]

genutzt werden, um ressourcensparende und CO₂-emissionreduzierte Bauweisen zu realisieren.

Aktuell wird an neuen Verbundkonstruktionen für Holz-Beton-Verbunddecken geforscht, um die Wiederverwendbarkeit der Bauteile zu erhöhen [37]. Ziel ist es, eine Schubfuge zwischen der Betonplatte und dem Holzbalken zu entwickeln, welche das trockene, reversible und wiederholte Fügen von Stahlbetonplatten- und Brettspertholz-Trägerquerschnitten erlaubt. In Rahmen eines weiteren Projektes wurde ein Holz-Beton-Verbund-Wandsystem entwickelt, bei dem der Holzkörper erstmals ausreichende Tragfähigkeit für die Lastabtragung im Gebäudekern von Geschossbauten besitzt [38]. Dank spezieller Anordnung und Geometrie der Betonauflage bleibt die Tragwirkung auch im Brandfall erhalten.

Forschungen zur Fügetechnik stellen einen weiteren Schwerpunkt des Bauens der Zukunft dar. Herkömmliche Vergussfugen erfordern meist aufwendige manuelle und langwierige Arbeiten, zum Beispiel durch den Einbau von Befestigungsmitteln, Bewehrung und Schalung, und bedingen temporäre Abstützungen sowie das Risiko signifikanter Montagetoleranzen. Neuartige Fügetechniken, die eine weitgehend mechanisierte und automatisierte Montage vor Ort ermöglichen, bieten hier wesentliche Vorteile. Ein vielversprechender Ansatz ist die aktuelle Entwicklung einer Einschnapp-Verbindung, die Prinzipien aus dem Maschinenbau und der Textiltechnik ins Bauwesen überträgt. Dabei greift ein Bolzen mit Hinterschnitt in ein austauschbares Fügeblech ein und überträgt Zug- und Schubkräfte ähnlich einer Schraubverbindung. Die Verbindung ist bei Überschreiten der Zugkraft lösbar und nach Austausch des Fügeblechs wiederverwendbar (Bild 7, links). Zugversuche der Versuchsreihen K1-K3 zeigen eine gute Übereinstimmung mit FE-Simulationen (Bild 7, rechts) [39].

Die Weiterentwicklung des Bauens der Zukunft macht es erforderlich, die Konzepte für Bauteile und Fügetechniken grundlegend zu überdenken. Dabei wird, neben der einfachen, systematischen und damit auch automatisierbaren Fertigung und Fügung in Sinne einer Kreislaufwirtschaft, die Lösbarkeit bei Forschungsarbeiten einen wesentlichen Schwerpunkt einnehmen.

4.4 KI-basierte Planung

Das konventionelle Entwerfen von Architektur folgt einer lehr- und lernbaren Methodik, auf welcher die tragwerksplanerische Umsetzung des Entwurfes aufbauend erfolgt. Überlegungen zu Raumprogramm, Funktion, Kosten, Regularien, Statik, Technik und Bauphysik flankieren das Entwerfen und Planen von Gebäuden. Nach wie vor transportieren Bild und Plan die Idee einer Architektur als zweidimensionale Abstraktion.

Wenn bislang das individuell verfügbare Wissen und die fachliche Expertise Bedingung guten Entwerfens waren, dann wäre ein entsprechend trainierter KI-Agent allen herkömmlich geschulten Architektinnen und Architekten weit überlegen. Vor allem ließe sich auf eine größere formalisierte und objektive Wissensbasis zurückgreifen. Entwerfen hieße künftig, die maschinengenerierten Bilder so lange zu korrigieren, bis sie der Aufgabe entsprechen. Parallel oder nachlaufend sind die generierten Bilder in topologisch korrekte, baubare Geometrien zu überführen. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei auch die Implementierung der tragwerksplanerischen Grundlagen in den Prozess des Entwerfens, da eine effiziente Statik in Verbindung mit optimierten Bauteilen und Baustoffen wesentlich für funktionierende und ressourcensparende Bauwerke ist.

Im Folgenden soll dargestellt werden, auf Grundlage welcher Technologien eine KI-basierte Planung umgesetzt werden kann. Auf der Transformer Architektur [40] basierende große Sprachmodelle [41] haben die Möglichkeiten Generativer KI zur Sprachverarbeitung und -erzeugung wesentlich erweitert. Das grundlegende Konzept, per Prompt ein bestimmtes Ergebnis vom Modell anzufordern, welches dann generiert wird, hat sich für Nutzer dabei als sehr einfach erwiesen und damit Generative KI einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Allerdings ist die Erzeugung von Texten nur ein kleiner Teil der Architekturarbeit. Vielmehr geht es um visuelle Kommunikation mit Plänen, Ansichten, Renderings und zunehmend auch 3D-Modellen. Obwohl generative Modelle zur Erzeugung von Bildern [42; 43] und begrenzt auch 3D-CAD-Daten [44; 45] bereits entwickelt werden, fehlt jedoch eine entscheidende Kompo-

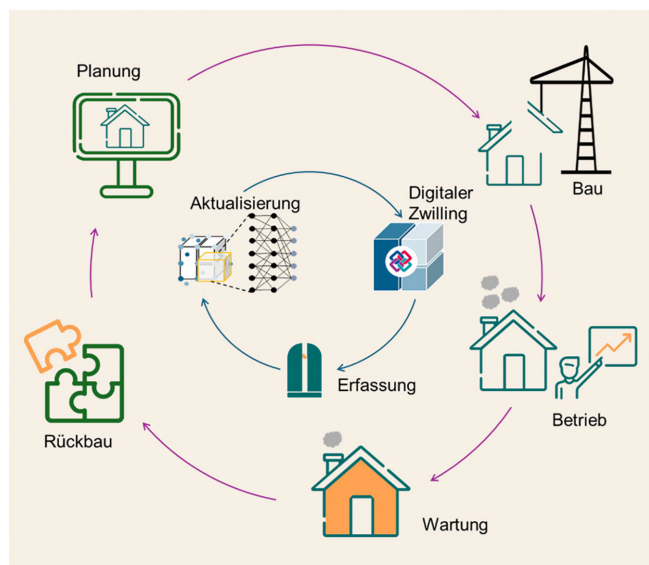


Bild 8. Fortlaufende Aktualisierung des digitalen Zwillings zur Unterstützung von Planung, Bau, Betrieb, Wartung/Sanierung und Rückbau von Gebäuden. Grafik: eigene Darstellung
 Fig. 8. Continuous updating of the digital twin to support the planning, construction, operation, maintenance/refurbishment and dismantling of buildings. Source: own representation

nente, nämlich die Erzeugung von ansprechenden Bildansichten des zu planenden Gebäudes mit kongruenten 3D-Modellen, die dann für die weitere technische Bearbeitung genutzt werden können. Ein solches generatives Text-zu-Bild-zu-3D-Modell hätte das Potenzial, die bisherige Arbeitsweise im Gebäudeentwurf zu invertieren. Während bisher basierend aus technischen 3D-Modellen Renderings erzeugt werden, mit denen die Abstimmung mit den Projektbeteiligten erfolgt, können im neuen Prozess direkt per Prompt Ansichten und 3D-Modelle erzeugt werden, die zugleich als visuelles Kommunikationsmittel und zur technischen Bearbeitung genutzt werden können. Die Erforschung solcher Modelle soll im Rahmen der Forschungsinitiative vorangetrieben werden.

4.5 Digitaler Zwilling und Smart Construction & Building

Digitale Zwillinge bilden die Grundlage, dass digitale Planungs-, Bau- und Betriebsprozesse sowie mathematische Algo-

rithmen zur Optimierung, Umsetzung und Überwachung der späteren Struktureigenschaften, Betriebszustände und Nutzungsänderungen angewendet werden können (**Bild 8**). Unter einem digitalen Zwilling versteht man in Abgrenzung zu einem BIM Modell eine dynamische, verknüpfte Repräsentation des physischen Bauwerks durch semantische Modelle [46], die zudem ständig aktualisiert wird.

In der Forschungsinitiative wird an der Schnittstelle zu Computer Vision an Verfahren geforscht, mit denen digitale Zwillinge schnell und einfach aus zuvor aufgenommenen Daten erzeugt und aktualisiert werden können. Hervorzuheben ist eine Arbeit, in der Daten von einer experimentellen 360° RGB-D (Tiefen-)Kamera [47] ausgewertet wurden, ebenso aber auch eine Arbeit zur Bestimmung der Lage von Objekten im Raum basierend auf einfachen Kamerabildern [48]. Ziel ist es hierbei, Daten von unterschiedlichen Sensoren mittels KI-Verfahren auszuwerten und die gewonnen Informationen in den digitalen Zwilling einzupflegen. Die so erzeugten beziehungsweise aktualisierten digitalen Zwillinge haben das Potenzial, ein ganzheitliches Monitoring zur Sicherstellung von Standsicherheit und Dauerhaftigkeit umzusetzen [49].

In der Ausführungsphase zielt „Smart Construction“ auf die effizienz- und qualitätssteigernde Verknüpfung der Planungs- und Ausführungsdaten. Ein Teilbereich, der in der Forschungsinitiative bearbeitet wird, ist die automatisierte Baufortschritterfassung mittels Drohnenaufnahmen [50; 51]. Durch die Übergabe des digitalen Zwillings in die Betriebsphase kann eine vorausschauende Optimierung der Betriebszustände umgesetzt werden, zum Beispiel durch eine genauere Vorhersage des tatsächlichen Endenergieverbrauches [52].

Mit Blick auf die Verbesserung der Produktivität der Bauwirtschaft wurde ein Projekt [53] initiiert, in welchem eine digitale Plattform entwickelt wurde, welche alle Baubeteiligten mit ihren Systemen, Daten und Prozessen in der Bauausführungsphase digital abbildet und miteinander zu einem Digitalen Ökosystem vernetzt. Durch die Plattform ergeben sich in erster Linie Vorteile im Hinblick auf einen nutzerspezifischen Informationsaustausch sowie ein verbessertes Monitoring und Controlling des Baufortschritts. Bei auftretenden Abweichungen können Entscheidungshilfen bereitgestellt und entsprechende Maßnahmen ergriffen werden [54]. In einem Folgeprojekt [55] wurden die entwickelten Funktionalitäten und Werkzeuge gemeinsam mit Akteuren der Bauwirtschaft an einer realen Baustelle evaluiert.

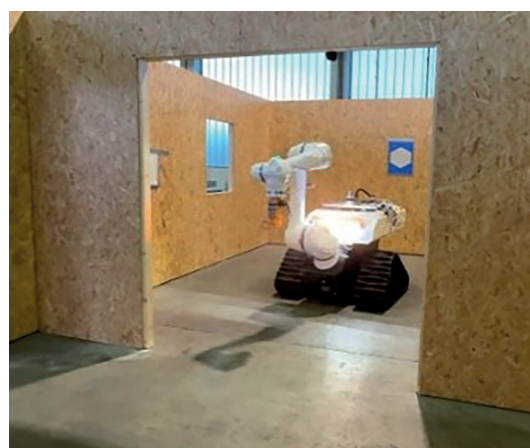
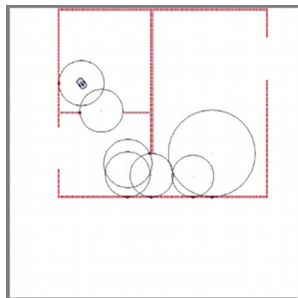
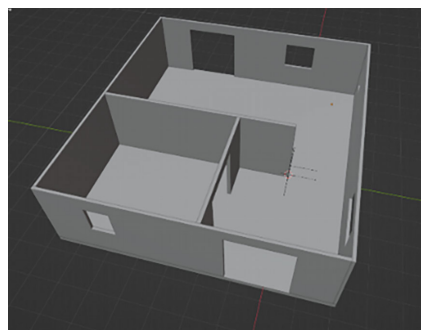


Bild 9. Digitales Modell der Testumgebung (links), abgeleiteter 2D Grundriss für die Navigation (Mitte), Robotersystem in der Testumgebung (rechts). Grafik: [59]
 Fig. 9. Digital model of the test environment (left), derived 2D floor plan for navigation (center), robot system in the test environment (right). Source: [59]

Basierend auf den Vorarbeiten soll in der Forschungsinitiative verstärkt interdisziplinär an der Auswertung von Daten unterschiedlicher Sensoren geforscht werden. Mit diesen Technologien können umfassende digitale Zwillinge erzeugt und aktualisiert werden, die den gesamten Bauwerkslebenszyklus unterstützen.

