

BBSR-
Online-Publikation
33/2024

Entwicklung von Holzbau- systemen für Bauprozesse mittels verteilter Robotik

von

Samuel Leder
Nicolas Kubail Kalousdian
Prof. Achim Menges



Entwicklung von Holzbausystemen für Bauprozesse mittels verteilter Robotik

Beispiel der Herstellung und Montage von abnehmbaren, wiederverwendbaren,
unvermischten und funktional angepassten Holzkonstruktionen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.48

Projektlaufzeit: 01.2021 bis 12.2022

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Jan Weckendorf
jan.weckendorf@bbr.bund.de

Autoren

Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Prof. Achim Menges (Projektleitung)

Samuel Leder
samuel.leder@icd.uni-stuttgart.de

Nicolas Kubail Kalousdian
nicolas.kubail-kalousdian@icd.uni-stuttgart.de

Korrektorat

Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Thomas Lesch

Stand

Dezember 2022

Gestaltung

Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Samuel Leder
Nicolas Kubail Kalousdian

Bildnachweis

Titelbild: Universität Stuttgart (ICD, Samuel Leder)

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Leder, Samuel; Kubail Kalousdian, Nicolas; Menges, Achim, 2024: Entwicklung von Holzbausystemen für Bauprozesse mittels verteilter Robotik: Beispiel der Herstellung und Montage von abnehmbaren, wiederverwendbaren, unvermischten und funktional angepassten Holzkonstruktionen. BBSR-Online-Publikation 33/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
Einführung	9
(Automatisierung im) Holzbau	9
(Automatisierung im) Holzbau mittels verteilter Robotik	10
Problemstellung	12
Stand der Forschung	12
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	14
Zielstellung	15
Übergeordnete Projektziele	15
Konkrete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu	15
Forschungsdesign	16
Arbeitshypothesen	16
Methodischer Ansatz	16
Projektteam und Organisation	16
Arbeitspakete	17
Projektverlauf	19
Übersicht	19
Beschreibung der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von verteilter Robotik im Holzbau	19
<i>Identifizierung und Charakterisierung bestehender Holzbausysteme (AP 1.1)</i>	19
<i>Prozessanalysen für den automatisierten Holzbau (AP 1.2)</i>	25
<i>Prozessanalysen für bestehende verteilte Robotersysteme (AP 1.3)</i>	26
<i>Zusammenfassung (AP 1) und Meilensteindiskussion (MS 1)</i>	29
Framework für den Einsatz von verteilten Robotersystemen für den Holzbau	29
<i>Analyse maßgeblicher Normen und Bestimmungen und Integration relevanter Parameter in das Baukonzept (AP 2.1)</i>	29
<i>Integration relevanter Roboterparameter in das Baukonzept (AP 2.2)</i>	30
<i>Integration relevanter Materialparameter in das Baukonzept (AP 2.3)</i>	32
<i>Zusammenfassung (AP 2) und Meilensteindiskussion (MS 2)</i>	35
Methoden zur Entwicklung des Holzbaus mittels verteilter Robotik aus den verschiedenen Hierarchien der Baukonstruktion (d.h. Verbindung, Bauelement und Baugruppe)	39
<i>Identifikation von Computerentwurfsprozessen (AP 3.1)</i>	40
<i>Entwicklung von Füge- und Verbindungsprinzipien (AP 3.2)</i>	41
<i>Entwicklung der Einzelteilausbildung (AP 3.3)</i>	50
<i>Entwicklung der Baugruppenausbildung (AP 3.4)</i>	52
<i>Verbindung mit anderen Gebäudesystemen und Automatisierungssystemen (AP 3.5)</i>	66
<i>Zusammenfassung (AP 3) und Meilensteindiskussion (MS 3)</i>	77
Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	77
Ergebnisse	78
Beispielhaftes Prototyping, Evaluierung und Testung (AP 4)	78
<i>Bau des Baugruppen-Demonstrators</i>	78
<i>Weitere Baugruppentests</i>	83

<i>Prototyping und Prüfung eines Schraubeneffektors</i>	84
Diskussion und Meilensteindiskussion (MS 4)	86
<i>Durchführbare Strukturen</i>	86
<i>Kosten und Systeminfrastruktur</i>	87
<i>Zeit</i>	88
<i>Genauigkeit</i>	88
<i>Robustheit</i>	89
<i>Effizienz und Leistungsfähigkeit</i>	90
Schlusswort	91
Weitere Forschungsrichtungen	93
Mitwirkende	94
Kurzbiographien	95
Literaturverzeichnis	97
Abbildungsverzeichnis	105
Tabellenverzeichnis	108

Kurzfassung

Im Zuge der hohen Nachfrage nach neuen Baumaßnahmen und der großen Auswirkungen, die das Bauen auf die Umwelt haben kann, wurde die Forschung zur Automatisierung des Bauwesens intensiviert. Der Grund dafür ist, dass die Einführung von Robotik und Automatisierung im Bauwesen potenziell eine effizientere, nachhaltigere und kostengünstigere Bauweise ermöglicht. Obwohl es viele Ansätze für die Automatisierung des Bauwesens mit Robotern unterschiedlicher Größe gibt, ist die Anwendung mobiler, verteilter Robotersysteme für den Bausektor, bekannt als *Collective Robotic Construction* (CRC), ein wachsender Bereich, der zunehmend mehr Aufmerksamkeit erhält.

Aufgrund des technologischen Fortschritts, der eine genauere Positionierung, Umgebungserfassung und fundierte autonome Entscheidungsfindung ermöglicht, werden autonome Kleinmaschinen, die im Vergleich zu Industrierobotern nicht an die Beschränkungen der festen Positionierung, des Gewichts, der Reichweite und des Stromverbrauchs gebunden sind, für den Einsatz in der Bauautomatisierung immer interessanter. Der Einsatz verteilter Robotersysteme, bei denen die benötigten Maschinen in einen Koffer passen, auf Baustellen würde jedoch eine Veränderung des derzeitigen Stands der Baukonstruktion erfordern. Wenn verteilte Robotersysteme für die Baustelle in Betracht gezogen werden, ergeben sich eine Reihe neuer Forschungsfragen. Dazu gehören unter anderem Fragen des Designs, der Hardware und der Roboterbahnplanung. Solche Systeme stellen das Gesamtdesign und den Betrieb eines Gebäudes infrage, da die Maschinen, die sie zusammenbauen, die von ihnen gebaute Struktur nutzen können, was weitere Möglichkeiten für ihre Gestaltung eröffnet.

Ziel dieses Projekts war es daher, Grundlagenforschung zu betreiben, um einige der zentralen Forschungsfragen aus dem aufstrebenden Forschungsfeld der verteilten Robotersysteme für das Bauwesen zu beantworten. Innerhalb dieses größeren Kontextes konzentrierte sich dieses Projekt auf die Anwendung eines verteilten Robotersystems aus der Sicht des Bauwesens, was als eine Lücke in den aktuellen Untersuchungen auf diesem Gebiet identifiziert wurde. Die meisten anderen Forschungsarbeiten befassen sich mit nicht-architektonischen und nicht-strukturellen Baumaterialien, bei denen es sich bei den gebauten Ergebnissen eher um den Nachweis von Konzepten als um eine echte Gebäudekonstruktion handelt. Um die Anwendung verteilter Robotersysteme in der Industrie zu realisieren, muss auch die Frage, was gebaut wird, in den Mittelpunkt rücken.

Um die Forschung weiter zu konkretisieren, wurde der Holzbau mithilfe eines verteilten Robotersystems untersucht. Holz wurde ausgewählt, weil es ein leichtes, nachhaltiges und leicht zu bearbeitendes Material ist, mit dem kleine Maschinen arbeiten können. Außerdem bieten die Holzindustrie und die aktuellen Standards des Holzbaus einen Hintergrund für die Entwicklung und Bewertung der Anwendung solcher neuartigen Systeme für den Hochbau.

Um das Hauptziel zu erreichen, reale Gebäudekonstruktionen zu untersuchen, die mit Hilfe von verteilten Robotersystemen montiert werden können, wurde die Forschung wie folgt strukturiert:

- Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes verteilter Robotik im Bauwesen.
- Erfassen der Komplexität und Zusammenhänge für die Entwicklung und den Einsatz verteilter robotischer Bausysteme, speziell für den Holzbau.
- Erforschung des Holzbaus mittels verteilter Robotik aus den verschiedenen Hierarchien des Bauens (z.B. Verbindung, Bauteil und Baugruppe).
- Vorführung der Montage einer realen Gebäudekonstruktion mithilfe von verteilten Robotern.

Die methodische Untersuchung dieser Themen erfolgte durch eine Literaturrecherche, eine systematische Parametrisierung des Untersuchungsgebiets, die Entwicklung von Methoden für den Entwurf und die Abfolge von Gebäudekonstruktionen auf den verschiedenen Hierarchieebenen und die Ausführung eines endgültigen Gebäudedemonstrators. Der finale Demonstrator zeigte die Fähigkeit kleiner, autonomer Maschinen,

Strukturen zu errichten, die viel größer sind als die Maschinen selbst. Die Forschung hat damit begonnen, zu zeigen, wie diese neue Art von Automatisierungssystem im realen Bauwesen eingesetzt werden kann. Obwohl einige der vorgestellten Methoden spezifisch für das verteilte Robotersystem sind, das für die Enddemonstration verwendet wurde, können und sollten sie für andere Robotersysteme angepasst werden. Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Forschung sollte als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dienen, wie verteilte Robotersysteme in andere Bauprozesse integriert werden können.

Um aus der Laborumgebung auszubrechen, in der die derzeitigen Studien über verteilte Robotersysteme für das Bauwesen durchgeführt werden, ist es erforderlich, sich weiterhin mit den vielen neuen Fragen auseinanderzusetzen, die das Automatisierungssystem aufwirft.

Abstract

Since the 1970s, there has been a growing interest in the robotic automation of construction due to potential of reducing cost, increasing efficiency and leading to more sustainable construction. Although there has been many approaches to the automation of construction including the automation of heavy duty construction equipment to on-site prefabrication factories, recent advances in technology are allowing for a new approach to construction automation called distributed robotic systems ("distributed robotics"). The term refers to a large number of small, agile construction robots that can produce complex, functionally adapted assemblies from individual parts in highly parallel processes. As this represents a fundamentally different approach to not only automation in construction but the general approach to architecture and construction, there are still major research questions that need to be addressed in order to understand and eventually realize the approach in industry. Therefore, this project focuses on research into manufacturing and assembly processes using such distributed robotic systems.

The advantage of distributed robotics is that the machines are small and inexpensive, and therefore can be operated in parallel in large numbers. From a large number of identical parts, context- functionally-adapted and thus resource-saving building structures can be built and then deconstructed into the reusable, generic individual parts. In order to exploit the potential of these emerging robotic technologies for the construction industry, fundamental research is needed on building systems and construction methods that are genuinely designed for such radically different construction processes. The goal of this project is to explore the fundamental features and characteristics for building systems that unlock the potential of distributed robotics for construction. The project will specifically focus on timber construction as timber is not only a promising material when considering sustainability in construction but automation in timber construction serves a backdrop for comparison to other automation approaches.

The research findings discuss and demonstrate with real prototypes the possibilities and limitations of using distributed robotics from a building construction perspective, introduce a framework for understanding the implication for working with distributed robotic construction systems for timber construction as well as present novel methods for designing and sequencing building constructions assembled by teams of mobile robots.

Einführung

(Automatisierung im) Holzbau

Obwohl der Anteil von Gebäuden aus Holz im letzten Jahrhundert zurückgegangen ist, steigt das Interesse an Holz als Baustoff seit den 1990er Jahren stetig an (Harsta/van der Lugt 2020). Auch gibt es weltweit immer mehr Holzbauten, nicht nur in Regionen, in denen Holz schon seit langem im Bauwesen verwendet wird. Dafür gibt es eine Vielfalt von Gründen (**Abbildung 1**) (Svatoš-Ražnjevic/Orozco/Menges 2022). Zum einen ist Holz ein natürliches und nachwachsendes Material. Im Zuge des weltweit gestiegenen Umweltbewusstseins und des besseren Verständnisses der negativen Auswirkungen des Bauens auf die Umwelt kann Holz als nachhaltige Alternative zu anderen Materialien wie Stahl oder Beton dienen. Der zweite wichtige Grund für die breitere Anwendung und Verfügbarkeit des Holzbaus ist die allgemeine Industrialisierung und die weitere Einführung digitaler Technologien im Holzbau. Dies hat sich in der Einführung von leichten und dennoch strukturell leistungsfähigen, modifizierten Holzarten und Massivholzbausystemen sowie in der Anwendung von computergestützten Entwurfs- und digitalen Fertigungstechniken im Holzbau manifestiert.