4.6 Automatisierung und Digitalisierung im Bauprozess

Die Automatisierung und Digitalisierung im Bauprozess wird in Zukunft massiv an Bedeutung gewinnen, um Effizienzsteigerungen bei gleichzeitiger Einsparung von Personal zu realisieren.

In der Entwicklung werden Digitale Zwillinge der Baustelle genutzt, die eine umfängliche Automatisierung mit einer realistischen Simulation von Baumaschinen, Ablaufsteuerung, Umfeld Erkennung und Interaktion einzelner Maschinen ermöglichen [56]. Hierzu muss die Dynamik und Kinematik der Baumaschine, die installierte Sensorik, die verwendete Lokalisation und das Prozesswissen exakt modelliert werden.

In den letzten Jahren wurden im Rahmen von Forschungsprojekten Systemlösungen aufgebaut wie autonome Baustellentransportsysteme, Bagger, Planiermaschinen, Bohrroboter, Inspektionssysteme innerhalb und außerhalb von Gebäuden sowie Bauroboter für das Setzen von Paneelen, Mauern, Fliesen oder dem Drucken von Häusern. So wurde beispielsweise ein Baggerlader von John Deere so erweitert, dass ein autonomes Ausheben einer L-förmigen Baugrube selbstständig durchgeführt wurde [57]. Ein autonom operierender Unimog ist in der Lage, selbstständig zwischen beliebigen Plätzen einer Baustelle kollisionsfrei zu navigieren [58].

Im Rahmen des von der EU geförderten Projektes „Human-Tech“ [59] forschen mehrere Gruppen der Forschungsinitiative an der prototypischen Entwicklung eines Roboters, der Aufgaben beim Gebäuderückbau selbstständig bewerkstelligen kann. Ein BIM-Modell dient sowohl als Grundlage für die Navigation des Roboters als auch für die Aufgabenplanung. Anhand des BIM-Modells und der kontinuierlichen Vermessung der Umwelt mittels LiDAR Sensoren wird die exakte Position des Roboters in seiner Einsatzumgebung bestimmt und für die Navigation oder die Durchführung des Schneidvorgangs genutzt. In **Bild 9**, links ist die Visualisierung des 3D BIM-Modells dargestellt, in der Mitte ist die hieraus abgeleitete 2D Repräsentation zu sehen, die für die Pfadplanung verwendet wird. Rechts wird der Testroboter in Testumgebung gezeigt.

Um Anwendungsbereiche erweitern zu können, müssen innovative Methoden vor allem zur exakten Lokalisation und Gebäudevermessung mit mobilen Systemen unter Verwendung kostengünstiger Sensoren [60], sich selbst adaptierende Steuerungssysteme, neue mechatronische Konzepte für den Aufbau von mobilen Handhabungssystemen sowie sichere Interaktionssysteme zwischen Personen und Arbeitsmaschinen entwickelt werden.

4.7 Innovative Prüf- und Messverfahren: Großtomografie

Zahlreiche Beiträge aus der Literatur thematisieren Beispiele für den Einsatz der Computertomografie mit Kleintomografen an verschiedenen Baumaterialien, zum Beispiel bei Holz zur Quantifizierung von Schädigungen [61]; Beton, zur Untersuchung des Schwindverhaltens [62], Rissheilung [63] und Luftporenverteilung [64]; Stahlbeton, zur Detektion von Korrosionsschäden am Bewehrungsstahl [65] und vielem mehr.



Bild 10. Tomografie Portal „Gulliver“. Foto: eigene Darstellung
Fig. 10. Tomography portal 'Gulliver'. Source: own representation

Die Computertomographie bietet zudem die Möglichkeit, den Einfluss von Beanspruchungen zu untersuchen. Hierfür gibt es zwei unterschiedliche Ansätze: Ex-situ-CT-Untersuchungen, bei denen die Probe im Originalzustand gescannt, außerhalb des Tomografen belastet und danach erneut im CT untersucht wird [61; 65], und In-situ-CT-Untersuchungen, bei denen die Probe während der Belastung im CT analysiert wird [66 bis 69]. Für die zitierten Untersuchungen ist festzuhalten, dass die Probekörpergrößen durch Anlagengröße und Röntgenenergieniveau der verwendeten Tomografen in ihrer Geometrie begrenzt sind und selten Abmessungen von 10 cm in Höhe oder Breite überschreiten. Das macht eine wirklichkeitsnahe Untersuchung von (Verbund-)Werkstoffen, deren Abmessungen nicht beliebig verkleinert werden können, unmöglich.

Für Untersuchungen auf real-maßstäblicher Skala entsteht auf dem Campus Kaiserslautern der RPTU das Tomografieportal „Gulliver“, welches weltweit erstmalig Untersuchungen an Bauteilen mit wirklichkeitsnahen Abmessungen ermöglicht (**Bild 10**).

Das Tomografieportal besteht aus drei Komponenten, dem Belastungsprüfstand, der Bildgebung und der Gantry. Der Belastungsprüfstand ermöglicht sowohl statische (bis 600 kN Druck und 300 kN Zug) als auch dynamische (bis 300 kN Druck und 300 kN Zug) Belastungen in Quer- und Längsrichtung des Probekörpers. Die maximal zulässigen Abmessungen der Probekörper betragen 6 000 mm (Länge) × 1 000 mm (max. Breite bei 300 mm Höhe) × 700 mm (max. Höhe bei 300 mm Breite). Die Bildgebung beinhaltet einen Linearbeschleuniger und drei Detektoren. Der Linearbeschleuniger liefert eine Röntgenenergie von bis zu 9 MeV.

Voruntersuchungen, bei denen Carbonbetonproben mit Querschnitten von bis zu 80 × 160 mm² tomografiert wurden, zeigen die neuen Möglichkeiten für In-situ-CT-Untersuchungen auf [70; 71]. Die Erfassung der Carbonbewehrung im Betonbauteil ermöglicht die Untersuchung des Einflusses des Betonageprozesses auf deren Lagesicherheit und kann Grundlage für eine Qualitätskontrolle bei automatisierten Herstellprozessen sein (**Bild 11**) [71].

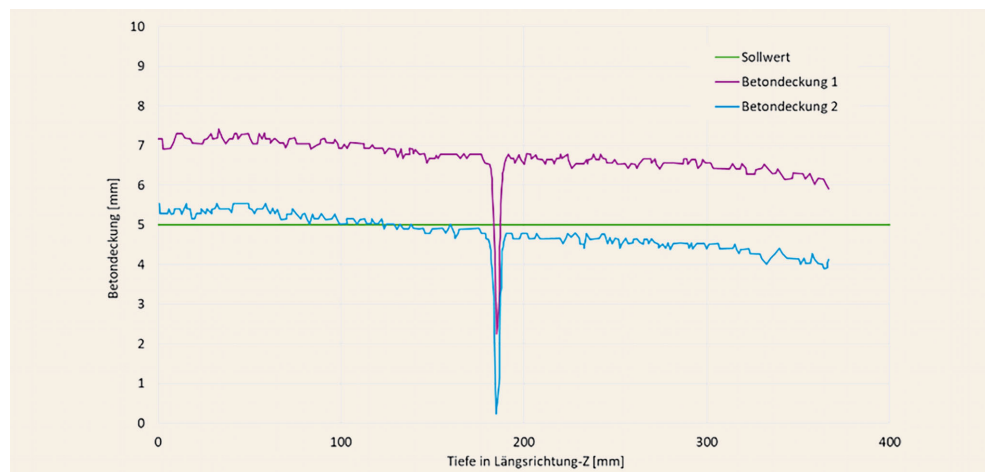
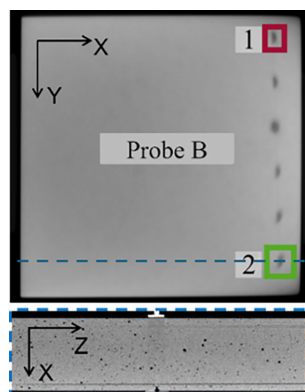


Bild 11. Qualitätskontrolle mittels CT: Dicke der Betondeckung entlang der Bewehrung. Grafik: [71]
Fig. 11. Quality control using CT: thickness of the concrete cover along the reinforcement. Source: [71]

5 Resümee

Das Bauen bildet eine essenzielle Grundlage für die Erfüllung sowohl grundlegender als auch komplexer Bedürfnisse. Es schafft Wohnraum, Infrastruktur und industrielle Anlagen und bildet die Basis des Wirtschaftslebens. Ohne das Bauwesen wären moderne Gesellschaften nicht denkbar. Gleichzeitig sieht sich das Bauwesen mit erheblichen Herausforderungen in Bezug auf Umweltbelastungen konfrontiert. Die Bauwirtschaft ist einer der größten Verbraucher natürlicher Ressourcen. Der hohe Materialeinsatz führt zu erheblichen Umweltbelastungen. Zudem ist die Branche für einen erheblichen Anteil des Abfallaufkommens und der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich. Auch weist die Bauwirtschaft im Vergleich zu anderen Industriezweigen eine minimale Produktivitätssteigerung auf.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist interdisziplinäre Forschung nötig. Die Forschungsinitiative des Landes Rheinland-Pfalz verfolgt mehrere vielversprechende Projekte. So wird etwa die Wiederverwendung ganzer Bauteile wie Spannbetonhohldielen untersucht. Weitere Projekte setzen auf die Nutzung von Umweltenergie in Kombination mit Wärmespeichern auf verschiedenen Temperaturniveaus und Phasenwechselmaterialien zur CO₂-Reduktion des Gebäudebetriebs. KI-basierte Planungsansätze zeigen, wie Bauwerke effizienter und nachhaltiger gestaltet werden können. Optimierte Bauprozesse, reduzierte Materialverbräuche und verbesserte Energieeffizienz sind zentrale Ergebnisse des KI-Einsatzes. Ebenso bieten Digitalisierung und Automatisierung große Potenziale: Robotik kann Abläufe beschleunigen, Fehler reduzieren und Ressourcen sparen. Digitale Zwillinge helfen, Bauwerke präzise zu simulieren und Planungsfehler früh zu erkennen. Building Information Modeling (BIM) fördert dabei die interdisziplinäre Zusammenarbeit und nachhaltige Planung. Auch hybride Baustoffe und innovative Fügeverfahren ermöglichen ressourcenschonendes Bauen. Flexible Verbindungen erleichtern den Rückbau und verringern Reststoffe. Ergänzend dazu leisten moderne Prüfverfahren einen entscheidenden Beitrag: Der Großtomograf „Gulliver“ an der RPTU erlaubt hochpräzise Einblicke in Bauteile. Beispiele weiterer Forschungslücken wurden in Kap. 4 aufgezeigt.

Durch die Kombination verschiedener Fachdisziplinen und innovativer Technologien besitzt die vorgestellte Forschungsinitiati-

ve das Potenzial, umweltverträgliche, technisch fortschrittliche und wirtschaftlich tragfähige Lösungen zu erforschen.

DANKSAGUNG

Die Forschungsinitiative wird gefördert durch das Land Rheinland-Pfalz, die beschriebenen Forschungsprojekte werden durch folgende Fördermittelgeber unterstützt: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Deutsche Forschungsgemeinschaft, EU Horizon, Europäische Territoriale Zusammenarbeit sowie zahlreiche Fördermittelgeber aus der Wirtschaft. Wir danken allen Unterstützern.

LITERATUR

- [1] Wikipedia-Autoren, s.V.: Landwasserviadukt, 2024, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Landwasserviadukt&oldid=250152265> [Zugriff am: 06.06.2025].
- [2] GetYourGuide: Von Como aus: St. Moritz und Tirano Reise mit Bernina Express | GetYourGuide, 2025, www.getyourguide.de/como-l101235/von-como-aus-st-moritz-und-tirano-reise-mit-bernina-express-t198298/ [Zugriff am: 06.06.2025].
- [3] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland – Rohstoffsituation 2022. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. Ausgabe Dezember 2023.
- [4] Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien: Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie: Zement. Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Ausgabe April 2022.
- [5] Glock, C.; Heckmann, M.; Hondl, T. et al.: Massivbau in Zeiten von Klimawandel und Ressourcenverknappung – Herausforderungen und Lösungsansätze/Concrete construction in times of climate change and resource shortage – challenges and solutions. In: Bauingenieur 97 (2022), Heft 01-02, S. 1-12. doi.org/10.37544/0005-6650-2022-01-02-33.
- [6] Statistisches Bundesamt: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren 2021. Statistisches Bundesamt, 2024, www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/_Grafik/_Interaktiv/energieverbrauch-deutschland-sektoren.html [Zugriff am: 22.04.2024].