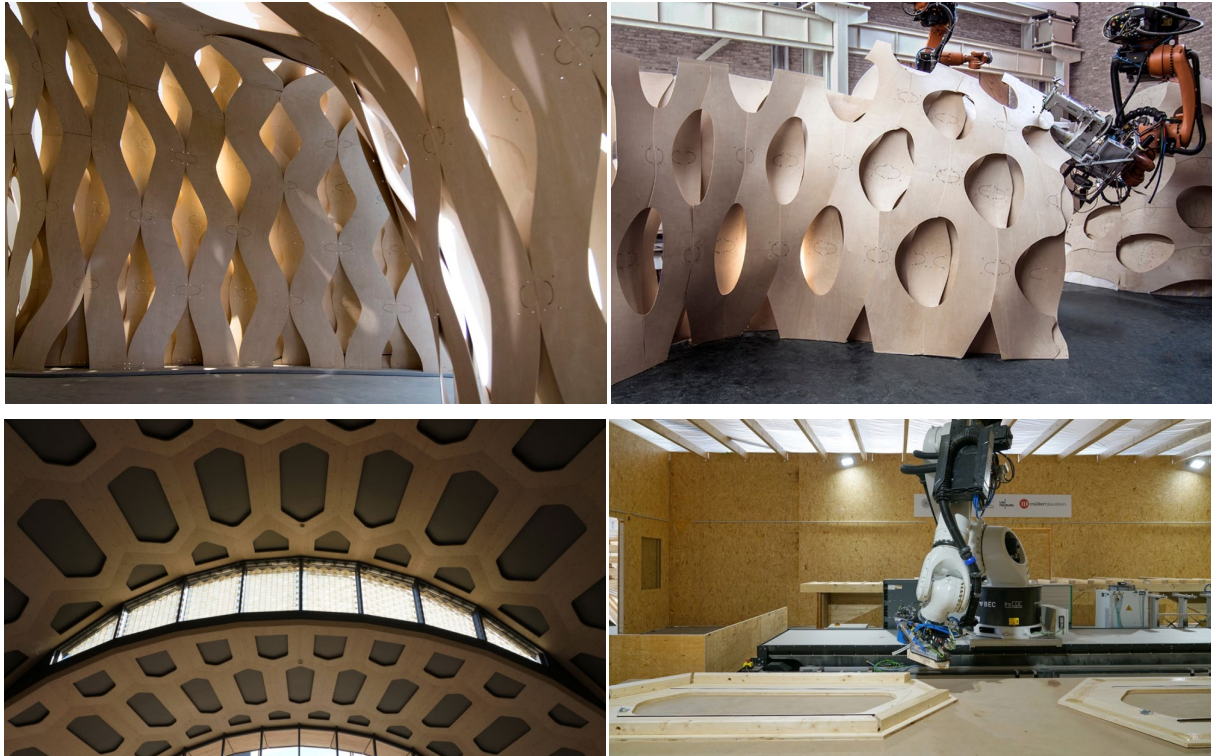
Abbildung 1: 350 Holzbau-Projekte, die zwischen 2000 und 2021 gebaut werden



Forschungen an verschiedenen Universitäten auf der ganzen Welt zeigen derzeit, wie die Einführung neuer Technologien zu effizienteren, nachhaltigeren und kostengünstigeren Holzstrukturen führen kann (Menges/Schwinn/Krieg 2016). Dies hat zu vielen gebauten Beispielen geführt, darunter ein großes, strukturell leistungsfähiges Dach, das aus Baugruppen aus kleinen, minderwertigen Hölzern hergestellt wurde, die sonst nicht im Bauwesen verwendet werden, eine Holzplatte, die teilweise mit Hilfe einer mobilen Roboterplattform montiert wurde, und verschiedene Strukturen, die aus rohem Holzmaterial unter Anwendung von Big-Data-Strategien zusammen mit cyber-physischen Fertigungsschleifen hergestellt wurden (Wilmann et al. 2016; Chai et al. 2022; Chen et al. 2009). An der Universität Stuttgart wurde insbesondere die robotergestützte Vorfertigung von Bauteilen für die Montage großer Holzkonstruktionen untersucht (**Abbildung 2**). Diese Projekte zeigen den Querschnitt der robotergestützten Automatisierungsansätze, die derzeit für die Montage im Holzbau untersucht werden. Dazu gehören Portalsysteme, mobile Plattformen mit Roboterarmen und

stationäre Industrieroboterarme. Jeder Ansatz bietet unterschiedliche Stärken und Schwächen, wenn er im gesamten Herstellungs- und/oder Bauprozess betrachtet wird.

Abbildung 2: Zwei Holzbauprojekte der Universität Stuttgart, die innovative Technologien in die Herstellungs- und/oder Konstruktionsprozesse des Holzbaus integrieren: ICD Sewn Timber Shell 2017 (oben links) und, livMatS Biomimetic Shell (oben rechts).



Quelle: Oben links (ICD, University of Stuttgart), oben rechts (ICD, University of Stuttgart), unten links (ICD/ITKE/IntCDC, University of Stuttgart) und unten rechts (ICD/ITKE/IntCDC, University of Stuttgart)

(Automatisierung im) Holzbau mittels verteilter Robotik

Parallel zur Erforschung digitaler Technologien im Holzbau sind verteilte Robotersysteme ("distributed robotics") ein wachsender Bereich der Roboterforschung. Verteilte Robotersysteme bestehen in der Regel aus mobilen Robotermaschinen, die relativ klein, verhältnismäßig günstig, leicht transportierbar und in der Lage sind, sich in ihrer Umgebung zu bewegen. Diese Roboter nutzen ihre verteilte Intelligenz, um komplexe Aufgaben zu bewältigen, die eine einzelne Maschine nicht allein bewältigen kann. Ein Beispiel für solche verteilten Robotersysteme wurde von Kiva Systems entwickelt, das heute als Amazon Robotics bekannt ist. Ihr System verwendet mobile Roboter, um die Umlagerung und Auslieferung von Waren in Verteilzentren zu automatisieren (**Abbildung 3**).

Abbildung 3: Ein Beispiel für ein verteiltes Robotersystem von Scallog, das in Lagereinrichtungen eingesetzt wird

Quelle: Scallog

In jüngster Zeit wird die Anwendung der verteilten Robotik auf die Automatisierung des Bauwesens angewandt und trägt den Namen *Collective Robotic Construction* (CRC) (Petersen et al. 2019). Bei CRC setzen die Roboter ihre Intelligenz ein, um Strukturen zu montieren, die viel größer sind als die einzelnen Maschinen selbst. Aufgrund des technologischen Fortschritts werden solche autonomen kleinen Maschinen, die im Vergleich zu Industrierobotern nicht an eine feste Positionierung, ein bestimmtes Gewicht, eine bestimmte Reichweite und einen bestimmten Hochspannungsverbrauch gebunden sind, auch in der Bauautomatisierung immer häufiger zum Einsatz kommen. Die Forschung müsste sich jedoch mit Fragen des realen Bauwesens befassen, um die Anwendung verteilter Robotersysteme in der Industrie wirklich realisieren zu können.

Daher soll das hier dargestellte Projekt sowohl zur Forschung über CRC als auch über die Automatisierung im Holzbau beitragen. Aus der Perspektive des Holzbau wurde untersucht, welche Strukturen mit diesem radikal neuen Ansatz gebaut werden können, insbesondere im Vergleich zu anderen Robotersystemen. Aus der CRC-Perspektive wurden im Rahmen des Projekts Fragen des realen architektonischen Bauens mit dem Werkstoff Holz untersucht. Letztendlich besteht das Ziel des Projekts darin, die grundlegenden Merkmale und Eigenschaften von Bausystemen zu untersuchen, die das Potenzial der verteilten Robotik für die Bauindustrie freisetzen können.

Problemstellung

Stand der Forschung

Forscher erproben derzeit CRC-Systeme mit einer Reihe von Roboterarten und handelsüblichen Materialien, um die Fähigkeit mehrerer kleiner Robotersysteme zur Konstruktion von architektonischen Objekten zu demonstrieren (Petersen et al. 2019) (**Abbildung 4**). Die Materialien reichen von maßgefertigten Ziegeln über Kunststoff-voxel bis hin zu Filament und Schaumstoff. Zu den Robotern in diesem Bereich gehören in der Regel Luft- und Bodenroboter sowie einige wenige Beispiele von schwimmenden Robotern. Das am Wyss-Institut in Harvard entwickelte TERMES-Projekt zeigt, wie kleine, kostengünstige Maschinen mit von der Natur inspirierten Steuerungslogiken Strukturen aufbauen können, die viel größer sind als die Maschinen selbst (Petersen/ Nagpal/ Werfel 2011). Ein Projekt des MIT erforscht, wie Fachwerkstrukturen mit Hilfe von Robotern gebaut werden können, die auf der von ihnen gebauten Struktur klettern können (Yoon/ Rus 2007). Forschungsarbeiten des Instituts für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) an der Universität Stuttgart untersuchten das Co-design von maßgeschneidertem Baumaterial zusammen mit einer Drohne, um eine Überdachungsstruktur zu bauen (Wood et al. 2019).

Abbildung 4: Eine Sammlung von CRC-Projekten, bei denen eine Reihe von kleinen Robotern und verschiedene Baumaterialien zum Einsatz kommen.



Quelle: Integrative Technologies & Architectural Design Research M.Sc. Program (ITECH), Universität Stuttgart
oben links (Maria Wyler, 2019), oben rechts (Mathias Maierhofer, Valentina Soana, 2018), unten links (Maria Yablonina, 2015), unten rechts (Lasath Siriwardena, Simon Lut and Tim Stark, 2020)

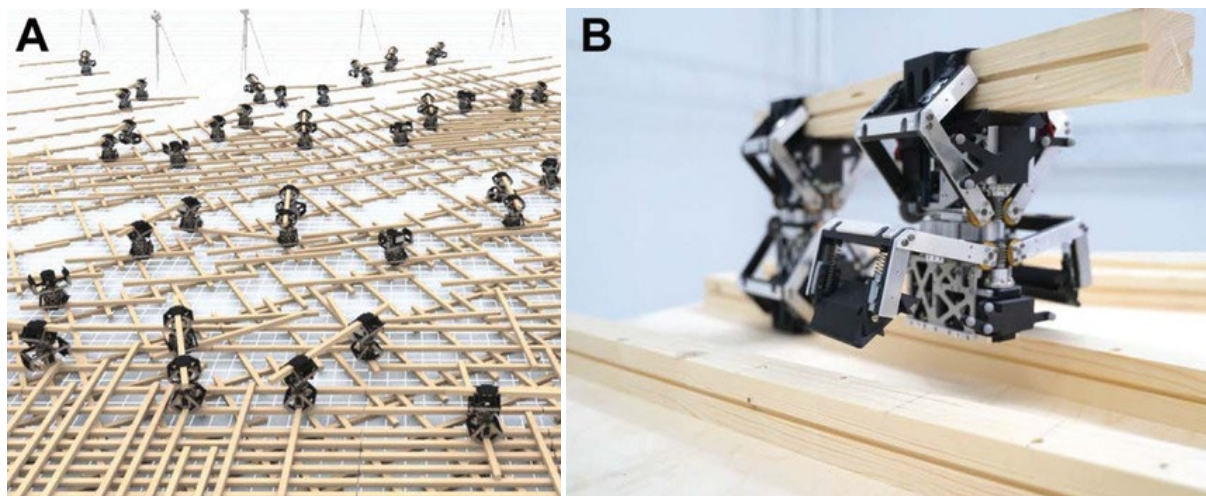
Diese Projekte befassen sich zwar mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Forschungsfragen, aber die meisten verwenden nur eine einzige Art von Konstruktionsverfahren und befassen sich, wenn sie skaliert werden, nicht mit Fragen der Kosten und der strukturellen Stabilität. Insbesondere ist die Materialwahl in vielen Projekten nicht architektonisch und nicht strukturell und dient daher als Ersatz für die Erforschung anderer Themen innerhalb des größeren Bereichs der kollektiven Roboterkonstruktion.

Das Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) hat jedoch kürzlich gemeinsam mit dem Physical Intelligence Department vom Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme und der Intelligent System Group der Technischen Universität Berlin die Anwendung von Holzbau-elementen in einem neuartigen CRC-

System untersucht. Die Forschung war Teil des Exzellenzclusters Integratives computerbasiertes Planen und Bauen für die Architektur (IntCDC) und trug den Titel "Leveraging the Building Material as Part of the Robotic Kinematic System for Parallel Construction" (Robotic Kinematic System for Parallel Construction, 2019). Die Forschung konzentrierte sich auf die Entwicklung eines verteilten robotischen Konstruktionssystems, welches aus maßgeschneiderten Robotern und Holzstreben besteht. Die Roboter verfügen über eine einzige Rotationsachse, was bedeutet, dass sie sich nicht selbständig fortbewegen können. Daher müssen sich die Roboter an den Holzstreben festhalten, um kinematische Ketten zu bilden, die den Roboterarmen ähneln, wodurch sie Holzstrebenstrukturen zusammensetzen können.