- [7] Schöndube, T.; Beecken, C.; Becker, S. et al.: Primärenergiebedarf resultierend aus Herstellungs-, Nutzungs- und Instandhaltungsphase von Gebäuden in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard. *Bau-physiktag 2019 in Weimar*. Ausgabe 2019.
- [8] Schöndube, T.; Beecken, C.; Becker, S. et al.: Weiterentwicklung der Energieeinsparverordnung. *In: Bauphysik 42* (2020), Heft 2, S. 51-61. doi.org/10.1002/bapi.202000003.
- [9] Statistisches Bundesamt: Statistischer Bericht – Abfallbilanz. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. Ausgabe 2023.
- [10] Glock, C.; Haist, M.; Bergmeister, K. et al.: Klima- und ressourcenschonendes Bauen mit Beton. *In: 2024 BetonKalender*, 177-265. doi.org/10.1002/9783433611494.ch2.
- [11] Glock, C.; Dernbach, A.; Heckmann, M. et al.: Treibhausgas- und ressourcenreduzierter (Beton-)Bau – Herausforderungen, Lösungsansätze, Anreizsysteme. *In: DBV-Heft 50* (2023), Heft 1, 27-65. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11.
- [12] Hegger, J.; Glock, C.; Curbach, M. et al.: Innovativer Betonbau – Tradition und Zukunft. *In: Bauingenieur 100* (2025), 7-8. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.
- [13] Schack, T.; Haist, M.: Betone mit ternären klinkereffizienten Zementen. *In: Beton- und Stahlbetonbau 120* (2025), Heft 1, S. 2-11. doi.org/10.1002/best.202400082.
- [14] VDZ: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. – Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Ausgabe 2020.
- [15] Heckmann, M.; Glock, C.: Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. *In: Beton- und Stahlbetonbau 118* (2023), Heft 2, S. 110-123. doi.org/10.1002/best.202200102.
- [16] Sobek, W.; Sawodny, O.; Bischoff, M. et al.: Adaptive Hüllen und Strukturen. *In: Bautechnik 98* (2021), Heft 3, S. 208-221. doi.org/10.1002/bate.202000107.
- [17] Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Inlandsproduktberechnung – Lange Reihen ab 1970. Fachserie 18, Reihe 1.5, 2022, www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-lange-reihen-pdf-2180150.html [Zugriff am: 17.01.2025].
- [18] Kaufmann, F.; Glock, C.; Tschickardt, T.: ScaleBIM: Introducing a scalable modular framework to transfer point clouds into semantically rich building information models. *In: Proceedings of the 2022 European Conference on Computing in Construction, Computing in Construction*. University of Turin, 2022.
- [19] Schönfelder, P.; Aziz, A.; Faltin, B. et al.: Automating the retrospective generation of As-is BIM models using machine learning. *In: Automation in Construction 152* (2023), S. 104937. doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104937.
- [20] DAfStb-Richtlinie – Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton – Teil 1: Grundlagen und Nachweis am gesamten Tragwerk; Teil 2: Deckenbauteile. Ausgabe August 2024.
- [21] Tang, S.; Li, X.; Zheng, X. et al.: BIM generation from 3D point clouds by combining 3D deep learning and improved morphological approach. *In: Automation in Construction 141* (2022), S. 104422. doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104422.
- [22] Bassier, M.; Vergauwen, M.: Topology Reconstruction of BIM Wall Objects from Point Cloud Data. *In: Remote Sensing 12* (2020), Heft 11, S. 1800. doi.org/10.3390/rs12111800.
- [23] Praxispremiere für zerlegbare Holz-Beton-Verbunddecken – Brüninghoff setzt erstmals trennbare HBV-Deckenelemente bei Neubau ein, 2025, www.deutsches-ingenieurblatt.de/news/newsdetail/praxispremiere-fuer-zerlegbare-holz-beton-verbunddecken [Zugriff am: 10.02.2025].
- [24] Heckmann, M.; Dernbach, A.; Müller, R. et al.: Experimentelle Untersuchungen zu Rückbau und Wiederverwendung von Spannbetonhohldecken. *In: Beton- und Stahlbetonbau 119* (2024), Heft 6, S. 410-419. doi.org/10.1002/best.202400001.
- [25] Glock, C.; Haist, M.; Wiens, U. et al.: „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ – die neue DAfStb-Richtlinie/„Greenhouse gas-reduced concrete, reinforced concrete or prestressed concrete structures“ – the new DAfStb guideline. *In: Bauingenieur 99* (2024), Heft 11, S. 339-347. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-25.
- [26] Heckmann, M.; Glock, C.: Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb-Richtlinie. *In: Beton- und Stahlbetonbau 120* (2025), Heft 1, S. 22-32. doi.org/10.1002/best.202400076.
- [27] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Wege zum Effizienzhaus Plus – Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin. Ausgabe November 2018.
- [28] Krohn, J.; Carrigan, S.; Friedrich, T. et al.: Implementierung neuartiger PCM-Speicher in TRNSYS zur Deckung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs. *In: BauSim Conference, BauSim Conference Proceedings*. IBPSA-Germany and Austria, 2022.
- [29] Schröter, B.; Spiegel, J.; Carrigan, S. et al.: Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems. *In: Bauphysik 45* (2023), Heft 5, S. 245-251. doi.org/10.1002/bapi.202300014.
- [30] Hartner, M.; Carrigan, S.; Kornadt, O. et al.: Normatives vs. realistisches Lüftungsverhalten. *In: Bauphysik 43* (2021), Heft 3, S. 148-153. doi.org/10.1002/bapi.202100010.
- [31] Peng, Z.; Carrigan, S.; Kornadt, O.: Investigation of the influence of different room geometries and wall thermal transmittances on the heat transfer in rooms with floor heating. *In: Energy and Buildings 317* (2024), S. 114391. doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114391.
- [32] RPTU, Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung: Verfahren zur Bemessung des sommerlichen Wärmeschutzes unter Berücksichtigung der zukünftigen Klimaentwicklung, https://bauing.rptu.de/ags/bauphysik/forschung/aktuelle-projekte/verfahren-zur-bemessung-des-sommerlichen-waermeschutzes-unter-beruecksichtigung-der-zukuenftigen-klimaentwicklung [Zugriff am: 10.02.2025].
- [33] Deutscher Wetterdienst: Testreferenzjahre (TRY), www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html [Zugriff am: 12.06.2024].
- [34] Steiner, T.; Liu, S.: Interconnected model with distributed thermal comfort for model based shading control. *In: Energy and Buildings 253* (2021), S. 111530. doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111530.
- [35] Ganji Kheybari, A.; Steiner, T.; Liu, S. et al.: Controlling Switchable Electrochromic Glazing for Energy Savings, Visual Comfort and Thermal Comfort: A Model Predictive Control. *In: CivilEng 2* (2021), Heft 4, S. 1019-1051. doi.org/10.3390/civileng2040055.
- [36] EnArgus: : EnerReg – Energiemanagement mit Hilfe der modellprädiktiven Regelung für Mischnutzungsgebäude in ländlichen Regionen, www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=Rheinland-Pf%C3%A4ltsche%20Technische%20Universit%C3%A4t%20Kaiserslautern-Landau&v=10&p=6&s=11&id=2662725 [Zugriff am: 13.07.2024].
- [37] Glock, C.; Müller, R.; Kurz, W.; et al.: Reversible, kreislauffähige Holz-Beton-Verbunddecke. BFT International, Heft 5, Gütersloh: Bauverlag GmbH Ausgabe 2024.
- [38] Peifer, P.; Thiele, C.: Fire behaviour of timber-concrete composite constructions under fire exposure. *In: Proceedings of the 13th International Conference on Structures in Fire (SIF'24)*, 2024, S. 213-224.
- [39] Seck, C.; Kurz, W.: Entwicklung eines neuartigen selbstschließenden Klick-Anschluss-Systems zur Übertragung von Schub- und Normalkräften – Proceedings 21. DAST-Kolloquium, S. 94-99, Kaiserslautern. Ausgabe 2018.
- [40] Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N. et al.: Attention is All you Need. *In: I. Guyon; U. Von Luxburg; S. Bengio et al. (Hrsg.): Advances in Neural Information Processing Systems*. Curran Associates, Inc, 2017.
- [41] OpenAI; Achiam, J.; Adler, S. et al.: GPT-4 Technical Report Ausgabe März 2023.
- [42] Habtegebrial, T.; Jampani, V.; Gallo, O. et al.: Text2MPI: Learning to generate multi-plane images from text, arxiv.org/pdf/2207.10642 [Zugriff am: 22.01.2025].
- [43] Habtegebrial, T.; Jampani, V.; Gallo, O. et al.: Generative View Synthesis: From Single-view Semantics to Novel-view Images, Thirty-fourth Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS-2020).
- [44] Xu, X.; Jayaraman, P.K.; Lambourne, J.G. et al.: Hierarchical Neural Coding for Controllable CAD Model Generation, 2023, arxiv.org/pdf/2307.00149 [Zugriff am: 22.07.2025].
- [45] Xu, X.; Lambourne, J.G.; Jayaraman, P.K. et al.: BrepGen: A B-rep Generative Diffusion Model with Structured Latent Geometry, 2024, http://arxiv.org/pdf/2401.15563 [Zugriff am: 22.07.2025].
- [46] Boje, C.; Guerriero, A.; Kubicki, S. et al.: Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *In: Automation in Construction 114* (2020), S. 103179. doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179.
- [47] Guttkonda, S.; Rambach, J.: Single Frame Semantic Segmentation Using Multi-Modal Spherical Images. *In: 2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE, Waikoloa, HI, USA, 2024, S. 3210-3219.
- [48] Lin, Y.; Su, Y.; Nathan, P. et al.: HiPose: Hierarchical Binary Surface Encoding and Correspondence Pruning for RGB-D 6DoF Object Pose Estimation. *In: 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE, Seattle, WA, USA, 2024, S. 10148-10158.
- [49] Tang, X.; Heng, J.; Kaewunruen, S. et al.: Artificial Intelligence-Powered Digital Twins for Sustainable and Resilient Engineering Structures/ KI gestützte digitale Zwillinge für nachhaltige und widerstandsfähige

- technische Bauwerke. *In: Bauingenieur* 99 (2024), Heft 09, S. 270-276. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-09-36.
- [50] Tschickardt, T.; Kaufmann, F.; Glock, C.: Lean and BIM based flight planning for automated data acquisition of bridge structures with LiDAR UAV during construction phase. *In: Proceedings of the 2022 European Conference on Computing in Construction, Computing in Construction*. University of Turin, 2022.
- [51] Tschickardt, T.; Swoboda, A.; Glock, C. et al.: Marktdurchdringung von Drohnen und Herausforderungen beim Einsatz im Bauwesen. *In: Bau-technik* 102 (2025), Heft 4, S. 215-223. doi.org/10.1002/bate.202400080.
- [52] Carrigan, S.; Kornadt, O.; Shklyar, I. et al.: Kombination von Thermografieaufnahmen mit numerischen Strömungssimulationen zur Bestimmung des Volumenstroms durch Leckagen. *In: Bauphysik* 38 (2016), Heft 4, S. 222-230. doi.org/10.1002/bapi.201610019.
- [53] Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (FG Baubetrieb und Bauwirtschaft/AG Robotersysteme) und Fraunhofer IESE/ITWM: Infra-Bau 4.0: Dynamische, semiautomatische Umplanung in Infrastrukturbauprojekten – Gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr, www.infra-bau.com [Zugriff am: 21.07.2025].
- [54] Vierling, A.; Groll, T.; Meckel, D. et al.: Excavation pits—progress estimation and cause of delay identification. *In: Construction Robotics* 7 (2023), Heft 1, S. 53-63. doi.org/10.1007/s41693-023-00094-7.
- [55] Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (FG Baubetrieb und Bauwirtschaft/AG Robotersysteme) und Fraunhofer IESE/ITWM: Digital Construction Management (DiCoMa) – Gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr, www.infra-bau.com/dicoma/ [Zugriff am: 21.07.2025].
- [56] Wolf, P.; Groll, T.; Hemer, S. et al.: Evolution of Robotic Simulators: Using UE 4 to Enable Real-World Quality Testing of Complex Autonomous Robots in Unstructured Environments. *In: Proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. SCITEPRESS – Science and Technology Publications, Lieusaint – Paris, France, 2020, S. 271-278.
- [57] Groll, T.: A hierarchical approach for autonomous planning and execution of excavation tasks, Verlag Dr. Hut, Dissertation.
- [58] Wolf, P.; Vierling, A.; Ropertz, T. et al.: Advanced scene aware navigation for the heavy duty off-road vehicle Unimog. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 997 (2020), S. 12093. doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012093.
- [59] HumanTech Consortium: Human-centred technologies for a safer and greener construction industry, https://humantech-horizon.eu/ [Zugriff am: 10.02.2025].
- [60] Shu, F.; Wang, J.; Pagani, A. et al.: Structure PLP-SLAM: Efficient Sparse Mapping and Localization using Point, Line and Plane for Monocular, RGB-D and Stereo Cameras. *In: 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, London, United Kingdom, 2023, S. 2105-2112.
- [61] Seibold, S.; Müller, J.; Allner, S. et al.: Quantifying wood decomposition by insects and fungi using computed tomography scanning and machine learning. *In: Scientific reports*, Vol. 12 (2022), Iss. 1, p. 16150. doi.org/10.1038/s41598-022-20377-3.
- [62] Wyrzykowski, M.; Ghourchian, S.; Münch, B. et al.: Plastic shrinkage of mortars cured with a paraffin-based compound – Bimodal neutron/X-ray tomography study. *In: Cement and Concrete Research* 140 (2021), S. 106289. doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106289.
- [63] Suleiman, A.R.; Zhang, L.V.; Nehdi, M.L.: Quantifying Crack Self-Healing in Concrete with Superabsorbent Polymers under Varying Temperature and Relative Humidity. *In: Sustainability* 13 (2021), Heft 24, S. 13999. https://doi.org/10.3390/su132413999.
- [64] Yuan, J.; Wu, Y.; Zhang, J.: Characterization of air voids and frost resistance of concrete based on industrial computerized tomographical technology. *In: Construction and Building Materials* 168 (2018), S. 975-983. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.117.
- [65] van Steen, C.; Pahlavan, L.; Wevers, M. et al.: Localisation and characterisation of corrosion damage in reinforced concrete by means of acoustic emission and X-ray computed tomography. *In: Construction and Building Materials* 197 (2019), S. 21-29. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.159.
- [66] Li, N.; Zhao, Y.; Xing, Y. et al.: Meso-damage analysis of concrete based on X-ray CT in-situ compression and using deep learning method. *In: Case Studies in Construction Materials* 18 (2023), e02118. doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02118.
- [67] Stamati, O.; Roubin, E.; Andò, E. et al.: Tensile failure of micro-concrete: from mechanical tests to FE meso-model with the help of X-ray tomography. *In: Meccanica* 54 (2019), 4-5, S. 707-722. doi.org/10.1007/s11012-018-0917-0.
- [68] Koudelka, P.; Fila, T.; Rada, V. et al.: In-situ X-ray Differential Micro-tomography for Investigation of Water-weakening in Quasi-brittle Materials Subjected to Four-point Bending. *In: Materials* (Basel, Switzerland), Vol. 13 (2020), Iss. 6. doi.org/10.3390/ma13061405.
- [69] Grzesiak, S.; Barisın, T.; Schladitz, K. et al.: Analysis of the bond behavior of a GFRP rebar in concrete by in-situ 3D imaging test. *In: Materials and Structures* 56 (2023), Heft 9, S. 163. doi.org/10.1617/s11527-023-02247-0.
- [70] Giese, J.; Herbers, M.; Liebold, F. et al.: Investigation of the Crack Behavior of CRC Using 4D Computed Tomography, Photogrammetry, and Fiber Optic Sensing. *In: Buildings* 13 (2023), Heft 10, S. 2595. doi.org/10.3390/buildings13102595.
- [71] Liebold, F.; Wagner, F.; Giese, J. et al.: Damage Analysis and Quality Control of Carbon-Reinforced Concrete Beams Based on In Situ Computed Tomography Tests. *In: Buildings* 13 (2023), Heft 10, S. 2669. doi.org/10.3390/buildings13102669.

Prof. Dirk Bayer

dirk.bayer@rptu.de

**Prof. Dr. rer. nat.
Karsten Berns**

kartsen.berns@rptu.de

**apl. Prof. Dr. rer. nat.
Svenja Carrigan**

svenja.carrigan@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Christian Glock

christian.glock@rptu.de

Fabian Kaufmann, M.Eng.

fabian.kaufmann@rptu.de

**Prof. Dr.-Ing.
Karsten Körkemeyer**

k.koerkemeyer@rptu.de

**Prof. Dr. rer. nat.
Oliver Kornadt**

oliver.kornadt@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kurz

wolfgang.kurz@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Steven Liu

steven.liu@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

matthias.pahn@rptu.de

**Prof. Dr.-Ing.
Hamid Sadegh-Azar**

hamid.sadegh-azar@rptu.de

RPTU Kaiserslautern-Landau
Gottlieb-Daimler-Straße 48, 67663 Kaiserslautern
www.bauenderzukunft.org

Prof. Dr. Didier Stricker

didier.stricker@dfki.de

RPTU Kaiserslautern-Landau
Gottlieb-Daimler-Straße 48, 67663 Kaiserslautern
www.bauenderzukunft.org

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche
Intelligenz
Trippstadter Straße 122, 67663 Kaiserslautern

**apl. Prof. Dr.-Ing.
Catherina Thiele**

catherina.thiele@rptu.de

RPTU Kaiserslautern-Landau
Gottlieb-Daimler-Straße 48, 67663 Kaiserslautern
www.bauenderzukunft.org



Building the Future – an interdisciplinary research initiative

D. Bayer, K. Berns, S. Carrigan, C. Glock, F. Kaufmann, K. Körkemeyer, O. Kornadt, W. Kurz, S. Liu, M. Pahn, H. Sadegh-Azar, D. Stricker, C. Thiele

ABSTRACT This article presents the objectives, approach and selected results of the interdisciplinary research initiative “Building the Future – climate-friendly and resource-conserving” (www.bauenderzukunft.org). The research initiative is made up of twenty professors from the University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) and other scientific institutes in Kaiserslautern and is funded by the state of Rhineland-Palatinate. The aim is to preserve the benefits of building and at the same time reduce negative environmental impacts to a minimum. To this end, various fields of action have been identified, including the further development of components and supporting structures made of optimized building materials, increasing efficiency by optimizing processes and increasing automation and digitalization in the construction industry, consolidating the fragmented realisation process across the life cycle phases of design, construction and operation. Interdisciplinary teams from architecture, construction, mechanical engineering, electrical engineering, computer science, artificial intelligence, robotics, materials and mathematics are working on application-oriented and theoretical topics in various research and subject areas. The article presents selected research activities and identifies future challenges.

KEYWORDS

Research and Development, Sustainability, CO₂ Reduction, Concrete Construction, Digital Methods

Bauen der Zukunft – eine interdisziplinäre Forschungsinitiative

ZUSAMMENFASSUNG Dieser Beitrag stellt die Ziele, das Vorgehen und ausgewählte Ergebnisse der interdisziplinären Forschungsinitiative „Bauen der Zukunft – klimagerecht und ressourcenschonend“ (www.bauenderzukunft.org) vor. Die Forschungsinitiative setzt sich aus zwanzig Professorinnen und Professoren der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) sowie weiterer wissenschaftlicher Institute aus Kaiserslautern zusammen und wird vom Land Rheinland-Pfalz gefördert. Das Ziel ist es, die Vorzüge des Bauens zu bewahren und gleichzeitig negative Umwelteinflüsse auf ein Minimum zu reduzieren. Hierfür wurden verschiedene Handlungsfelder identifiziert, unter anderem die Weiterentwicklung von Bauteilen und Tragwerken aus optimierten Baustoffen, die Effizienzsteigerung durch Optimierung von Prozessen und Steigerung von Automatisierung und Digitalisierung im Bauwesen sowie die Konsolidierung des fragmentierten Realisierungsprozesses über die Lebenszyklusphasen Planung, Bau und Betrieb. In verschiedenen Forschungs- und Themenfeldern befassen sich interdisziplinäre Teams aus Architektur, Bau, Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik, Künstliche Intelligenz, Robotik, Werkstoffe und Mathematik mit anwendungsorientierten und theoretischen Themen. Im Beitrag werden ausgewählte Forschungsaktivitäten vorgestellt und zukünftige Herausforderungen benannt.

1 Background

Buildings have always provided humans with protection from external environmental influences such as rain and cold, fulfilling fundamental needs for safety and shelter. They enable advanced mobility, industrial production, education, healthcare, and culture. Iconic structures such as the Landwasser Viaduct, built in 1901 [1; 2], impressively demonstrate this (Figure 1).

At the same time, construction activities are often associated with negative environmental impacts and high resource consumption. In 2022, total production of gravel, sand, and broken natural stone in Germany was approximately 463 million tonnes – almost three times higher than coal production [3].

Regarding the energy consumed and CO₂-equivalent emissions generated by the construction sector, it is necessary to distinguish between the production of building materials, the construction process, the operation of buildings, and demolition or recycling. Cement production alone generates about 2 % of Germany's and 8 % of global CO₂-equivalent emissions [4; 5]. Significant



Fig. 1. Landwasser Viaduct. Source: [2]

Bild 1. Landwasserviadukt. Foto: [2]

amounts of energy are still required for building operation, even though energy-saving measures have achieved substantial reductions. Private households account for 28 % of Germany's final

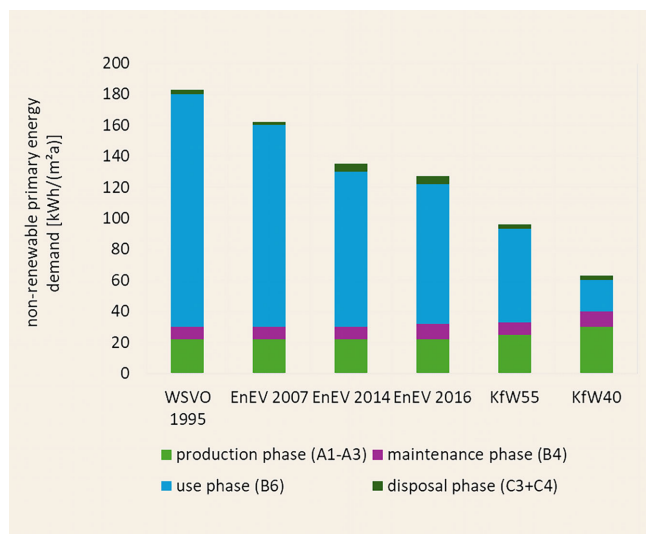


Fig. 2. Share of primary energy demand, non-renewable, of a detached house over 50 years. Source: [7]
Bild 2. Anteile am Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar, eines Einfamilienhauses über 50 Jahre. Grafik: [7]

energy consumption, making them, alongside transport and industry, one of the main consumers [6].

Embodied emissions – for example emissions generated during construction or demolition – are becoming increasingly significant (**Figure 2**) [7; 8]. This trend is due to the considerable success in reducing operational emissions, particularly through advances in building insulation.

In addition, construction and demolition waste accounts for around 223 million tonnes, or 54 %, of total waste generated in Germany. However, 88 % of this material is free from hazardous substances and is recycled or reused for various construction measures [9].

2 Interdisciplinarity and Networking

The challenges discussed can only be addressed through an interdisciplinary collaboration of various disciplines. Established planning and construction methods must be critically reviewed and adapted to meet today's requirements. The current sequential, fragmented approach must be overcome. The research initiative „Building the Future – climate-friendly and resource-efficient“ (www.bauenderzukunft.org) at RPTU aims to lay the foundation for this transformation. It brings together twenty professors from the Rhineland-Palatinate Technical University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) and other scientific institutes in Kaiserslautern, supported by the state of Rhineland-Palatinate. The initiative's spokesperson is Prof. Dr.-Ing. Christian Glock. Initial steps are being taken in selected research fields. Technologies from civil engineering, architecture, computer science, Artificial Intelligence, robotics, mechanical engineering, and electrical engineering are being further developed using mathematical methods in a unique interdisciplinary collaboration of researchers. The necessary expertise is available at RPTU and the participating institutes – the German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI), the Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics (ITWM), the Fraunhofer Institute for Experimental Software Engineering (IE-

SE), and the Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW). Both methodological and experimental expertise are optimally utilised through the composition of the research group. By advancing components and structures with a focus on embodied emissions, resource conservation, automation, intelligent construction machinery, and new materials, concepts for new builds, existing stock, and innovative construction processes have already been developed, and research projects have been successfully launched.

3 Goals

The Building the Future research initiative is active in the fields of further development of components and structures, increasing efficiency through process optimisation, and considering the entire life cycle of buildings.

On the path towards further reducing greenhouse gas emissions in construction, the material concrete plays a particularly important role, as it shapes the built environment more than any other material and is used in very large quantities [10; 11].