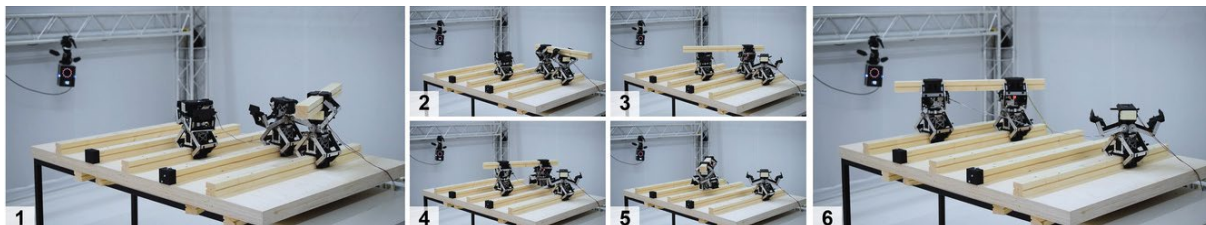
Diese Forschung mündete in einer Demonstration der wichtigsten Fähigkeiten des Systems, die für die Montage von Strukturen mit dem entwickelten verteilten robotischen Bausystem erforderlich sind (**Abbildung 5**). Dazu gehörten fünf Demonstrationen, die drei Bauaufgaben beschreiben: *Bewegung*, *dynamische kinematische Ketten* und *Transport* (Leder et al. 2022). Bei der *Bewegung* ging es darum, die Roboter auf der bereits montierten Struktur von einer Position zu einer anderen zu bewegen. Bei der *dynamische kinematische Ketten* werden die Komponenten der kinematischen Kette neu angeordnet (**Abbildung 6**). Diese Änderung reicht von einer kinematischen Kette eines einzelnen Roboters über eine Kette eines Roboters mit einer Strebe bis hin zu einer Kette aus zwei Robotern mit einer Strebe. Die letzte Aufgabe, der *Transport*, beschreibt, wie der Montageprozess funktionieren würde. Vier Roboter arbeiten zusammen, um eine Holzstrebe in eine Position für die Montage zu bringen.

Abbildung 5: Ein verteiltes Roboter-Konstruktionssystem, bei dem ein einachsiger Roboter die Baumaterialien für die Konstruktion nutzt und gleichzeitig Teil des kinematischen Robotersystems ist. Die linke Seite zeigt eine digitale Darstellung des Systemkonzepts und die rechte Seite ein Foto des echten Roboters. Der Roboter ist 138 (Tiefe) × 179 (Breite) × 309,5 (Höhe) [mm] groß, wenn beide Greifer geschlossen sind.



Quelle: (Leder et al. 2022)

Abbildung 6: Fotosequenzen von der physischen Demonstration der *dynamische kinematische Ketten*



Quelle: (Leder et al. 2022)

Letztendlich wurde die Entwicklung des Robotersystems, seiner Steuerung und der High-Level-Konstruktionsmethoden im Rahmen des Projekts abgeschlossen. Dabei blieb die Frage offen, welche Möglichkeiten sich eröffnen, wenn verteilte Robotik im Holzbau eingeführt wird.

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Wie der derzeitige Stand der Forschung zeigt, wurde die Anwendung verteilter Robotersysteme für das Bauwesen hauptsächlich aus der Sicht der Ingenieure untersucht. Fragen der Vollautomatisierung des Bauwesens bleiben oft unbeantwortet. Fragen hinsichtlich des Materials und der zu bauenden Strukturen werden häufig völlig außer Acht gelassen. Die meisten Forschungsarbeiten gehen davon aus, dass die Struktur den Robotern als „Blueprint“ vorgegeben wird, ohne dass eine Beziehung zwischen dem Entwurf und dem Automatisierungssystem besteht.

Um die verteilte Robotik im realen Bauwesen einsetzen zu können, müssen jedoch die Einschränkungen beim Bau realer Strukturen verstanden und berücksichtigt werden. Eine aktuelle Forschungslücke ist daher die Entwicklung verteilter Robotersysteme für die Bauwirtschaft aus Sicht des Bauwesens und der Architektur.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass es eine Forschungslücke bei der Erforschung verteilter Robotersysteme gibt, bei denen Holz das Baumaterial ist. Obwohl eine Vielzahl von Materialien mit unregelmäßigen Materialeigenschaften erforscht wurde, gibt es noch immer nur wenige Untersuchungen mit Holz.

Zielstellung

Übergeordnete Projektziele

Das übergeordnete Ziel dieses Projekts ist es, einen Beitrag zur Realisierung von verteilten Robotersystemen im Bauwesen zu leisten und durch Grundlagenforschung den Übergang eines aufstrebenden Forschungsgebiets in die reale Architektur- und Baupraxis zu unterstützen. Das Ziel dieses Projekts ist es daher, Grundlagenforschung zu betreiben, um den Übergang eines aufstrebenden Forschungsgebiets in die reale Architektur- und Baupraxis zu unterstützen.

Konkrete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Konkret geht es bei dieser Forschung um die Untersuchung verteilter Robotersysteme im Bauwesen aus der Perspektive der Architektur und des Hochbaus. Das Hauptziel dieser Forschung ist es, verteilte Robotersysteme zu untersuchen, die sich auf dem Baumaterial selbst fortbewegen können, um tragende Strukturen zu konstruieren, die mit anderen Bausystemen verbunden werden können. Die Forschung konzentrierte sich auf den Holzbau, um mögliche Bausysteme zu konkretisieren, die mit verteilten Robotersystemen hergestellt werden können.

Dieses Ziel wurde erreicht, indem folgende Punkte untersucht und angegangen wurden:

- Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes verteilter Robotik im Bauwesen.
- Erfassen der Komplexität und Zusammenhänge für die Entwicklung und den Einsatz verteilter robotischer Bausysteme, insbesondere für den Holzbau.
- Erforschung des Holzbaus mittels verteilter Robotik aus den verschiedenen Hierarchien des Bauens (z.B. Verbindung, Bauteil und Baugruppe).
- Vorführung der Montage einer realen Baugruppe aus Holz mit Hilfe von verteilten Robotern.

Damit soll anderen die Möglichkeit gegeben werden, zur Weiterentwicklung des Holzbaus mittels verteilter Robotersysteme beizutragen und die Gemeinschaft, die an diesem Thema arbeitet, zu vergrößern.

Forschungsdesign

Arbeitshypothesen

Die Arbeitshypothesen wurden von der folgenden Frage abgeleitet:W

Was kann gebaut werden, wenn verteilte Robotermaschinen im Bauprozess von Holzgebäuden eingesetzt werden?

Um besser zu verstehen, wie die verteilte Robotik für den Holzbau eingeführt werden kann und welche Auswirkungen dies auf die Möglichkeiten des Bauens mit Holz hat, wird in diesem Projekt davon ausgegangen, dass zur Nutzung seines Potenzials Grundlagenforschung zu Bausystemen und Baumethoden erforderlich ist, die für solch radikal andere Bauprozesse ausgelegt sind. Die Hypothese dieser Forschung ist, dass die verteilte Robotik in der Lage sein sollte, Strukturen von hoher Komplexität unter Berücksichtigung von Normen und technischen Regeln zu bauen.

Methodischer Ansatz

Die oben genannte Hypothese wurde durch eine Abfolge von vier Unterthemen angegangen, die in ihrer Gesamtheit darauf abzielen, Nachweise für die Hypothese zu liefern und die durch die Hypothese aufgeworfenen Fragen zu beantworten.

Zuerst wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um Bauprozesse durch verteilte Robotersysteme mit bestehenden Baupraktiken zu vergleichen. Dies geschah auf systematische Weise, indem verschiedene Projekte aus der Industrie identifiziert, in entsprechende Sektoren kategorisiert und deren Logik analysiert wurden.

Zweitens wurde anhand der Analyse ein Rahmen für die Entwicklung von Holzbausystemen für Bauprozesse mit verteilter Robotik erstellt. Dazu wurde die Entwicklung in Parametersätze zerlegt: Materialparameter, Roboterparameter und Normparameter und wie diese zueinander in Beziehung stehen, welche Auswirkungen sie aufeinander haben und was das für die Konstruktion bedeutet.

Drittens wurden digitale Methoden zur Entwicklung und Analyse eines Holzbausystems entwickelt, bestehend aus einem bestimmten Satz von Parametern, welche gut mit einem bestimmten verteilten Robotersystem funktionieren. Dies beinhaltete die Spezifikation von Verbindungen und Verbindungsprinzipien, Bauelementen und Baugruppen.

Schließlich wurde ein einzelnes Bausystem getestet, indem ein Demonstrationsbauwerk errichtet wurde. Die Ergebnisse des Demonstrators wurden im Vergleich zu anderen Bau- und Robotersystemen in der Industrie bewertet.

Projektteam und Organisation

Die Untersuchung wurde von einem Forscherteam des Instituts für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) unter der Leitung von Prof. Achim Menges und Senior Researcher Dr.-Ing. Tobias Schwinn durchgeführt.

Das Projekt wurde als assoziiertes Projekt im Rahmen des IntCDC mit dem Titel "Associated Project 14 (AP 14): Wood Building Systems for Distributed Robotics" aufgenommen, was den Zugang zu Einrichtungen des Exzellenzclusters sowie die externe Beratung durch dessen Mitglieder ermöglichte (Wood Building Systems for Distributed Robotics, 2020). Externe Beratung und Mitarbeit bei der Entwicklung der Hardware des Projekts, konkret im Arbeitspaket 3.1 (**AP 3.1**), wurde von Hyun Gyu Kim vom Physical Intelligence Department vom Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme geleistet.

Außerdem haben studentische Hilfskräfte von der Universität Stuttgart die Forschungsarbeit unterstützt.

Arbeitspakete

Das Forschungsprojekt wurde in vier Arbeitspakete unterteilt.

Das erste Arbeitspaket (**AP 1**) versucht, die wichtigsten Prozesseigenschaften von verteilten Robotersystemen im Vergleich zu bestehenden Bautechniken zu identifizieren. Während des Arbeitspakets wurde ein Katalog verschiedener automatisierter und manueller Bauverfahren und der damit verbundenen Eigenschaften erstellt.

Das zweite Arbeitspaket (**AP 2**) befasst sich mit der Parametrisierung des Bauprozesses in Bausysteme, die für die verteilte Roboterontage geeignet sind. Die Analyse der einschlägigen Normen und Vorschriften trug dazu bei, das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen den Parametern zu entwickeln.

Das dritte Arbeitspaket (**AP 3**) konzentrierte sich speziell auf Methoden für die Entwicklung von prototypischen Holzbausystemen in verschiedenen Maßstäben.

Das letzte Arbeitspaket (**AP 4**) schloss das Projekt mit der Durchführung einer physischen Demonstration ab. Forschungsfragen und Hypothesen für die weitere Forschung zur verteilten Baurobotik, die sich aus der Diskussion der Ergebnisse ergeben, waren ebenfalls Teil dieses Arbeitspaketes.

Jedes der Arbeitspakete wurde wie folgt weiter unterteilt:

- **AP 1:** Identifikation und Systematisierung der Bauprozesseigenschaften verteilter robotischer Systeme im Vergleich zu bestehenden Bauprozessen.
 - **AP 1.1:** Identifizierung und Charakterisierung bestehender Bausysteme mit Holz
 - **AP 1.2:** Prozessanalysen für den automatisierten Holzbau
 - **AP 1.3:** Prozessanalysen für bestehende verteilte robotische Konstruktionssysteme
- **AP 2:** Transfer der Bauprozesseigenschaften in geeignete Bausystemeigenschaften und Konstruktionsprinzipien.
 - **AP 2.1:** Analyse maßgeblicher Normen und Bestimmungen und Integration relevanter Parameter in das Baukonzept
 - **AP 2.2:** Integration relevanter Roboterparameter in das Baukonzept
 - **AP 2.3:** Integration relevanter Materialparameter in das Baukonzept
- **AP 3:** Entwicklung eines beispielhaften Holzbausystems gemäß den Bauprozesseigenschaften verteilter robotischer Bausysteme.
 - **AP 3.1:** Identifikation von Computerentwurfsprozessen
 - **AP 3.2:** Entwicklung von Füge- und Verbindungsprinzipien
 - **AP 3.3:** Entwicklung der Einzelteilausbildung
 - **AP 3.4:** Entwicklung der Baugruppenausbildung
 - **AP 3.5:** Verbindung mit anderen Gebäudesystemen und Automatisierungssystemen
- **AP 4:** Beispielhaftes Prototyping, Evaluierung und Testung
 - **AP 4.1:** Demonstratorbau
 - **AP 4.2:** Evaluierung des Demonstrators

In den folgenden Kapiteln wird auf die zu Projektbeginn erstellten Arbeitspakete und die dazugehörigen Meilensteine (**MS 1 – MS 4**) eingegangen.