In recent years, considerable efforts have been made to increase the sustainability of concrete, with a stronger focus on the use of recycled products [12]. By reducing the clinker content in cement and using alternative fuels, cement production has already achieved a significant reduction in CO₂ emissions of around 20 % over the last 20 years [11; 13]. Further reductions, however, are only possible with substantial efforts such as CO₂ capture, utilisation, and storage (CCUS) technology [14]. Optimisation of load-bearing structures is therefore of particular importance. There are already many approaches for optimising design, structures, components, and building products, which can be categorised into the impact levels of architecture and design, construction method and load-bearing structure, components, and materials (**Figure 3**). In reinforced concrete construction, the optimisation of reinforced concrete elements with respect to minimised material consumption is especially important [10; 11; 15; 16].

Just as much as technical advances in design, structures, components, and materials, processes influence efficiency and thus resource effectiveness in construction. While labour productivity in construction has only increased slightly over the last 50 years, it has more than tripled in other industries (**Figure 4**) [17].

This productivity gap can at least partly be explained by ongoing automation and digitalisation, which in construction is still lagging behind. While modern materials, construction aids, equipment, and machinery have contributed to productivity gains, labour costs remain the limiting factor. Increasing productivity therefore requires automation-friendly processes, the use of digital planning and construction execution methods, and the use of robotics and autonomous machinery.

In Building the Future, the focus must be on the structure and its entire life cycle from project idea to operational phase. Components and structures must be developed from planning through construction, operation, and demolition with the criteria of maximum efficiency and avoidance of waste, with reusability already considered at the design stage. The aim of the research initiative is to optimise the entire structure and all its individual components, and to develop methods for high-quality analysis of existing structures [18], frameworks, and components. Service lives should be extended, renovation measures optimised, and increased reuse of components in circular systems made possible.

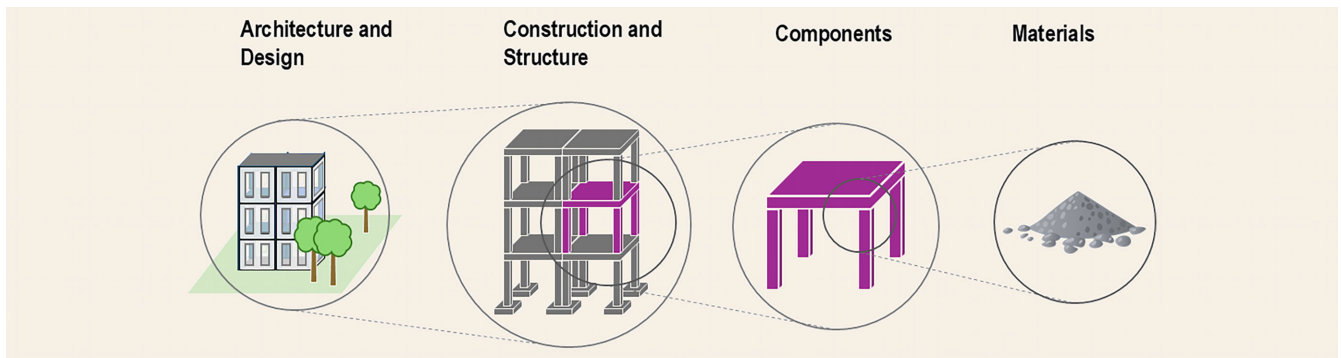


Fig. 3. Impact levels of optimization approaches. Source: own representation
Bild 3. Wirkungsebenen von Optimierungsansätzen. Grafik: eigene Darstellung

4 Research Activities and Solutions

4.1 CO₂ Reduction and Resource Efficiency in Planning, Production, and Dismantling of Structures

In the coming years, substantial efforts will be required to reduce CO₂ emissions over the entire life cycle of structures. Preserving and utilising existing building stock will therefore be of essential importance. In line with the principles of a circular economy, the following prioritisation should form the basis of future decisions:

1. Reuse, that is, the continued use of existing buildings
2. Rebuild, that is, the conversion and reuse of entire components
3. Recycle, that is, the reuse of existing stock in the form of recycled materials

For Reuse and Rebuild measures, it is necessary to capture the building and make the potential for continued use and reuse of components available in a digital twin using Building Information Modelling (BIM). For this, a digital survey of the existing stock is required, generating three-dimensional point clouds in combination with AI-based methods for automated creation of BIM models of existing structures [19 to 22; 18].

Considering the large potential for the Rebuild approach, there is currently a wide range of applications and research on the reuse of whole components – for example, studies on the reuse of timber-concrete composite floors [23]. In a research project at RPTU [24], it was shown that the removal of prestressed hollow-core slabs can be carried out with moderate effort, and that the load-bearing capacity of such slabs already in use can still meet high requirements in a second application. **Figure 5** (left) shows the deconstruction of a prestressed hollow-core slab from a floor section by mobile crane, and (right) a comparison of deconstructed slabs (I–VII) with new unused slabs (N1–N3) using the load-deformation diagram [22].

Last year, the German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb) published a new guideline „Greenhouse Gas-Reduced Structures Made of Concrete, Reinforced Concrete, or Prestressed Concrete“ [20], presented in [25]. The aim of the guideline is to define specific requirements and measures to ensure compliance with international and national greenhouse gas reduction targets in the construction and disposal of concrete, reinforced concrete, or prestressed concrete structures. Due to the particular importance of ceiling components, and in the interest of practical application, these are considered separately in a dedicated section of the guideline. Within the research initiative, numerous investigati-

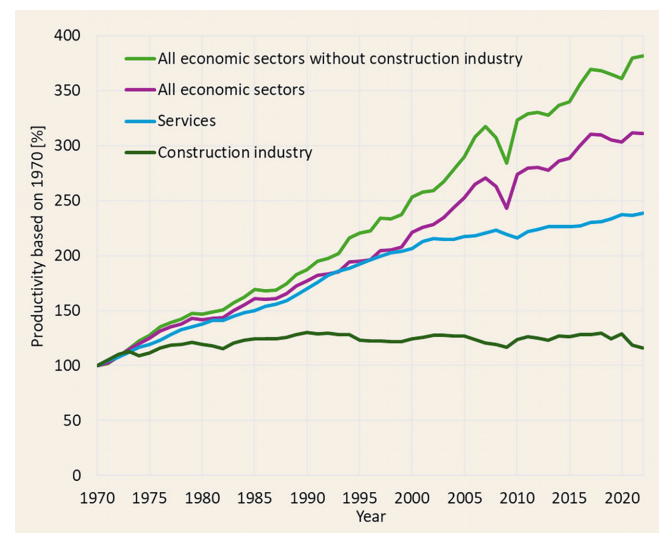


Fig. 4. Comparison of labor productivity in the construction industry with other sectors. Source: [17]
Bild 4. Vergleich der Arbeitsproduktivität in der Bauwirtschaft mit anderen Branchen. Grafik: [17]

ons have been carried out into the status quo and potential of ceiling systems [15; 26].

4.2 Reduction of CO₂ Emissions and Energy Consumption in Operation

The measures implemented to date for reducing CO₂ emissions in building operation represent a remarkable success story for the construction sector. Over the past 50 years, the primary energy demand for new buildings has been reduced from approximately 250 kWh/m²a to around 40 kWh/m²a – roughly one-sixth of the original value [27]. Compared with other sectors, this is an outstanding achievement.

In addition to the energy required for heating buildings, the issue of summer heat protection is gaining increasing importance in the context of climate change. This calls for integrated energy concepts that combine energy generation from renewable sources with energy storage at various temperature levels. Innovative systems are increasingly making use of phase change materials (PCMs) for storing energy at different temperature levels, as well as Peltier elements for temperature adjustment [28; 29].

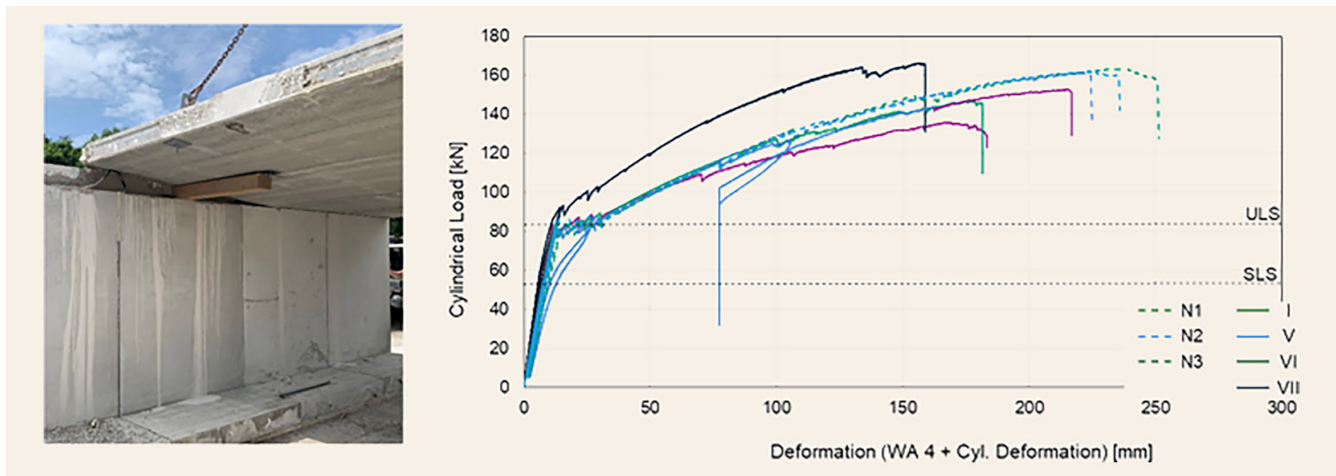


Fig. 5. Deconstruction of prestressed hollow core slabs, load-deformation diagram of deconstructed (I-VII) and unused slabs (N1-N3). *Source:* [24]
Bild 5. Rückbau einer Decke aus Spannbetonhohldielen und Last-Verformungs-Diagramm der rückgebauten (I-VII) und neuen Spannbetonhohldielen (N1-N3). *Grafik:* [24]

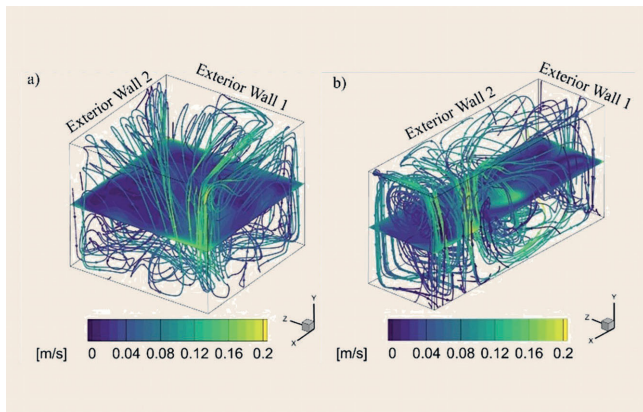


Fig. 6. Flow field in rooms of different geometries with constant volume, with underfloor heating. *Source:* [31]
Bild 6. Strömungsfeld in Räumen unterschiedlicher Geometrien bei gleichbleibendem Volumen, mit Fußbodenheizung. *Grafik:* [31]

An energy-efficient operation also requires the consideration of user preferences. Studies show that deviations in ventilation behaviour from normative assumptions can lead to differences in usable heating energy demand of more than 20 % – even with the same total daily air exchange rate [30]. To predict energy consumption precisely – for example, after refurbishments – detailed knowledge of heat transfer processes in indoor spaces is required. Current research is therefore investigating heat transfer from room air to the interior surface of external walls. This includes examining both radiation and convection processes. **Figure 6** illustrates how different room geometries affect the flow field in a room with floor heating [31]. Artificial Intelligence (AI) can also contribute to optimising building operation. A current project is researching the use of AI-based methods for fast, practical predictions of summer heat protection [32]. By incorporating future climate data, which provide projections for 2045 on a square-kilometre basis for Germany [33], it is possible to analyse the performance of new builds and refurbished buildings under future climatic conditions.

Control and regulation systems are key components in the development of modern, highly efficient energy supply systems.

Model predictive control, in combination with AI-based learning and forecasting methods, demonstrably increases both energy efficiency and comfort [34 to 36].

The research initiative focuses on further investigation and development of innovative energy generation and storage systems, as well as AI-controlled whole-building systems, taking into account individual user needs and future climate conditions. The aim is to achieve further reductions in energy consumption and CO₂ emissions in building operation over the entire service life of buildings.

4.3 Hybrid Components and Joining Techniques

Through the use of hybrid components and advanced joining techniques, the specific properties of different building materials can be advantageously combined to realise resource-saving and CO₂-reduced construction methods.

Current research is focused on new composite designs for timber-concrete composite floors aimed at improving the reusability of components [37]. The goal is to develop a shear connection between the concrete slab and the timber beam that allows for dry, reversible, and repeated joining of reinforced concrete slab and cross-laminated timber beam cross-sections. In another project, a timber-concrete composite wall system was developed in which, for the first time, the timber element possesses sufficient load-bearing capacity to support loads in the building core of multi-story structures [38]. Thanks to the special arrangement and geometry of the concrete layer, the load-bearing function is maintained even in the event of fire.

Research into joining techniques forms another major focus of Building the Future. Traditional grouted joints often require complex manual and time-consuming work – such as installing fasteners, reinforcement, and formwork – and typically necessitate temporary supports, with a risk of significant assembly tolerances. Novel joining techniques that enable largely mechanised and automated on-site assembly offer considerable advantages. A promising approach is the development of a snap-fit connection that transfers principles from mechanical engineering and textile technology to construction. In this system, an undercut bolt engages with an interchangeable joining plate, transferring tensile and

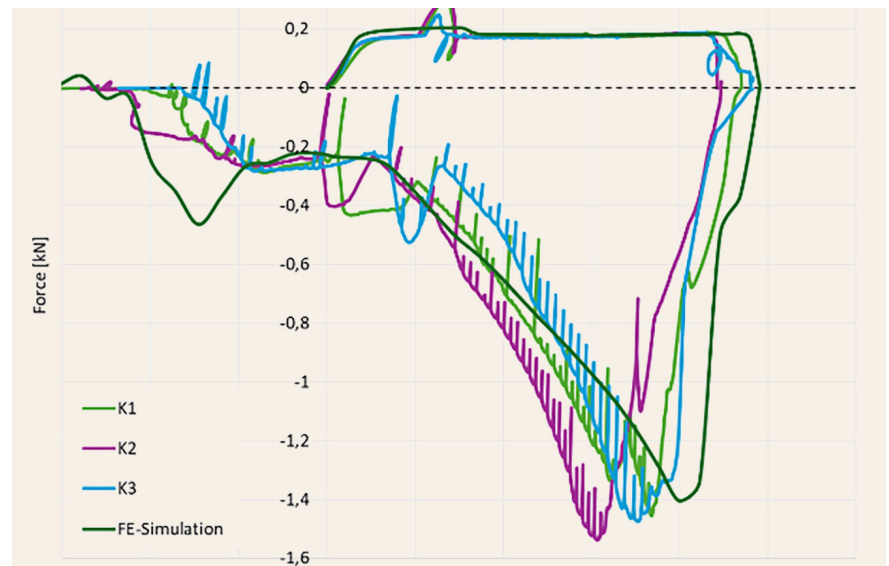
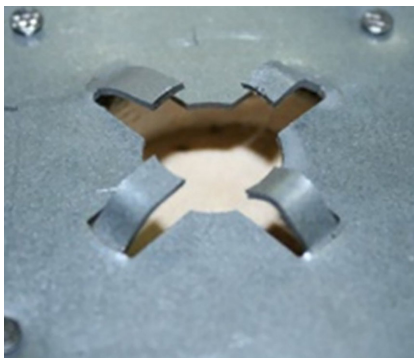


Fig. 7. Principle of the snap connection with detail of a miniaturized test specimen and load-deformation curve in the tensile test. Source: [39]
Bild 7. Prinzip der Schnappverbindung mit Detail eines miniaturisierten Versuchskörpers und Last-Verformungskurve im Zugversuch. Grafik: [39]

shear forces similar to a screwed connection. The connection can be released when the tensile force limit is exceeded and reused after replacing the joining plate (**Figure 7**, left). Tensile tests from the K1–K3 series show good agreement with FE simulations (**Figure 7**, right) [39].

The advancement of Building the Future requires a fundamental rethinking of component concepts and joining techniques. Alongside simple, systematic, and thus automatable manufacturing and joining – aligned with the principles of a circular economy – research will increasingly focus on the detachability of joints.

4.4 AI-Based Planning

Traditional architectural design follows a teachable and learnable methodology, upon which the structural design of the project is subsequently based. Considerations such as spatial programme, function, cost, regulations, structural engineering, building services, and building physics accompany the design and planning of a building. Visual representations and plans still convey the architectural concept primarily as a two-dimensional abstraction.

In the past, good design relied on the individual knowledge and professional expertise of the architect. In the future, however, a suitably trained AI agent could surpass conventionally trained architects, primarily because it could draw on a larger, more formalised, and objective knowledge base. Designing would then involve iteratively adjusting machine-generated images until they meet the intended objectives. Simultaneously – or subsequently – these generated images would need to be transformed into topologically correct, buildable geometries. A crucial role will also be played by integrating structural design principles directly into the design process, as efficient structural systems – combined with optimised components and materials – are essential for functional and resource-efficient buildings.

The following outlines the technologies that can enable AI-based planning. Large language models [40] based on the Transformer architecture [41] have significantly expanded the capabilities of generative AI for language processing and generation. The core

concept – using prompts to request specific results from a model – has proven very user-friendly, making generative AI accessible to a broad audience.

However, text generation represents only a small part of architectural work. Visual communication through plans, elevations, renderings, and increasingly 3D models is fundamental. While generative models for creating images [42; 43] and, to a limited extent, 3D CAD data [44; 45] already exist, a key component is still missing, namely, generating appealing visual renderings of a planned building together with congruent 3D models that can be directly used for further technical work. A generative “text → image → 3D model” pipeline has the potential to invert current workflows in building design. Today, renderings are usually created from technical 3D models to facilitate communication with project stakeholders. In the future, this process could be reversed: visualisations and 3D models could be generated directly via prompt, serving both as a communication tool and as a basis for technical refinement.

The research initiative aims to advance the development of such models.

4.5 Digital Twin and Smart Construction & Building

Digital twins form the basis for enabling digital planning, construction, and operational processes, as well as mathematical algorithms for optimising, implementing, and monitoring structural properties, operating conditions, and changes of use (**Figure 8**). Unlike a Building Information Model (BIM), a digital twin is a dynamic, interconnected representation of the physical structure through semantic models [46] that is continuously updated.

Within the research initiative, work is underway at the interface with computer vision to develop methods for generating and updating digital twins quickly and easily from previously captured data. Notable work includes the evaluation of data from an experimental 360° RGB-D (depth) camera [47] and research into determining the position of objects in space based on simple camera images [48]. The objective is to process data from different sensors using AI methods and integrate the information into the

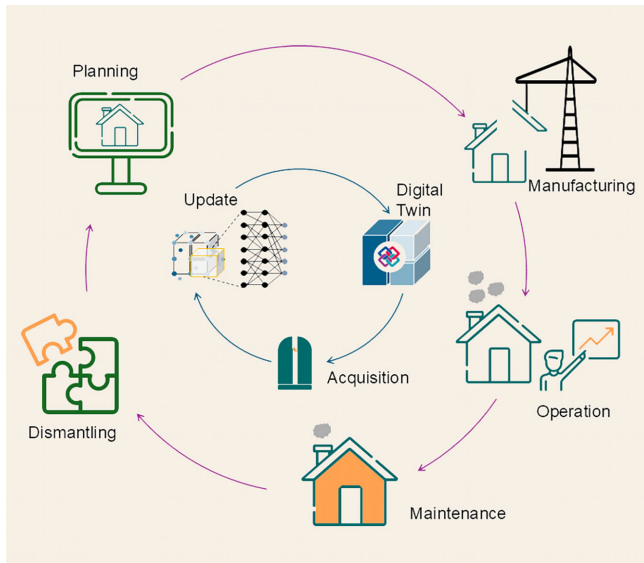


Fig. 8. Continuous updating of the digital twin to support the planning, construction, operation, maintenance/refurbishment and dismantling of buildings. *Source: own representation*
Bild 8. Fortlaufende Aktualisierung des digitalen Zwillings zur Unterstützung von Planung, Bau, Betrieb, Wartung/Sanierung und Rückbau von Gebäuden. *Grafik: eigene Darstellung*

digital twin. These generated or updated digital twins have the potential to implement holistic monitoring to ensure structural safety and durability [49].

During the execution phase, Smart Construction aims to link planning and execution data in a way that improves efficiency and quality. One area being studied in the research initiative is the automated monitoring of construction progress using drone imagery [50; 51]. By handing over the digital twin to the operational phase, predictive optimisation of operating conditions can be achieved – for example, through more accurate forecasting of actual final energy consumption [52].

With the goal of improving productivity in the construction industry, a project [53] was launched to develop a digital platform that digitally maps all construction participants with their systems, data, and processes during the execution phase, networking them into a digital ecosystem. This platform offers advantages primarily in terms of user-specific information exchange, as well as improved monitoring and control of construction progress. In the event of deviations, decision support can be provided

and appropriate measures taken [54]. In a follow-up project [55], the developed functions and tools were evaluated with industry partners on a real construction site.

Building on this preliminary work, the research initiative aims to intensify interdisciplinary research into evaluating data from different sensors. Using these technologies, comprehensive digital twins can be generated and updated to support the entire building life cycle.

4.6 Automation and Digitalisation in the Construction Process

Automation and digitalisation in the construction process will gain enormous importance in the future to achieve efficiency improvements while reducing the need for personnel. In development, digital twins of the construction site are used, enabling comprehensive automation through realistic simulation of construction machinery, process control, environmental recognition, and interaction between individual machines [56]. This requires accurate modelling of the dynamics and kinematics of the construction equipment, the installed sensor systems, the localisation methods used, and the process knowledge.

In recent years, research projects have developed system solutions such as autonomous site transport systems, excavators, bulldozers, drilling robots, inspection systems both inside and outside buildings, and construction robots for placing panels, laying bricks, tiling, or even 3D-printing houses. For example, a John Deere backhoe loader was modified to autonomously excavate an L-shaped trench without human intervention [57]. An autonomously operating Unimog can navigate collision-free between any locations on a construction site [58].

As part of the EU-funded project “HumanTech” [59], several groups in the research initiative are working on the prototype development of a robot capable of autonomously performing tasks during building demolition. A BIM model serves both as the basis for navigation and for task planning. Using the BIM model and continuous environmental scanning with LiDAR sensors, the exact position of the robot in its environment is determined and used for navigation or for carrying out cutting operations. Fig. 9 (left) shows the visualisation of the 3D BIM model; in the middle, the derived 2D representation used for path planning; and on the right, the test robot in its test environment.

To expand the range of applications, innovative methods must be developed – particularly for precise localisation and building

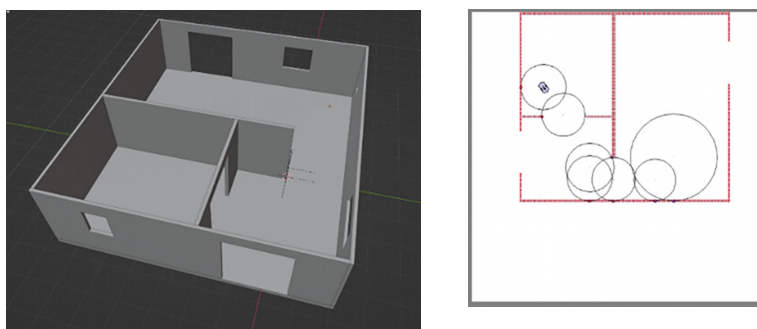
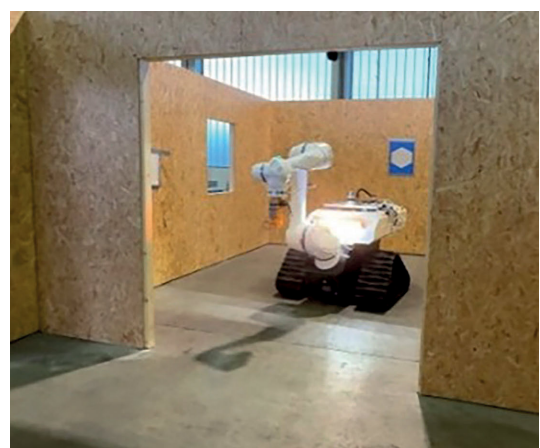


Fig. 9. Digital model of the test environment (left), derived 2D floor plan for navigation (center), robot system in the test environment (right). *Source: [59]*
Bild 9. Digitales Modell der Testumgebung (links), abgeleiteter 2D Grundriss für die Navigation (Mitte), Robotersystem in der Testumgebung (rechts). *Grafik: [59]*



surveying with mobile systems using cost-effective sensors [60], self-adapting control systems, new mechatronic concepts for mobile handling systems, and safe interaction systems between humans and construction machinery.

4.7 Innovative Testing and Measurement Methods: Large-Scale Tomography

Numerous publications discuss examples of using computed tomography (CT) with small-scale tomographs on various construction materials – for example, timber (to quantify damage) [61]; concrete (to study shrinkage behaviour [62], crack self-healing [63], and air pore distribution [64]); and reinforced concrete (to detect corrosion damage in reinforcement steel) [65], among others.