Projektverlauf

Übersicht

Die Forschung kann in drei Hauptuntersuchungsbereiche zusammengefasst werden, die auf den ersten drei konkreten Projektzielen und den ersten drei Arbeitspaketen (**AP 1-3**) basieren. Diese drei Untersuchungslinien umfassen:

1. Beschreibung der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes verteilter Robotik im Holzbau.
2. Framework für die Erstellung verteilter robotergestützter Bausysteme für den Holzbau.
3. Methoden zur Entwicklung des Holzbaus mittels verteilter Robotik aus den verschiedenen Hierarchien des Bauwesens (d.h. Verbindung, Bauelement und Baugruppe).

Sie werden in den folgenden Unterabschnitten erläutert. Diese beziehen sich auch speziell auf die Unterabschnitte der im vorherigen Kapitel beschriebenen Arbeitspakete.

Beschreibung der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von verteilter Robotik im Holzbau

Die folgenden Ausführungen basieren auf einer Literaturrecherche zu den Themen Holzbau, speziell zur Automatisierung im Holzbau und zur verteilten Robotik. Die in den folgenden Unterkapiteln referenzierte Literatur wurde mit Hilfe von Clarivate's Web of Science¹, Google Scholar² sowie Cumincad³ gesammelt. Web of Science und Google Scholar wurden als allgemeinere bibliografische Datenbanken verwendet, die eine größere Anzahl von Quellen aus einer Vielzahl von Disziplinen enthalten, und Cumincad wurde als bereichsspezifischer bibliografischer Index für den Bereich CAAD verwendet.

Zusammenfassungen der Ergebnisse der Literaturrecherche werden in Kästchendiagrammen mit Nummern dargestellt, die sich auf bestimmte Kategorien beziehen. Auf die Zahlen in den Diagrammen wird im gesamten Text Bezug genommen.

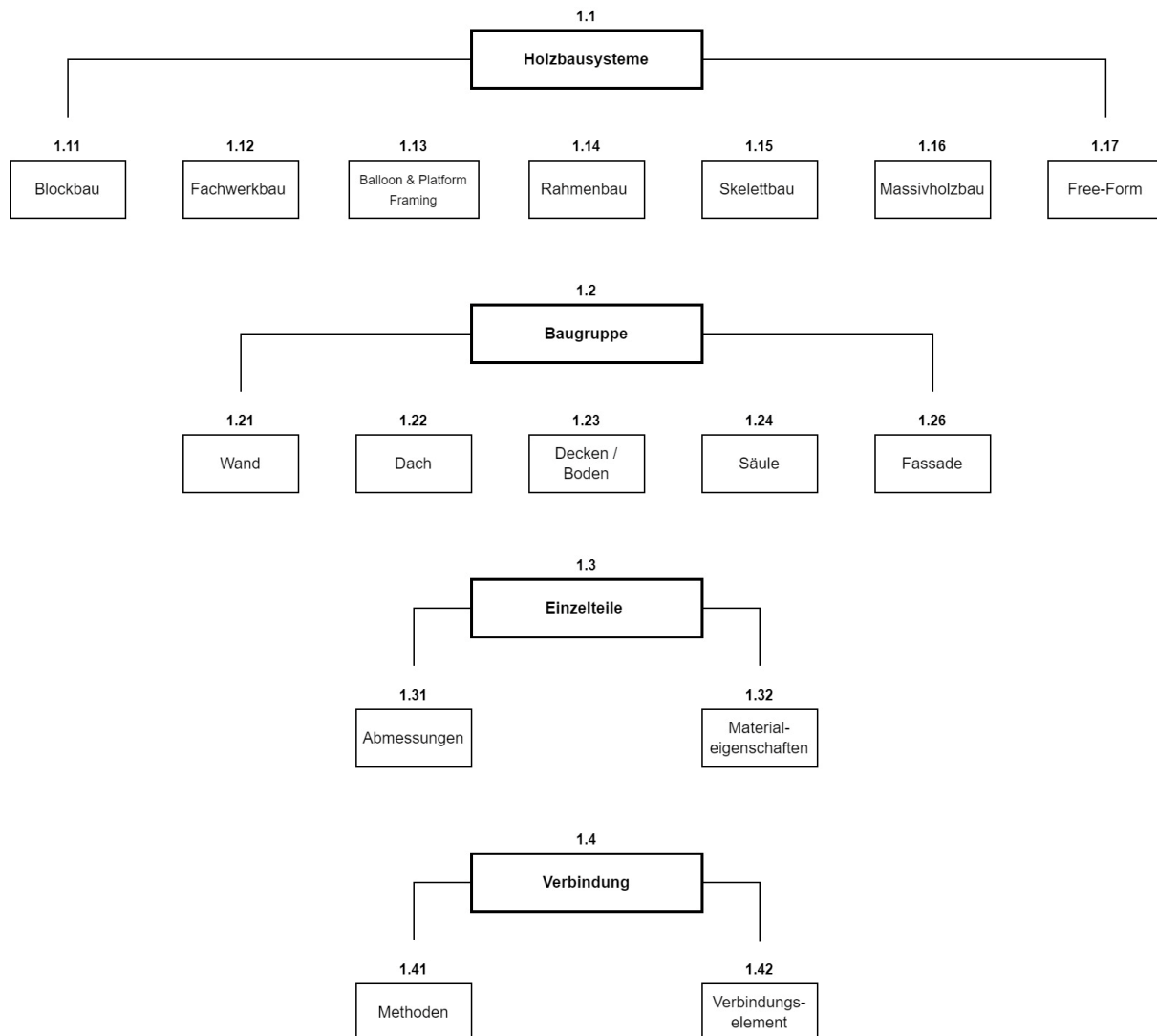
Identifizierung und Charakterisierung bestehender Holzbausysteme (AP 1.1)

Um bestehende Holzbausysteme (1.1) zu charakterisieren (**Abbildung 7**), dient die Terminologie der Fertigungsindustrie als Grundlage, um sie weiter in verschiedene Hierarchieebenen zu gliedern: Baugruppe (1.2), Einzelteile (1.3) und Verbindung (1.4) (DIN EN ISO 10209:2012-11). Diese weiteren Beschreibungen der Bausysteme sind wichtig, um herauszufinden, in welchen Prozessen und mit welchen Holzwerkstoffen die verteilten Robotersysteme arbeiten können. Die folgende Beschreibung beginnt mit der höchsten Ebene der Holzbausysteme und reicht bis zu der kleinsten, den Verbindungen.

¹ <https://www.webofscience.com>

² <https://scholar.google.com>

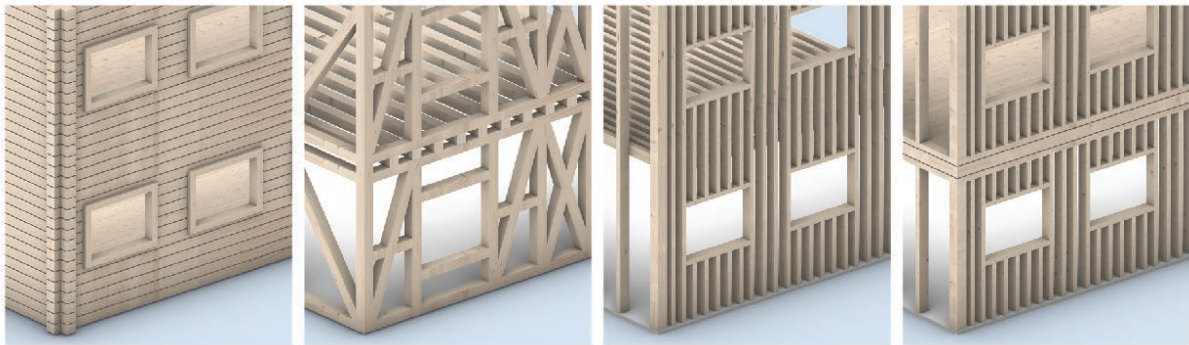
³ <https://papers.cumincad.org>

Abbildung 7: Charakterisierung bestehender Holzbausysteme auf verschiedenen Hierarchieebenen

Der Holzbau (1.1) hat eine lange Geschichte, die bis zu provisorischen Unterkünften aus prähistorischer Zeit zurückreicht. Aus diesem Grund haben sich Holzbausysteme zu einer Reihe von Tragsystemen entwickelt, auf die in Ausbildung, Industrie und Forschung allgemein Bezug genommen wird (Kolb 2008). Jedes dieser Systeme wird durch viele Aspekte definiert, von denen einige die Konstruktionsprinzipien, den Montageprozess, die verwendeten Holzkomponenten, das Design und das Aussehen betreffen. Obwohl der Großteil des Holzbaus aus rechteckigen Formen mit standardisierten Holzeinzelteilen besteht (1.11-1.16), ermöglichen moderne Baumaschinen und -technologien eine größere geometrische Freiheit und die Schaffung von Free-Form Strukturen (1.17).

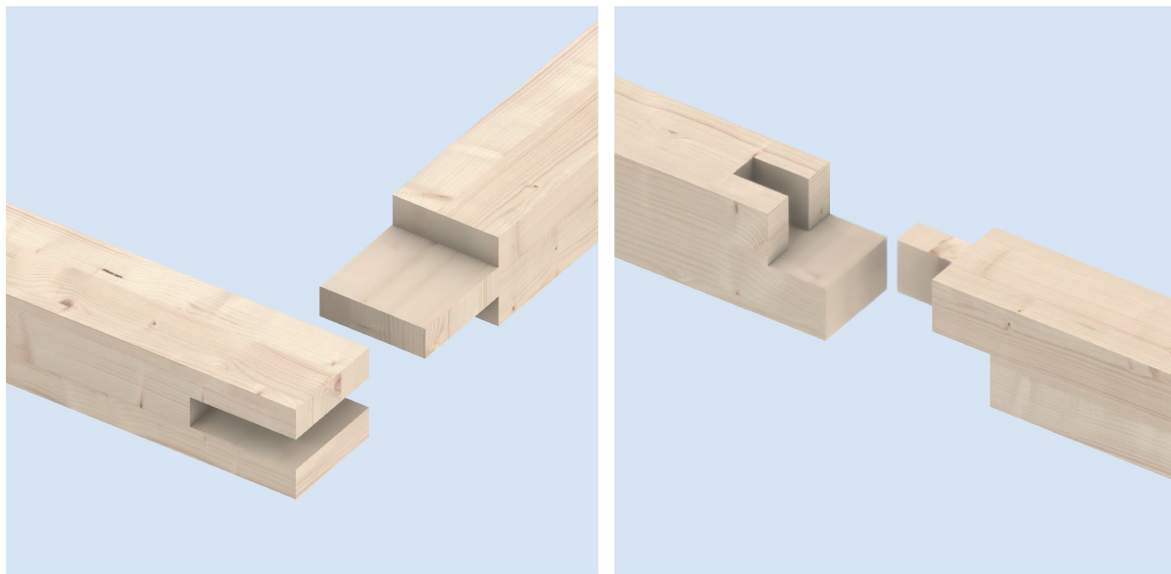
Der Blockbau (1.11) entsteht durch das horizontale Aufeinanderstapeln von Stämmen zu durchgehenden Scheiben (**Abbildung 8 links**). Obwohl diese Bauweise früher nur in bestimmten Bergregionen verbreitet war, wird sie heute immer mehr eingesetzt. Sie erfordert jedoch in der Regel hoch qualifizierte Arbeitskräfte, ist auf lange Holzteile angewiesen und daher sehr teuer.

Abbildung 8: Schematische Darstellung von Holzbausystemen: Blockbau (links), Fachwerkbau (Mitte links), Balloon-Frame (Mitte rechts) und Plattform-Frame (rechts)



Der Fachwerkbau (1.12) besteht aus einer starren Ansammlung von großen, tragenden Kanthölzern, die durch Holzverbindungen miteinander verbunden sind (**Abbildung 8 Mitte links**). Holzverbindungen sind die Kombination von Holzelementen mit Hilfe einer eingefrästen Geometrie (**Abbildung 9**). Manchmal werden unterstützende Verbindungselemente oder Leime verwendet, das Hauptmerkmal ist jedoch, dass die Holzelemente durch ihre Form zusammenpassen.

Abbildung 9: Beispiele für Holzverbindungen im Holzrahmenbau

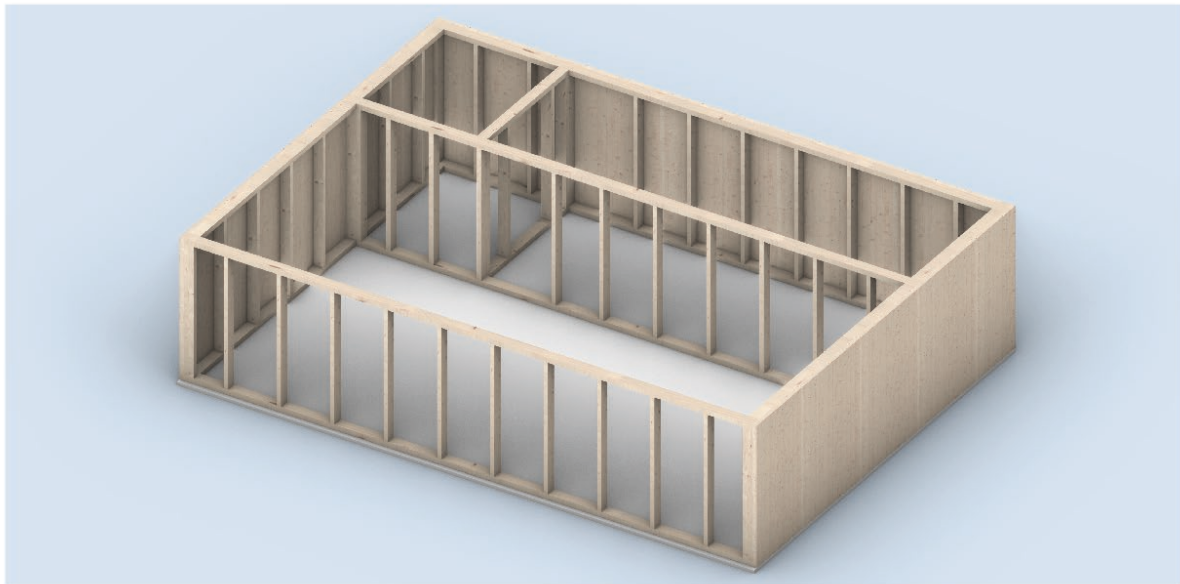


Balloon-Framing und Plattform-Framing (1.13) sind Holzbauweisen, die durch die Industrialisierung der Holzbauindustrie im 19. Jahrhundert entstanden sind (**Abbildung 8 Mitte rechts und rechts**). In beiden Fällen werden als Konstruktionsgrundlage schlanke Dimensionshölzer und Nägel oder Schrauben verwendet, anstelle von Holzverbindungen. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Bauweisen besteht darin, dass beim Balloon Framing längere Elemente in den Wänden verwendet werden, die sich zwischen den Stockwerken erstrecken. Beim Plattform Framing hingegen wird Stockwerk für Stockwerk gebaut. Der Vorteil des Plattform Framing besteht darin, dass kein Gerüst erforderlich ist.

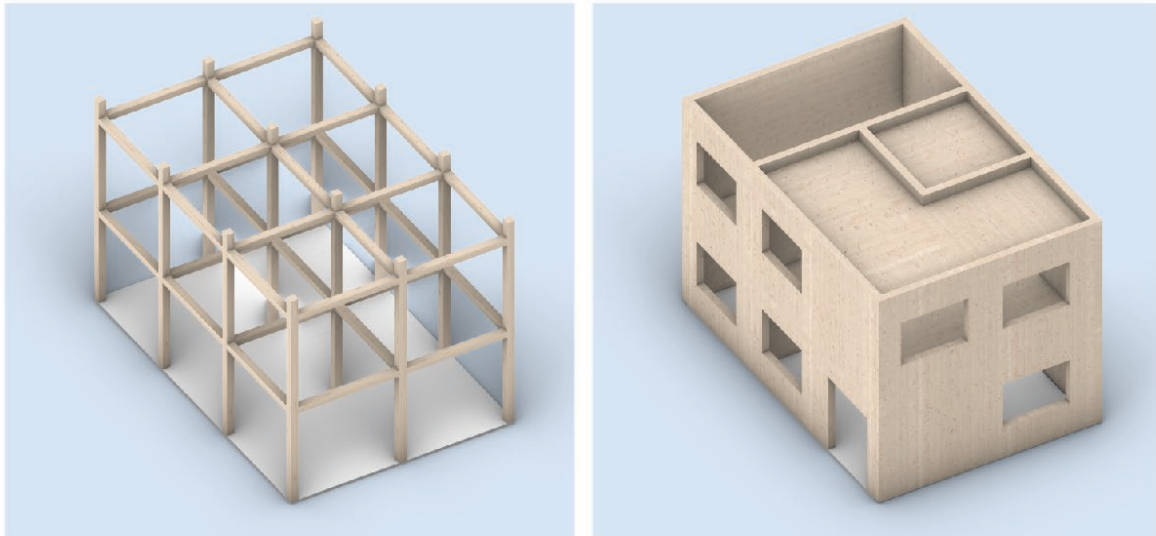
Der Rahmenbau (1.14) basiert auf Balken mit quadratischem Querschnitt, der durch eine dünne flächige Ummantelung stabilisiert wird (**Abbildung 11**). Im Rahmenbau sind die primären Strukturelemente Vierkantbalken. Um die strukturelle Integrität der Balken zu verbessern, wird eine dünne, ebene Ummantelung verwendet. Bei der Ummantelung handelt es sich um eine Materialschicht, z. B. Sperrholz oder OSB-Platten, die an der Außenfläche der Balken befestigt wird. Diese Ummantelung wirkt als stabilisierendes Element, das

die Last und die Kräfte auf das gesamte Rahmenbausystem verteilt. Die Balken und die Ummantelung werden im Allgemeinen als Einzelteile in Fabriken hergestellt und dann auf der Baustelle zusammengebaut. Zwei wichtige Faktoren bei der Konstruktion sind (i) der Transport, weil die außerhalb der Baustelle montierten Baugruppen auf die Ladefläche eines Lastwagens passen müssen, um zur Baustelle zu gelangen, und (ii) die Maschinen, mit denen die Baugruppen zusammengebaut werden, weil sie die Bandbreite der montierbaren Geometrien beeinflussen können. Fabriken, die sich an der Vorfertigung von Rahmenbau orientieren, sind eher auf Massenproduktion als auf Flexibilität im Design ausgerichtet.

Abbildung 10: Konstruktionsprinzip für die Rahmenbauweise



Der Skelettbau (1.15) ist eine Bauweise, die auf Stützen und Trägern basiert, die in einem geradlinigen Raster angeordnet sind. Sie ist heute im Allgemeinen das Konstruktionssystem, das für mehrstöckige und großvolumige Gebäude aus Holz verwendet wird. Im Allgemeinen wird der Skelettbau durch die Anordnung des Rasters und die Verbindung zwischen den Stützen und Trägern definiert (**Abbildung 11 links**).

Abbildung 11: Schematische Darstellung von Holzbausystemen: Skelettbau (links) und Massivholzbau (rechts)

Beim Massivholzbau (1.16) sind die primären Strukturelemente Platten aus Massivholz. (**Abbildung 11 rechts**). Diese großen Massivholzplatten erfüllen zwei wesentliche Funktionen in der Konstruktion. Erstens bilden sie die Gebäudehülle, das heißt die äußere Schale oder Umhüllung des Gebäudes. Die Massivholzplatten dienen als Wände, Böden und Dächer und bilden eine durchgehende und robuste Barriere, die die Innenräume vor der Außenwelt schützt. Zweitens sind diese Platten der tragende Teil der Struktur. Das bedeutet, dass sie für die Aufnahme und Verteilung der vertikalen und horizontalen Lasten verantwortlich sind, wie zum Beispiel das Gewicht des Gebäudes selbst sowie zusätzliche Nutzlasten wie Bewohner, Möbel oder Geräte. Ähnlich wie beim Rahmenbau wird ein großer Teil der Montage außerhalb der Baustelle durchgeführt.

Free-Form-Konstruktionen(1.17) sind Konstruktionen, die nicht zu den zuvor genannten passen. Zwei Beispiele für solche Konstruktionen sind Schalen und Kuppeln. Sie ermöglichen im Allgemeinen eine große Gestaltungsfreiheit bei minimalem Materialeinsatz. Aufgrund ihres komplexen Entwurfs- und Bauprozesses sind Free-Form-Konstruktionen jedoch erst seit kurzem mit der zunehmenden Automatisierung und computergestützten Entwurfspraxis im Holzbau stärker verbreitet. Ein Beispiel für eine Freiformkonstruktion ist in Abbildung 12 dargestellt.

Abbildung 12: Beispiel einer Free-form Konstruktion: Holzschalenkonstruktion vom ICD und dem Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart



Quelle: (ICD/ITKE, University of Stuttgart)

Baugruppen (1.2) werden definiert als „Anzahl von zur Erfüllung einer bestimmten Funktion zusammengesetzten Einzelteilen“ (EN ISO 10209:2012). Baugruppen bestehen aus mehreren Holzeinzelteilen gleicher oder unterschiedlicher Art. Obwohl ganze Bausysteme mehr Gruppen benötigen können, als in **Abbildung 7** aufgeführt sind (z.B. Fundamente), handelt es sich bei 1.21-1.26 um solche, die vollständig aus Holzeinzelteilen zusammengesetzt werden können. Jede Gruppe, und damit die Zuordnung der Einzelteile und Verbindungen, wird durch die Belastungsbedingungen sowie durch andere Leistungskriterien wie Wärme- und Schallschutz sowie Brandschutz bestimmt.

Ein Bauteil (1.3) wird definiert als „Bestandteil einer Ausrüstung, das nicht weiter zerlegt werden kann, ohne seine grundlegenden Eigenschaften zu verlieren“ (EN ISO 10209:2012). Bauteile sind die einzelnen Komponenten, aus denen sich die Baugruppen zusammensetzen. Durch die Fortschritte in der Holzbearbeitung und in letzter Zeit auch in der digitalen Fertigung gibt es eine große Auswahl an Bauteilen, die im Holzbau verwendet werden. Dies kann von leichten, verarbeiteten Holzklötzen bis hin zu maßgefertigten, gebogenen Brettschichtholzträgern reichen. Brettschichtholz ist ein modernes Produkt des konstruktiven Holzbaus, das die Möglichkeiten der Einzelbauteile weiter erhöht. Brettschichtholz ist ein Holzbauprodukt, das aus einzelnen Schichten von Holzbrettern besteht, die mit Klebstoffen miteinander verbunden sind. Durch dieses Konstruktionsverfahren entstehen große, strukturell effiziente Bauteile, die im Vergleich zu anderen Holzarten eine höhere Stärke und Stabilität aufweisen. Jedes Bauteil kann im Allgemeinen durch seine Abmessungen (1.31), und seine allgemeinen Materialeigenschaften (1.32) definiert werden (in **AP 2.1** behandelt).

Verbindungen (1.4) werden definiert als „auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken geometrisch bestimmter fester Form oder von eben solchen Werkstücken mit formlosem Stoff; dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt“ (DIN 8580:2003-09). Verbindungen sind das, was Bauteile zusammenhält. Verbindungen werden insbesondere durch das Verbindungselement definiert, das die Teile verbindet, sowie durch die Methoden zum Einbringen des Verbindungselements, die vollständig manuell, maschinell oder vollautomatisch sein können. Mögliche Verbindungselemente sind Schrauben, Nägel, Klammern, Klemmen und Leim. Im Holzbau ist auch eine

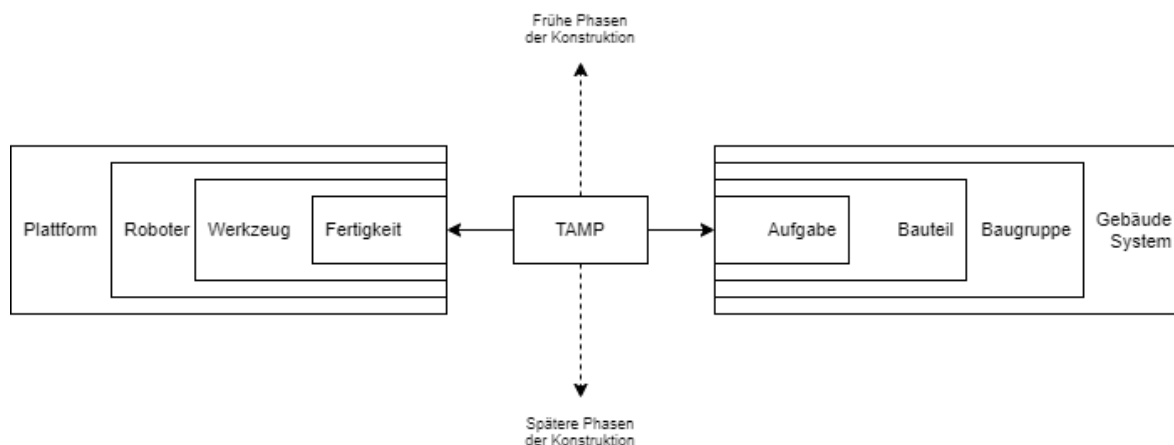
maschinelle Bearbeitung der einzelnen Teile möglich, um Pressverbindungen ohne Verbindungselemente herzustellen.