Computed tomography can also be used to investigate the influence of loads. There are two different approaches:

- Ex-situ CT investigations – the specimen is scanned in its original condition, loaded outside the scanner, and then re-scanned [61; 65].
- In-situ CT investigations – the specimen is analysed inside the CT scanner while under load [66-69].

For these investigations, it should be noted that specimen sizes are limited by the tomograph dimensions and X-ray energy levels of the CT equipment. As a result, the geometry rarely exceeds 10 cm in height or width, making it impossible to realistically investigate (composite) materials that cannot be reduced in size arbitrarily. To enable investigations on a true-to-scale level, the tomography portal Gulliver is currently being built on the RPTU Kaiserslautern campus – worldwide, the first facility to allow investigations of components with realistic dimensions (**Figure 10**).

The tomography portal consists of three components: the load testing frame, the imaging system, and the gantry.

- The load testing frame allows both static (up to 600 kN in compression and 300 kN in tension) and dynamic (up to 300 kN in compression and 300 kN in tension) loads in the transverse and longitudinal directions of the specimen.
- The maximum permissible dimensions of specimens are 6 000 mm (length) $\times$ 1 000 mm (max. width at 300 mm height) $\times$ 700 mm (max. height at 300 mm width).
- The imaging system includes a linear accelerator and three detectors. The linear accelerator provides an X-ray energy of up to 9 MeV.

Preliminary investigations, in which carbon concrete specimens with cross-sections of up to $80 \times 160 \text{ mm}^2$ were scanned, demonstrate the new possibilities for in-situ CT investigations [70; 71]. Imaging the carbon reinforcement within the concrete component makes it possible to study the influence of the concreting process on reinforcement placement accuracy and can serve as a basis for quality control in automated manufacturing processes (**Figure 11**) [71].

5 Conclusion

Construction forms an essential foundation for meeting both basic and complex needs. It provides housing, infrastructure, and industrial facilities, and serves as the basis of economic activity. Modern societies would be unthinkable without the construction



Fig. 10. Tomography portal 'Gulliver'. Source: own representation
Bild 10. Tomografie Portal „Gulliver“. Foto: eigene Darstellung

sector. At the same time, the industry faces significant challenges regarding environmental impacts. Construction is one of the largest consumers of natural resources, with high material usage leading to substantial environmental burdens. The sector is also responsible for a significant share of waste generation and global CO₂ emissions. Furthermore, compared with other industries, productivity growth in construction has been minimal.

Addressing these challenges requires interdisciplinary research. The research initiative of the state of Rhineland-Palatinate is pursuing several promising projects. For example, the reuse of entire components such as prestressed hollow-core slabs is being investigated. Other projects focus on using environmental energy in combination with thermal storage at different temperature levels and phase change materials to reduce CO₂ emissions during building operation. AI-based planning approaches demonstrate how structures can be designed more efficiently and sustainably. Optimised construction processes, reduced material consumption, and improved energy efficiency are central results of AI application. Similarly, digitalisation and automation offer great potential: robotics can accelerate workflows, reduce errors, and save resources. Digital twins help simulate structures accurately and detect planning errors early. Building Information Modelling (BIM) promotes interdisciplinary collaboration and sustainable planning. Hybrid materials and innovative joining techniques also enable resource-efficient construction. Flexible connections facilitate disassembly and reduce residual waste. In addition, modern testing methods make an important contribution: the large-scale CT scanner „Gulliver“ at RPTU allows highly precise insights into components. Other research gaps have been identified in Chapter 4.

By combining different disciplines and innovative technologies, the research initiative presented here has the potential to develop environmentally friendly, technically advanced, and economically viable solutions.

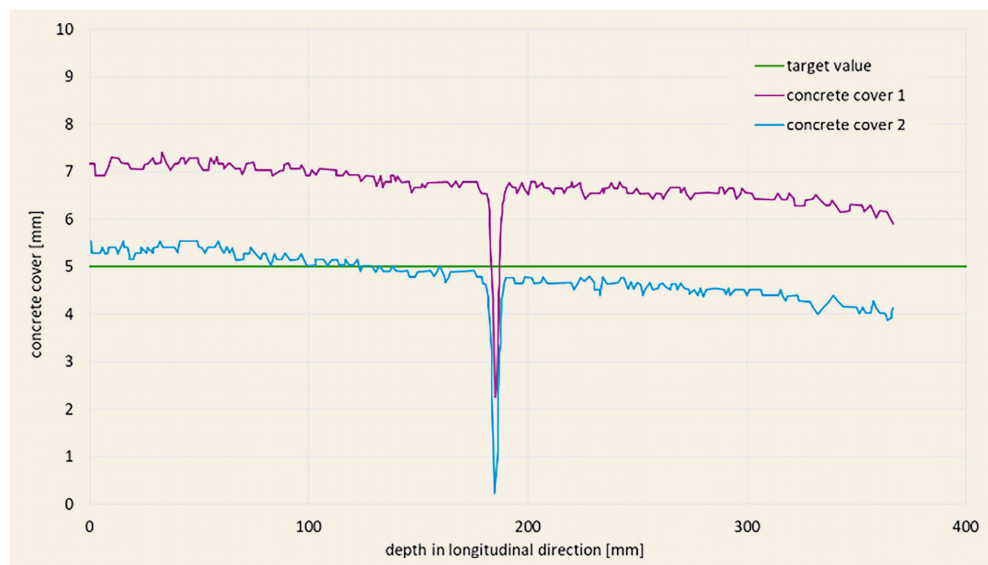
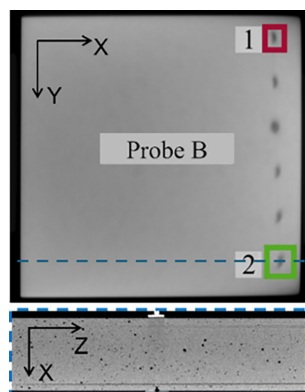


Fig. 11. Quality control using CT: thickness of the concrete cover along the reinforcement. Source: [71]

Bild 11. Qualitätskontrolle mittels CT: Dicke der Betondeckung entlang der Bewehrung. Grafik: [71]

ACKNOWLEDGEMENTS

The research initiative is funded by the state of Rhineland-Palatinate. The research projects described are supported by the following funding bodies: Federal Ministry of Education and Research (BMBF), Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), Federal Ministry for Housing, Urban Development and Building (BMWSB), Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), German Research Foundation (DFG), EU Horizon, European Territorial Cooperation (ETC) as well as numerous funding organisations from industry.

We thank all supporters.

LITERATURE

- [1] Wikipedia-Autoren, s.V.: Landwasserviadukt, 2024, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Landwasserviadukt&oldid=250152265> [Zugriff am: 06.06.2025].
- [2] GetYourGuide: Von Como aus: St. Moritz und Tirano Reise mit Bernina Express | GetYourGuide, 2025, www.getyourguide.de/como-l101235/von-como-aus-st-moritz-und-tirano-reise-mit-bernina-express-t198298/ [Zugriff am: 06.06.2025].
- [3] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland – Rohstoffsituation 2022. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. Ausgabe Dezember 2023.
- [4] Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien: Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie: Zement. Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Ausgabe April 2022.
- [5] Glock, C.; Heckmann, M.; Hondl, T. et al.: Massivbau in Zeiten von Klimawandel und Ressourcenverknappung – Herausforderungen und Lösungsansätze/Concrete construction in times of climate change and resource shortage – challenges and solutions. In: Bauingenieur 97 (2022), Heft 01-02, S. 1-12. doi.org/10.37544/0005-6650-2022-01-02-33.
- [6] Statistisches Bundesamt: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren 2021. Statistisches Bundesamt, 2024, www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/_Grafik/_Interaktiv/energieverbrauch-deutschland-sektoren.html [Zugriff am: 22.04.2024].
- [7] Schöndube, T.; Beecken, C.; Becker, S. et al.: Primärenergiebedarf resultierend aus Herstellungs-, Nutzungs- und Instandhaltungsphase von Gebäuden in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard. Bauphysiktag 2019 in Weimar. Ausgabe 2019.
- [8] Schöndube, T.; Beecken, C.; Becker, S. et al.: Weiterentwicklung der Energieeinsparverordnung. In: Bauphysik 42 (2020), Heft 2, S. 51-61. doi.org/10.1002/bapi.202000003.
- [9] Statistisches Bundesamt: Statistischer Bericht – Abfallbilanz. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. Ausgabe 2023.
- [10] Glock, C.; Haist, M.; Bergmeister, K. et al.: Klima- und ressourcenschonendes Bauen mit Beton. In: 2024 BetonKalender, 177-265. doi.org/10.1002/9783433611494.ch2.
- [11] Glock, C.; Dernbach, A.; Heckmann, M. et al.: Treibhausgas- und ressourcenreduzierter (Beton-)Bau – Herausforderungen, Lösungsansätze, Anreizsysteme. In: DBV-Heft 50 (2023), Heft 1, 27-65. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11.
- [12] Hegger, J.; Glock, C.; Curbach, M. et al.: Innovativer Betonbau – Tradition und Zukunft. In: Bauingenieur 100 (2025), 7-8. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.
- [13] Schack, T.; Haist, M.: Betone mit ternären klinkereffizienten Zementen. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 2-11. doi.org/10.1002/best.202400082.
- [14] VDZ: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. – Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Ausgabe 2020.
- [15] Heckmann, M.; Glock, C.: Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. In: Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), Heft 2, S. 110-123. doi.org/10.1002/best.202200102.
- [16] Sobek, W.; Sawodny, O.; Bischoff, M. et al.: Adaptive Hüllen und Strukturen. In: Bautechnik 98 (2021), Heft 3, S. 208-221. doi.org/10.1002/bate.202000107.
- [17] Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Inlandsproduktberechnung – Lange Reihen ab 1970. Fachserie 18, Reihe 1.5, 2022, www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-lange-reihen-pdf-2180150.html [Zugriff am: 17.01.2025].
- [18] Kaufmann, F.; Glock, C.; Tschickardt, T.: ScaleBIM: Introducing a scalable modular framework to transfer point clouds into semantically rich building information models. In: Proceedings of the 2022 European Conference on Computing in Construction, Computing in Construction. University of Turin, 2022.
- [19] Schönfelder, P.; Aziz, A.; Faltin, B. et al.: Automating the retrospective generation of As-is BIM models using machine learning. In: Automation in Construction 152 (2023), S. 104937. doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104937.
- [20] DAfStb-Richtlinie – Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton – Teil 1: Grundlagen und Nachweis am gesamten Tragwerk; Teil 2: Deckenbauteile. Ausgabe August 2024.
- [21] Tang, S.; Li, X.; Zheng, X. et al.: BIM generation from 3D point clouds by combining 3D deep learning and improved morphological approach. In: Automation in Construction 141 (2022), S. 104422. doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104422.