Prozessanalysen für den automatisierten Holzbau (AP 1.2)

Viele Projekte, die sich mit der Automatisierung des Holzbaus befassen, konzentrieren sich auf die Vorfertigung von Holzbaugruppen. Dabei ist die Automatisierung der Vorfertigung weit fortgeschritten, sodass Transport, Montage, Einbau und Aufbau vor Ort nur noch in Handarbeit erfolgen. Sogar der Bau ganzer Einfamilienhäuser wird in Fabrikhallen automatisiert. Diese Automatisierung, die sich in der Industrie zunehmend durchsetzt, basiert auf Standardisierung und Modularisierung und ist von der Fließbandfertigung inspiriert. Diese Art der Vorfertigung im Holzbau ermöglicht eine schnellere und effizientere Montage von Einfamilienhäusern und modularen Gebäuden in Holzbauweise. Der Einsatz von Industrierobotern und anderen Formen der Roboterautomatisierung ermöglicht derzeit eine größere Freiheit bei der Gestaltung von Holzkonstruktionen, wie in Abbildung 12.

In **Abbildung 13** ist die Charakterisierung der Automatisierung im Holzbau in zwei Hälften unterteilt: die Roboterhierarchie auf der linken Seite und die Gebäudesystemhierarchie auf der rechten Seite. Die Interaktion zwischen beiden ist in der Mitte dargestellt.

Abbildung 13: Charakterisierung der Automatisierung im Holzbau: Roboterplattform als Schnittstelle zum Bausystem durch Aufgaben- und Bewegungsplanung (TAMP)



Beginnend mit der Roboterhierarchie befindet sich auf der obersten Ebene die Plattform, die alle Aspekte des Automatisierungssystems umfasst. Dazu gehören die für die Automatisierung notwendigen Infrastruktur-, Software- und Hardware-Komponenten. Die Plattform bildet die Grundlage für den gesamten Automatisierungsprozess. Auf der unteren Ebene der Hierarchie befinden sich die Roboter selbst. Ausgestattet mit verschiedenen Werkzeugen und Fähigkeiten können die Roboter bestimmte Aufgaben im Holzbau übernehmen. Zu diesen Fähigkeiten gehören unter anderem das Bewegen, Verbinden, Formen, Überwachen und Handhaben. Die Fähigkeiten der Roboter ermöglichen es ihnen, die im Bauprozess erforderlichen Handlungen auszuführen.

Auf der rechten Seite des Diagramms basiert die Hierarchie der Bausysteme auf der in **Abbildung 7** dargestellten Gliederung der Holzbausysteme. Auf der untersten Ebene gibt es Aufgaben, die die spezifischen Aktionen definieren, die während des Montageprozesses durchgeführt werden müssen. Roboter werden eingesetzt, um Aufgaben wie das Zusammenfügen von Materialstücken, die Bewegungssteuerung oder die Bearbeitung des Materials zu erledigen.

Um dies zu erreichen, werden die Fähigkeiten der Roboter mit den erforderlichen Aufgaben verbunden. Die Implementierung eines Algorithmus zur Aufgaben- und Bewegungsplanung (TAMP) erleichtert die Koordination zwischen den Fähigkeiten der Roboter und den erforderlichen Aufgaben. Der TAMP-Algorithmus

befindet sich an der Schnittstelle zwischen der Roboterhierarchie und der Hierarchie des Gebäudesystems und stellt sicher, dass die entsprechenden Fähigkeiten zur Ausführung der erforderlichen Aufgaben eingesetzt werden. Es ist wichtig zu beachten, dass verschiedene Aufgaben während der chronologischen Phasen des Bauprozesses unterschiedliche TAMP-Algorithmen erfordern können. Der vertikale Pfeil in der Mitte des Diagramms zeigt die Notwendigkeit verschiedener TAMP-Algorithmen für die verschiedenen Aufgaben im Holzbau auf (**Abbildung 13**).

Insgesamt bietet **Abbildung 13** einen umfassenden Überblick über die Interaktion zwischen der Roboterhierarchie und der Gebäudesystemhierarchie im Kontext der Holzbauautomatisierung. Sie verdeutlicht die Rolle der Plattform, der Roboterfähigkeiten, der Aufgaben, der Fertigkeiten und der Koordination, die durch die TAMP-Algorithmen erleichtert wird, um eine effiziente und effektive Automatisierung der Holzbauprozesse zu erreichen.

Prozessanalysen für bestehende verteilte Robotersysteme (AP 1.3)

Für die Zwecke dieser Forschung wird Parkers Definition von verteilten Robotersystemen verwendet: eine Gruppe autonomer mobiler Roboter, die kooperativ arbeiten (Parker 2000). Zum besseren Verständnis der verschiedenen Aspekte bietet die ISO 8373 die folgende Definition:

- **Autonomie:** *Fähigkeit, Bewegung und Kommunikation zu steuern, um die vorgegebenen Aufgaben ohne Eingriff durch den Menschen ausführen zu können*
- **Roboter:** *betätigter Mechanismus, der in mehr als einer Achse programmierbar ist mit einem bestimmten Grad an Autonomie, der sich innerhalb seiner Umgebung bewegt, um vorgegebene Aufgaben auszuführen*
- **Mobiler Roboter:** *Roboter, der in der Lage ist, sich unter eigener Kontrolle zu bewegen*
- **Roboter-Roboter-Kooperation:** *Zusammenwirken mehrerer Roboter zur Sicherstellung, dass ihre Bewegungen gemeinsam zur Erfüllung der Aufgabe wirksam sind*
- **Achse:** *Richtung, die zur Spezifizierung der Bewegung des Roboters – linear oder rotatorisch – benutzt wird*

Die Forschung zu verteilten Robotersystemen gilt aufgrund ihres stark interdisziplinären Charakters allgemein als komplex und befindet sich daher noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Abgesehen von der Hardware der Roboter selbst sind für solche Systeme Entwicklungen in den Bereichen (i) Kommunikation, (ii) Aufgabenplanung und -steuerung, (iii) Lokalisierung, Kartierung und Erkundung sowie (iv) Bewegungskoordination erforderlich. Daher sind die Bereiche Informatik, Kommunikations- und Kontrollsysteme sowie Elektrotechnik und Maschinenbau im Allgemeinen an der Entwicklung beteiligt.

Da die Technologie für den Einsatz verteilter Robotersysteme zunehmend fortgeschritten ist, wird die Anwendung solcher Systeme realistischer. In der Architektur wird derzeit erforscht, wie sich verteilte Robotersysteme auf den Prozess der architektonischen Gestaltung und Konstruktion auswirken können. Zu diesen Untersuchungen gehören i) Robotersysteme, die mit Standardmaterialien arbeiten (**Abbildung 14 links**), ii) Standardrobotersysteme, die für die Montage von entworfenen Materialien erweitert werden (**Abbildung 14 Mitte**) und iii) gemeinsam entworfene Robotersysteme und Materialien (**Abbildung 14 rechts**). **Tabelle 1** enthält eine Liste von Projekten, die sich mit der Anwendung von verteilter Robotik im Bauwesen befassen.

Abbildung 14: Mobiler Roboter für den Bambusbau (links), Drohne für die Montage von Cyber Physical Macro Material (Mitte) und Custom Material für die Montage durch einen individuellen Roboter (rechts)



Quelle: links(Kalousdian et al. 2022), Mitte(Wood et al. 2019), rechts(Melenbrink / Werfel / Menges 2017)

Tabelle 1: Beschreibung der bestehenden Forschung zu verteilten Robotersystemen

Autoren	Roboter	Bauteile
N. Napp und R. Nagpal (2014)	Individuell (Raupe mobiler Roboter)	Schaumstoff, Klebstoff, Zahnstocher
F. Augugliaro, A. Mirjan, F. Gramazio, M. Kohler und R. D'Andrea (2013)	Standard (Drohne)	Seile
F. Nigl, S. Li, J. E. Blum und H. Lipson (2013)	Individuell (Kletterroboter)	Custom Kunststoffstreben und -knoten
Q. Lindsey, D. Mellinger und Vijay Kumar (2012)	Standard (Drohne)	Custom Kunststoffstreben und -knoten
Y. Terada und S. Murata (2008)	Individuell (Kletterroboter)	Custom Modular Block
D. Andreen, P. Jennings, N. Napp und K. Petersen (2016)	Standard (Vibrationsroboter)	Custom 2D Blocks
K. Petersen, R. Nagpal und J. Werfel (2011)	Individuell (TERMES)	Custom Ziegelstein
Y. Yoon und D. Rus (2007)	Individuell (Shady3D)	Custom Streben
F. Augugliaro, S. Lupashin, M. Hamer, C. Male, M. Hehn, M. Mueller, J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler und R. D'Andrea (2014)	Standard (Drohne)	Schaumstoffblock
M. Yablonina und A. Menges (2019)	Individuell (MoFES)	Seile
D. Wood, M. Yablonina, M. Aflalo, J. Chen, B. Tahanzadeh und A. Menges (2019)	Standard (Drohne)	Custom Block (Cyber Physical Macro Material)

Autoren	Roboter	Bauteile
M. Kayser, L. Cai, S. Falcone, C. Bader, N. Inglessis, B. Darweesh und N. Oxman (2018)	Individuell (Fiberbots)	Faser
S. Hauser, M. Mutlu, P.-A. Léziart, H. Khodr, A. Bernardino und A.J. Ijspeert (2020)	Individuell (Roombots)	Gleich wie Roboter
J. Petrs, H. Dahy und M. Florian (2019)	Individuell (MOLEMOD)	Schaumstoffblock
J. Irawan, X. De Kestelier, N. Argyros, B. Lewis und S. Gregson (2020)	Individuell (Modulare Roboter)	Erde auf dem Mars
C. Parker und H. Zhang (2002/2006)	Individuell (Roboter auf Rädern)	Schotter
C. Parker, H. Zhang und C.R. Kube (2003)	Individuell (Roboter auf Rädern)	Schotter
N. Melenbrink, J. Werfel und A. Menges (2017)	Individuell (Kletterroboter)	Custom Streben / Block
N. Melenbrink, K. Rinderspacher, A. Menges und J. Werfel (2020)	Individuell (Roboter auf Rädern)	Erde
J. Sustarevas, K. Benjamin Tan, D. Gerber, R. Stuart-Smith und V. Pawar (2019)	Individuell (Youwasps)	extrudierte Materialien
M. Saboia, V. Thangavelu und N. Napp (2019)	Individuell (Roboter auf Rädern)	Steine, Sandsäcke
Zhang et al. (2022)	Standard (Drohne)	Schaumstoff
B. Jenett, A. Abdel-Rahman, K. Cheung und N. Gershenfeld (2019)	Individuell (Kletterroboter)	Kunststoffblock
N. K. Kalousdian, G. Łochnicki, V.N. Hartmann, S. Leder, O. Oguz, A. Menges und M. Toussaint (2022)	Individuell (Kletterroboter)	Bambus
S. Jin, S. Maggs, D. Sadan, C. Nan, S. Jokić und P. Novikov (2013)	Individuell (heterogenes Roboterkollektiv)	Beton

Obwohl beabsichtigt ist, den überwiegenden Teil der verteilten Roboterbauprojekte vor Ort durchzuführen, findet die meiste Arbeit immer noch in Fabrikumgebungen statt. Größtenteils handelt es sich um homogene Robotersysteme, die einzelne Materialien zusammensetzen. In den meisten Fällen richten sich die Elemente

aufgrund der Geometrie oder anderer passiver Verbindungselemente wie Magneten passiv aus. Daher kann der bisherige Prozess der Automatisierung mit verteilten Robotern als kontrollierte Montage von Blöcken aus einzelnen Materialien beschrieben werden.

Zusammenfassung (AP 1) und Meilensteindiskussion (MS 1)

Bei der Zusammenstellung der Forschungsarbeiten für **AP 1** wurden die folgenden Möglichkeiten für verteilte Robotersysteme im Bauwesen ermittelt:

- Arbeiten rund um die Uhr
- Arbeit mit uneingeschränkten Gebäudehüllen, d. h., da die Roboter mobil sind, können sie in weniger begrenzten Räumen arbeiten
- Anpassung an wechselnde und besondere Standortbedingungen
- Reagieren auf unterschiedliche architektonische Anwendungsfälle
- Zusammenarbeit in großen Teams
- Arbeiten in einem potenziell unbegrenzten Maßstab
- Abnehmbare, wiederverwendbare und sortenreine Gebäudeelemente
- Kompatibilität mit funktional angepassten Bausystemen

Sowie einige informative Einschränkungen und Herausforderungen, darunter:

- Notwendigkeit, mit kleinen Elementen zu arbeiten
- Schwierige Planbarkeit ohne statische Grundlage
- Schwierig zu planen, weil ein System mehrere zusammenarbeitende Akteure hat
- Begrenzte Größe und Gewicht des Materials, mit dem die Roboter arbeiten können
- Begrenzte Bordstromversorgung (kurze Batteriebensdauer)

Diese Herausforderungen und Chancen wurden durch die Analyse der potentiellen Anwendung von verteilten Robotersystemen im Holzbau identifiziert, wodurch Meilenstein 1 (**MS 1**) des Projekts erreicht wurde. Diese Arbeit basierte auf der Untersuchung existierender verteilter Robotersysteme, Automatisierungssysteme im Holzbau und existierender Holzbausysteme, deren Sammlung einen Katalog zum Verständnis der Gesamtanwendung dieser neuartigen Bauautomatisierungssysteme bildet. Der Katalog der Automatisierungssysteme und Holzbausysteme dient als Hintergrund für die Forschung und wird in der weiteren Forschungsdiskussion verwendet.

Eine wichtige Beobachtung, die bei der Analyse und Untersuchung bestehender Gebäudekonstruktionen gemacht wurde, ist, dass die Mehrheit der Bausysteme aus geradlinigen Elementen besteht, obwohl die heutige Technologie eine größere Anzahl von Einzelteilen ermöglicht. Das ist wichtig für die Entwicklung nicht nur von Bausystemen, sondern auch von Robotern, die die in dieser Forschung diskutierten Strukturen bauen könnten.

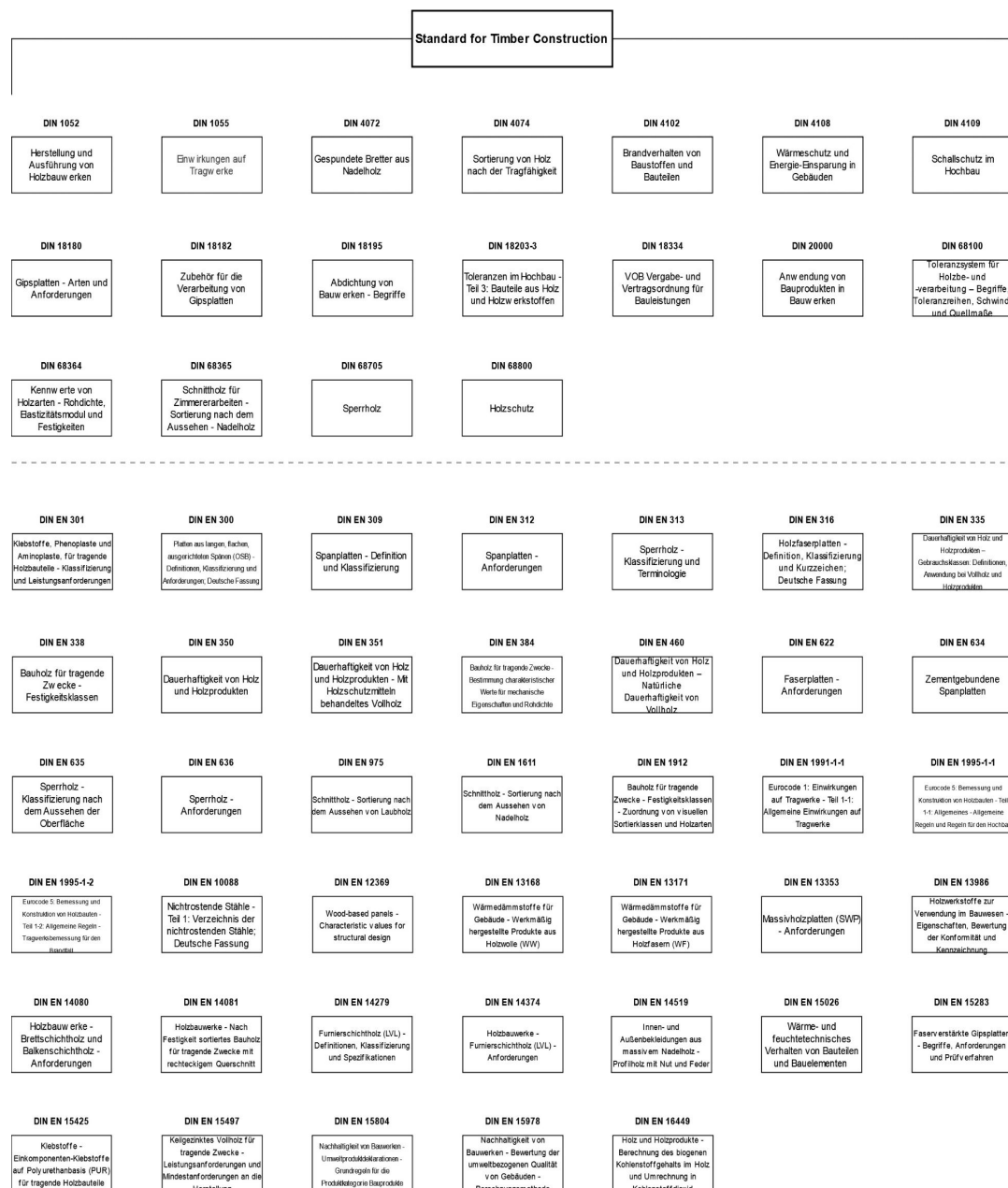
Framework für den Einsatz von verteilten Robotersystemen für den Holzbau

Analyse maßgeblicher Normen und Bestimmungen und Integration relevanter Parameter in das Baukonzept (AP 2.1)

An der Entwicklung verteilter Robotersysteme sind mehrere Disziplinen beteiligt, darunter Robotik, Informatik und Architektur. Obwohl nicht alle beteiligten Disziplinen Standards für die Entwicklung solcher Systeme

haben, gibt es zahlreiche Normen und Vorschriften, auf die Bezug genommen werden kann. Der Einfachheit halber wurden diese in zwei Kategorien unterteilt: (i) Holzbau und (ii) Robotik und Fertigung. In **Abbildung 15** sind die Normen und Bestimmungen nach Nummer und Name aufgelistet, auf die derzeit bei der Entwicklung der Forschung Bezug genommen wird. Dazu gehören sowohl deutschlandspezifische als auch EU-weite Normen und Vorschriften.

Abbildung 15: Normen und Vorschriften für den Holzbau

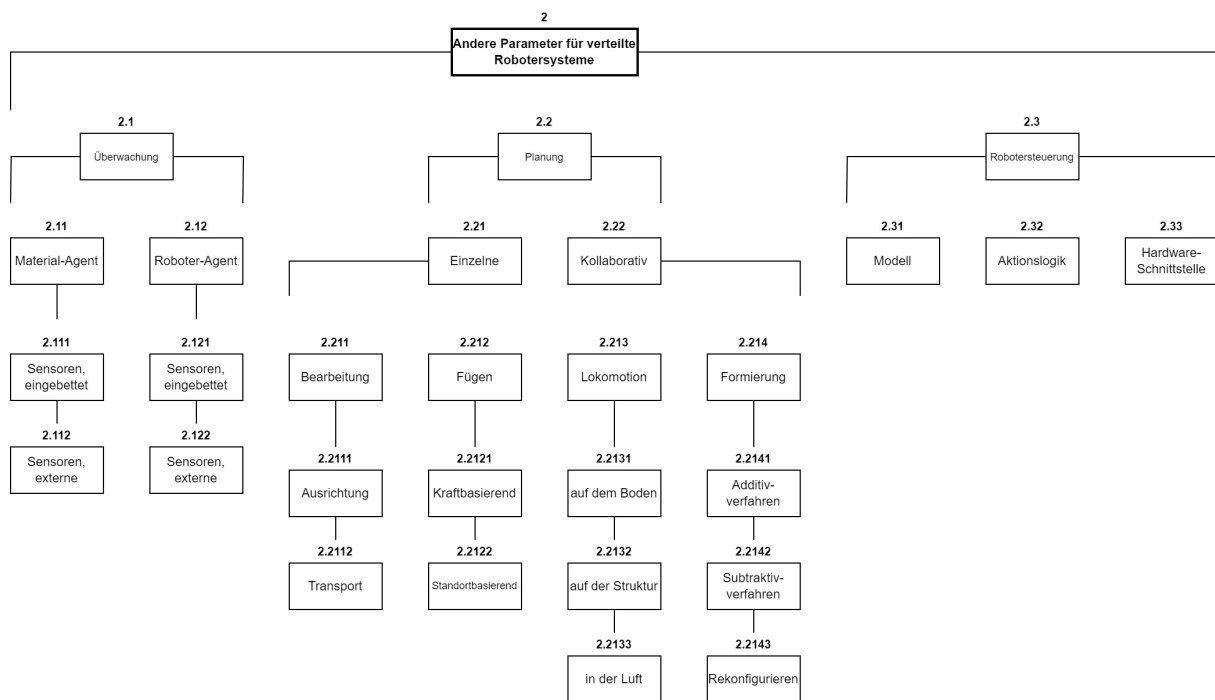


Integration relevanter Roboterparameter in das Baukonzept (AP 2.2)

Die Parameter des Roboters können in zwei größere Kategorien unterteilt werden: Parameter, die sich auf das gesamte Robotersystem beziehen (2.1-2.3) und Parameter, die sich auf den physischen Akteur selbst beziehen (3.1- 3.7).

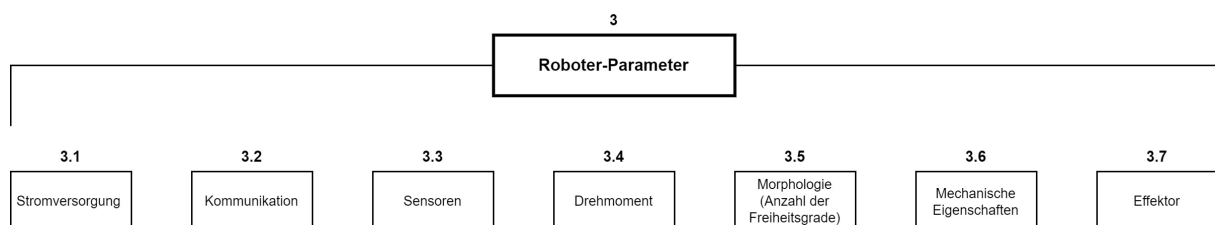
Abbildung 16 charakterisiert die Parameter des Roboters aus einer Systemperspektive. Dazu gehören Überwachung (2.1), Planung (2.2) und Robotersteuerung (2.3). Die Überwachung (2.1) lässt sich in die Überwachung der am Bauprozess beteiligten Roboteragenten und der Materialagenten bzw. Baugruppe des Gebäudesystems untergliedern. Diese Überwachung kann durch eingebettete Sensoren oder externe Sensoren, wie in 3.3 beschrieben, erfolgen. Die Planung (2.2) kann in individuelle (2.21) und kollaborative (2.22) Aufgaben unterteilt werden, darunter Manipulationsaufgaben, Fügeaufgaben, Fortbewegungsaufgaben und Materialformungsaufgaben. Die Robotersteuerung (2.3) schließlich umfasst die Aktualisierung eines Modells auf der Grundlage der Überwachungsdaten und die Kopplung mit der Hardware (2.33) unter Verwendung einer Aktivierungslogik (2.32) gemäß der Planung (2.2).

Abbildung 16: Charakterisierung verteilter robotergestützter Konstruktionssysteme



Bei der Gestaltung des physischen Roboters ist es wichtig, alle Parameter in **Abbildung 17** zu berücksichtigen. Bei den meisten verteilten Robotersystemen ist das Gesamtgewicht des Roboters minimal, damit der Roboter beweglich ist und von der Struktur gehalten wird. Die Anzahl der Freiheitsgrade (3.5) und das Drehmoment (3.4) des Roboters werden maximiert, um den Roboter mit so vielen Fähigkeiten wie möglich auszustatten. Bei der Entwicklung der Hardware werden oft Kompromisse eingegangen, um diese Faktoren auszugleichen.

Abbildung 17: Charakterisierung der Roboterparameter



Die Stromversorgung (3.1) kann entweder an Bord in Form einer Batterie oder extern über ein Kabel erfolgen. Letzteres kann durch das Design des gesamten verteilten robotischen Bausystems und insbesondere durch

das Design der Hardware umgesetzt werden. Einige andere Forschungsprojekte verlegen Kabel durch die gebaute Struktur (Kayser et al. 2018) oder organisieren die Baustelle so, dass Kabel außerhalb des Montageprozesses verlaufen (Yablolnina/Menges 2019). Ein weiterer Ansatz für verteilte Robotersysteme, die auf Stromkabel angewiesen sind, ist die robotergestützte Planung des Weges der montierten Strukturen, um zu vermeiden, dass Kabel aktive Bereiche der laufenden Bautätigkeit behindern.

Die Kommunikation (3.2) muss zwischen den einzelnen Robotern im Kollektiv und einer Art zentralem Server für die Fehlersuche und den Betrieb hergestellt werden. Dies geschieht in der Regel durch den Anschluss aller beteiligten Parteien an dasselbe Netzwerk, sodass eine Socket-Kommunikation stattfinden kann (TCP, UDP usw.).