- [22] Bassier, M.; Vergauwen, M.: Topology Reconstruction of BIM Wall Objects from Point Cloud Data. In: Remote Sensing 12 (2020), Heft 11, S. 1800. doi.org/10.3390/rs12111800.
- [23] Praxispremiere für zerlegbare Holz-Beton-Verbunddecken – Brüninghoff setzt erstmals trennbare HBV-Deckenelemente bei Neubau ein, 2025, www.deutsches-ingenieurblatt.de/news/newsdetail/praxispremiere-fuer-zerlegbare-holz-beton-verbunddecken [Zugriff am: 10.02.2025].
- [24] Heckmann, M.; Dernbach, A.; Müller, R. et al.: Experimentelle Untersuchungen zu Rückbau und Wiederverwendung von Spannbetonhohldieleen. In: Beton- und Stahlbetonbau 119 (2024), Heft 6, S. 410-419. doi.org/10.1002/best.202400001.
- [25] Glock, C.; Haist, M.; Wiens, U. et al.: „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ – die neue DAfStb-Richtlinie/“Greenhouse gas-reduced concrete, reinforced concrete or prestressed concrete structures” – the new DAfStb guideline. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 339-347. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-25.
- [26] Heckmann, M.; Glock, C.: Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb-Richtlinie. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 22-32. doi.org/10.1002/best.202400076.
- [27] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Wege zum Effizienzhaus Plus – Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin. Ausgabe November 2018.
- [28] Krohn, J.; Carrigan, S.; Friedrich, T. et al.: Implementierung neuartiger PCM-Speicher in TRNSYS zur Deckung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs. In: BauSim Conference, BauSim Conference Proceedings. IBPSA-Germany and Austria, 2022.
- [29] Schröter, B.; Spiegel, J.; Carrigan, S. et al.: Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems. In: Bauphysik 45 (2023), Heft 5, S. 245-251. doi.org/10.1002/bapi.202300014.
- [30] Hartner, M.; Carrigan, S.; Kornadt, O. et al.: Normatives vs. realistisches Lüftungsverhalten. In: Bauphysik 43 (2021), Heft 3, S. 148-153. doi.org/10.1002/bapi.202100010.
- [31] Peng, Z.; Carrigan, S.; Kornadt, O.: Investigation of the influence of different room geometries and wall thermal transmittances on the heat transfer in rooms with floor heating. In: Energy and Buildings 317 (2024), S. 114391. doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114391.
- [32] RPTU, Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung: Verfahren zur Bemessung des sommerlichen Wärmeschutzes unter Berücksichtigung der zukünftigen Klimaentwicklung, https://bauing.rptu.de/ags/bauphysik/forschung/aktuelle-projekte/verfahren-zur-bemessung-des-sommerlichen-waermeschutzes-unter-beruecksichtigung-der-zukuenftigen-klimaentwicklung [Zugriff am: 10.02.2025].
- [33] Deutscher Wetterdienst: Testreferenzjahre (TRY), www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html [Zugriff am: 12.06.2024].
- [34] Steiner, T.; Liu, S.: Interconnected model with distributed thermal comfort for model based shading control. In: Energy and Buildings 253 (2021), S. 111530. doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111530.
- [35] Ganji Kheybari, A.; Steiner, T.; Liu, S. et al.: Controlling Switchable Electrochromic Glazing for Energy Savings, Visual Comfort and Thermal Comfort: A Model Predictive Control. In: CivilEng 2 (2021), Heft 4, S. 1019-1051. doi.org/10.3390/civileng2040055.
- [36] EnArgus: EnerReg – Energiemanagement mit Hilfe der modellprädiktiven Regelung für Mischnutzungsgebäude in ländlichen Regionen, www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=Rheinland-PF%C3%A4l%20Technische%20Universit%C3%A4t%20Kaiserslautern-Landau&v=10&p=6&s=11&id=2662725 [Zugriff am: 13.07.2024].
- [37] Glock, C.; Müller, R.; Kurz, W.; et al.: Reversible, kreislauffähige Holz-Beton-Verbunddecke. BFT International, Heft 5, Gütersloh: Bauverlag GmbH Ausgabe 2024.
- [38] Peifer, P.; Thiele, C.: Fire behaviour of timber-concrete composite constructions under fire exposure. In: Proceedings of the 13th International Conference on Structures in Fire (SIF'24), 2024, S. 213-224.
- [39] Seck, C.; Kurz, W.: Entwicklung eines neuartigen selbstschließenden Klick-Anschluss-Systems zur Übertragung von Schub- und Normalkräften – Proceedings 21. DAST-Kolloquium, S. 94-99, Kaiserslautern. Ausgabe 2018.
- [40] Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N. et al.: Attention is All you Need. In: I. Guyon; U. Von Luxburg; S. Bengio et al. (Hrsg.): Advances in Neural Information Processing Systems. Curran Associates, Inc, 2017.
- [41] OpenAI; Achiam, J.; Adler, S. et al.: GPT-4 Technical Report Ausgabe März 2023.
- [42] Habtegebrail, T.; Jampani, V.; Gallo, O. et al.: Text2MPI: Learning to generate multi-plane images from text, arxiv.org/pdf/2207.10642 [Zugriff am: 22.01.2025].
- [43] Habtegebrail, T.; Jampani, V.; Gallo, O. et al.: Generative View Synthesis: From Single-view Semantics to Novel-view Images, Thirty-fourth Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS-2020).
- [44] Xu, X.; Jayaraman, P.K.; Lambourne, J.G. et al.: Hierarchical Neural Coding for Controllable CAD Model Generation, 2023, arxiv.org/pdf/2307.00149 [Zugriff am: 22.07.2025].
- [45] Xu, X.; Lambourne, J.G.; Jayaraman, P.K. et al.: BrepGen: A B-rep Generative Diffusion Model with Structured Latent Geometry, 2024, http://arxiv.org/pdf/2401.15563 [Zugriff am: 22.07.2025].
- [46] Boje, C.; Guerrero, A.; Kubicki, S. et al.: Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. In: Automation in Construction 114 (2020), S. 103179. doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179.
- [47] Guttkonda, S.; Rambach, J.: Single Frame Semantic Segmentation Using Multi-Modal Spherical Images. In: 2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, Waikoloa, HI, USA, 2024, S. 3210-3219.
- [48] Lin, Y.; Su, Y.; Nathan, P. et al.: HiPose: Hierarchical Binary Surface Encoding and Correspondence Pruning for RGB-D 6DoF Object Pose Estimation. In: 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, Seattle, WA, USA, 2024, S. 10148-10158.
- [49] Tang, X.; Heng, J.; Kaewunruen, S. et al.: Artificial Intelligence-Powered Digital Twins for Sustainable and Resilient Engineering Structures/ KI gestützte digitale Zwillinge für nachhaltige und widerstandsfähige technische Bauwerke. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 09, S. 270-276. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-09-36.
- [50] Tschickardt, T.; Kaufmann, F.; Glock, C.: Lean and BIM based flight planning for automated data acquisition of bridge structures with LiDAR UAV during construction phase. In: Proceedings of the 2022 European Conference on Computing in Construction, Computing in Construction. University of Turin, 2022.
- [51] Tschickardt, T.; Swoboda, A.; Glock, C. et al.: Marktdurchdringung von Drohnen und Herausforderungen beim Einsatz im Bauwesen. In: Bau-technik 102 (2025), Heft 4, S. 215-223. doi.org/10.1002/bate.202400080.
- [52] Carrigan, S.; Kornadt, O.; Shklyar, I. et al.: Kombination von Thermografieaufnahmen mit numerischen Strömungssimulationen zur Bestimmung des Volumenstroms durch Leckagen. In: Bauphysik 38 (2016), Heft 4, S. 222-230. doi.org/10.1002/bapi.201610019.
- [53] Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (FG Baubetrieb und Bauwirtschaft/AG Robotersysteme) und Fraunhofer IESE/ITWM: Infra-Bau 4.0: Dynamische, semiautomatische Umlplanung in Infrastrukturbauprojekten – Gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr, www.infra-bau.com [Zugriff am: 21.07.2025].
- [54] Vierling, A.; Groll, T.; Meckel, D. et al.: Excavation pits—progress estimation and cause of delay identification. In: Construction Robotics 7 (2023), Heft 1, S. 53-63. doi.org/10.1007/s41693-023-00094-7.
- [55] Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (FG Baubetrieb und Bauwirtschaft/AG Robotersysteme) und Fraunhofer IESE/ITWM: Digital Construction Management (DiCoMa) – Gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr, www.infra-bau.com/dicom/ [Zugriff am: 21.07.2025].
- [56] Wolf, P.; Groll, T.; Hemer, S. et al.: Evolution of Robotic Simulators: Using UE 4 to Enable Real-World Quality Testing of Complex Autonomous Robots in Unstructured Environments. In: Proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SCITEPRESS – Science and Technology Publications, Lieusaint – Paris, France, 2020, S. 271-278.
- [57] Groll, T.: A hierarchical approach for autonomous planning and execution of excavation tasks, Verlag Dr. Hut, Dissertation.
- [58] Wolf, P.; Vierling, A.; Ropertz, T. et al.: Advanced scene aware navigation for the heavy duty off-road vehicle Unimog. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 997 (2020), S. 12093. doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012093.
- [59] HumanTech Consortium: Human-centred technologies for a safer and greener construction industry, https://humantech-horizon.eu/ [Zugriff am: 10.02.2025].
- [60] Shu, F.; Wang, J.; Pagani, A. et al.: Structure PLP-SLAM: Efficient Sparse Mapping and Localization using Point, Line and Plane for Monocular, RGB-D and Stereo Cameras. In: 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, London, United Kingdom, 2023, S. 2105-2112.
- [61] Seibold, S.; Müller, J.; Allner, S. et al.: Quantifying wood decomposition by insects and fungi using computed tomography scanning and machine learning. In: Scientific reports, Vol. 12 (2022), Iss. 1, p. 16150. doi.org/10.1038/s41598-022-20377-3.

- [62] Wyrzykowski, M.; Ghourchian, S.; Münch, B. et al.: Plastic shrinkage of mortars cured with a paraffin-based compound – Bimodal neutron/ X-ray tomography study. *In: Cement and Concrete Research* 140 (2021), S. 106289. doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106289.
- [63] [63] Suleiman, A.R.; Zhang, L.V.; Nehdi, M.L.: Quantifying Crack Self-Healing in Concrete with Superabsorbent Polymers under Varying Temperature and Relative Humidity. *In: Sustainability* 13 (2021), Heft 24, S. 13999. https://doi.org/10.3390/su132413999.
- [64] Yuan, J.; Wu, Y.; Zhang, J.: Characterization of air voids and frost resistance of concrete based on industrial computerized tomographical technology. *In: Construction and Building Materials* 168 (2018), S. 975–983. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.117.
- [65] van Steen, C.; Pahlavan, L.; Wevers, M. et al.: Localisation and characterisation of corrosion damage in reinforced concrete by means of acoustic emission and X-ray computed tomography. *In: Construction and Building Materials* 197 (2019), S. 21–29. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.159.
- [66] Li, N.; Zhao, Y.; Xing, Y. et al.: Meso-damage analysis of concrete based on X-ray CT in-situ compression and using deep learning method. *In: Case Studies in Construction Materials* 18 (2023), e02118. doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02118.
- [67] Stamati, O.; Roubin, E.; Andò, E. et al.: Tensile failure of micro-concrete: from mechanical tests to FE meso-model with the help of X-ray tomography. *In: Meccanica* 54 (2019), 4–5, S. 707–722. doi.org/10.1007/s11012-018-0917-0.
- [68] Koudelka, P.; Fila, T.; Rada, V. et al.: In-situ X-ray Differential Micro-tomography for Investigation of Water-weakening in Quasi-brittle Materials Subjected to Four-point Bending. *In: Materials* (Basel, Switzerland), Vol. 13 (2020), Iss. 6. doi.org/10.3390/ma13061405.
- [69] Grzesiak, S.; Barisin, T.; Schladitz, K. et al.: Analysis of the bond behavior of a GFRP rebar in concrete by in-situ 3D imaging test. *In: Materials and Structures* 56 (2023), Heft 9, S. 163. doi.org/10.1617/s11527-023-02247-0.
- [70] Giese, J.; Herbers, M.; Liebold, F. et al.: Investigation of the Crack Behavior of CRC Using 4D Computed Tomography, Photogrammetry, and Fiber Optic Sensing. *In: Buildings* 13 (2023), Heft 10, S. 2595. doi.org/10.3390/buildings13102595.
- [71] Liebold, F.; Wagner, F.; Giese, J. et al.: Damage Analysis and Quality Control of Carbon-Reinforced Concrete Beams Based on In Situ Computed Tomography Tests. *In: Buildings* 13 (2023), Heft 10, S. 2669. doi.org/10.3390/buildings13102669.

Prof. Dirk Bayer

dirk.bayer@rptu.de

**Prof. Dr. rer. nat.
Karsten Berns**

kartsen.berns@rptu.de

**apl. Prof. Dr. rer. nat.
Svenja Carrigan**

svenja.carrigan@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Christian Glock

christian.glock@rptu.de

Fabian Kaufmann, M.Eng.

fabian.kaufmann@rptu.de

**Prof. Dr.-Ing.
Karsten Körkemeyer**

k.koerkemeyer@rptu.de

**Prof. Dr. rer. nat.
Oliver Kornadt**

oliver.kornadt@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kurz

wolfgang.kurz@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Steven Liu

steven.liu@rptu.de

Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

matthias.pahn@rptu.de

**Prof. Dr.-Ing.
Hamid Sadegh-Azar**

hamid.sadegh-azar@rptu.de

RPTU Kaiserslautern-Landau
Gottlieb-Daimler-Straße 48, 67663 Kaiserslautern
www.bauenderzukunft.org

Prof. Dr. Didier Stricker

didier.stricker@dfki.de

RPTU Kaiserslautern-Landau
Gottlieb-Daimler-Straße 48, 67663 Kaiserslautern
www.bauenderzukunft.org

German Research Centre for Artificial Intelligence (DFKI)
Trippstadter Straße 122, 67663 Kaiserslautern

**apl. Prof. Dr.-Ing.
Catherina Thiele**

catherina.thiele@rptu.de

RPTU Kaiserslautern-Landau
Gottlieb-Daimler-Straße 48, 67663 Kaiserslautern
www.bauenderzukunft.org