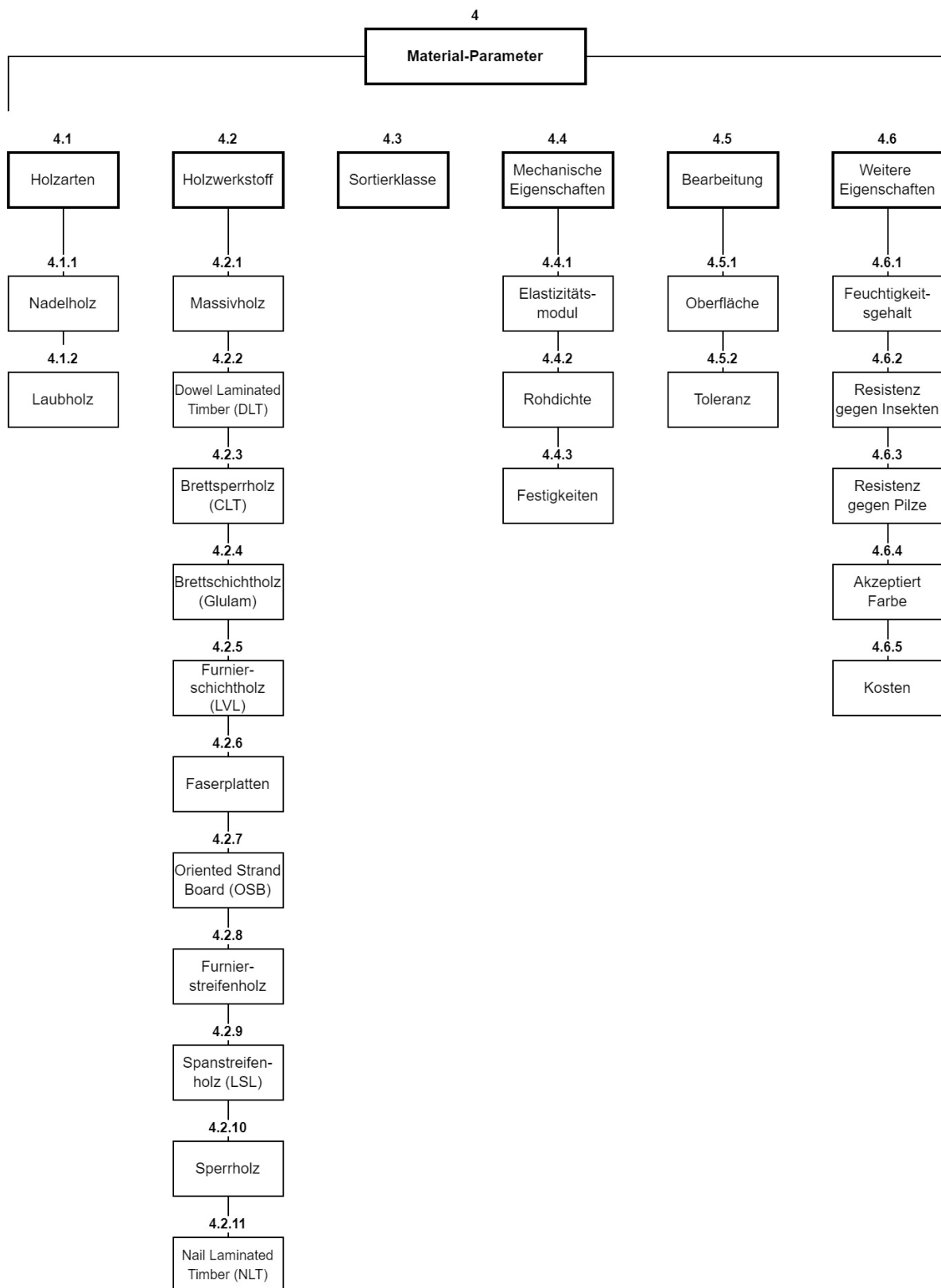
Sensoren (3.3) werden verwendet, um den Zustand des Roboters zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erfassen, sodass die Planung (2.2) in Bezug auf die reale Umgebungskonfiguration erfolgen kann. Diese Sensoren können in den Körper des Roboters integriert sein, wie z. B. ein Encoder, der die Rotationswerte der Robotermotoren misst, eine Kamera für Computer-Vision-Zwecke wie die Objektverfolgung oder/und eine inertielle Messeinheit (IMU), die die Orientierung des Roboters im Raum misst. Externe Sensoren sind ebenfalls sehr wichtig und können in der Regel mit viel größeren Toleranzen arbeiten, da es keine Gewichtsbeschränkung wie bei den Onboard-Sensoren gibt. Ein gutes Beispiel hierfür sind Vive-Leuchttürme oder Multi-Kamera-Trackingsysteme.

Effektoren (3.7) stehen im engen Zusammenhang mit dem Bausystem, mit dem der Roboter arbeitet, insbesondere mit den Verbindungstechniken, die für den Zusammenbau der einzelnen Bauteile verwendet werden. Manchmal muss der Effektor Verbindungshardware tragen, manchmal hat er eingebettete Werkzeuge, und meistens wird er zum Greifen von Teilen der Struktur für die Fortbewegung verwendet. Eine Hauptschwierigkeit in der verteilten Robotik scheint darin zu bestehen, das Gewicht des Endeffektors so gering wie möglich zu halten.

Die Morphologie (3.5) des Roboters hängt in der Regel mit den geometrischen Freiheitsgraden des Bausystems zusammen. Besteht das System aus geradlinigen Bauteilen, benötigt der Roboter nur wenige Freiheitsgrade, während für Free-Form Bausysteme mehr Freiheitsgrade erforderlich sind, damit sich die Roboter auf einem komplexen Untergrund fortbewegen und neue Bauteile in bestimmten Positionen und Ausrichtungen platzieren können.

Integration relevanter Materialparameter in das Baukonzept (AP 2.3)

Das Baumaterial Holz hat einen großen Einfluss auf das verteilte Robotersystem, das entwickelt wird, in Bezug auf das, was gebaut werden kann und was die Anforderungen an das Robotersystem sind. Daher ist es wichtig, die verschiedenen Materialparameter zu verstehen, die sich auf das gesamte System auswirken würden (**Abbildung 18**). Ein Fichtenstamm direkt vom Baum würde sich anders verhalten als eine gehobelte und abgeschrägte Fichtenlatte. Auf der Grundlage der Ergebnisse von **AP 2.2** werden die wichtigsten Parameter für das Holzmaterial in **Tabelle 2** dargestellt, die in 7 Hauptkategorien und mehrere Unterkategorien unterteilt ist. Die Materialparametern werden in folgende Kategorien unterteilt: Holzarten (4.1), Holzwerkstoff (4.2), Sortierklasse (4.3), Mechanische Eigenschaften (4.4), Bearbeitung (4.5) und Weitere Eigenschaften (4.6).

Abbildung 18: Charakterisierung verteilter robotergestützter Konstruktionssysteme

Die Holzarten (4.1) werden in Nadel- und Laubhölzer unterteilt. In der DIN EN 13556 sind die in Europa allgemein verwendeten Hölzer aufgeführt. Die meisten tragenden Konstruktionen werden aus Nadelholz hergestellt, insbesondere aus Fichte und Tanne. Die Kenntnis der Holzart ist notwendig, um die mechanischen

Eigenschaften des Materials zu bestimmen. Die Identifizierung einer bestimmten Holzart kann auch Informationen darüber geben, wie sich das Material unter verschiedenen Belastungen und Umweltbedingungen verhält. Einige Holzarten haben beispielsweise eine hohe Dichte und Festigkeit. Sie eignen sich daher für tragende Anwendungen wie Balken oder Säulen. Andere wiederum können aus ästhetischen Gründen wünschenswerte Eigenschaften aufweisen, wie z. B. eine feine Maserung oder eine natürliche Färbung, wodurch sie sich ideal für dekorative Elemente oder Möbel eignen.

Tabelle 2: Normen und Vorschriften für bestimmte Holzwerkstoffarten

Holzwerkstoff	Norm/Standard
Brettschichtholz	DIN EN 14080
Sperrholz	DIN 1052, DIN 68705, DIN 635, DIN 636
Spanplatten	DIN 1052, DIN 312, DIN 634, DIN 12369, DIN EN 309
Furnierschichtholz (LVL)	DIN EN 14279, DIN EN 14 374
Langpressspanplatten (OSB)	DIN EN 300, DIN 12369
Faserplatte	DIN EN 316, DIN EN 622, DIN 12369

Obwohl Massivholz aus einer einzigen Holzart als eigenständiges Baumaterial dienen kann, haben Entwicklungen in der Holzverarbeitung zu Holzwerkstoffen (4.2) als hochfeste Alternativen zu Massivholz geführt. Diese Materialien spielen letztendlich eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung neuer Bausysteme und sind daher für diese Forschung von großer Bedeutung. Darüber hinaus hat jeder dieser Werkstoffe seine eigenen mechanischen Eigenschaften, die einen großen Einfluss auf die Art der in dieser Studie entwickelten Systeme haben werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Arten von Holzwerkstoffen ist in den **Abbildung 18** bei Holzwerkstoff (4.2) zu finden. Normen, die sich auf die verschiedenen Arten beziehen, sind in **Tabelle 2** zu finden.

Da es sich bei Holz um ein natürliches Material handelt, kann es in seinen Eigenschaften stark variieren, selbst wenn es vom gleichen Baum stammt und in der gleichen Region gewachsen ist. Die Einteilung von Holz in verschiedene Sortierklassen ist daher eine Möglichkeit, es in Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften zu klassifizieren. Auf diese Weise können verschiedene Holzstücke austauschbar verwendet werden, wenn sie zur selben Klasse gehören. Die Sortierung erfolgt entweder nach der Festigkeit oder nach dem Aussehen. Obwohl es verschiedene Normen für die Sortierung von Holz gibt, sind zwei Normen, die verschiedene Verfahren für die Sortierung behandeln, DIN EN 338 und DIN 4074-1.

DIN EN 338 enthält Klassen auf der Grundlage von Werten für Festigkeit, Steifigkeit und Rohdichte, die aus maschinellen Prüfungen abgeleitet werden. Die Klassen sind nach Laub- und Nadelhölzern unterteilt. Für Nadelhölzer sieht die Norm 12 Klassen für die Biegefestigkeit und 18 Klassen für die Zugfestigkeit vor. Für Harthölzer sieht die Norm 14 Klassen auf der Grundlage der Biegefestigkeit vor.

In DIN 4074-1 werden zehn visuelle Sortiermerkmale beschrieben, die zur Festlegung von Festigkeitsklassen für Nadelschnittholz herangezogen werden können. Zu diesen Merkmalen gehören Äste, Faserneigung, Markröhre, Jahrringbreite, Risse, Baumkante, Krümmung, Verfärbungen/Fäule, Druckholz und Insektenfraß. Auf der Grundlage dieser Sortiermerkmale werden 3 Klassen definiert, S7, S10 und S13, und für verschiedene Schnittholzarten beschrieben: Latte, Brette/Bohle und Kantholz. Die Typen sind in DIN 4074-1 durch ihre Dicke,

Höhe und Breite definiert. Die Festigkeitsklasse des Materials ist für die Entwicklung des verteilten Robotersystems für den Holzbau wichtig, da die Festigkeit des Materials Einfluss darauf hat, was tatsächlich gebaut werden kann und wie groß die Bauelemente der Struktur sein können. Die spezifischen Merkmale, die die äußere Geometrie des Holzmaterials beeinflussen und es unregelmäßig machen können, würden sich auch stark auf die Toleranz auswirken, innerhalb derer die Roboter arbeiten müssen. Die drei Merkmale, die sich am stärksten auf diese Toleranz auswirken würden, wären: Riss, Baumkante und Krümmung. Bei einer großen Krümmung könnte sich der Roboter beispielsweise nicht auf gerade Bauelemente im Montageprozess verlassen, was die Gesamtgeometrie der resultierenden Struktur beeinträchtigen würde.

Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Holz sind sein Elastizitätsmodul, seine Dichte und seine Festigkeit. Charakteristische Werte für jede der drei Eigenschaften für verschiedene Holzarten, sowohl Hadel- als auch Laubhölzer, finden sich in DIN 68364. Es gibt 11 gelistete Nadelhölzer, darunter Cedar, Yellow (*Chamaecyparis nootketensis*), Douglasie, Mitteleuropa (*Pseudotsuga menziesii*) und Fichte (*Picea abies*), und 49 Laubhölzer, darunter Birke (*Betula pendula*, *B. pubescens*), Eiche (*Quercus petraea*, *Q. robur*), Hickory (*Carya* spp.) und Ulme, Rösler (*Ulmus* spp.).

Das meiste Holz muss maschinell bearbeitet werden, bevor es für den Holzbau verwendet werden kann. Die maschinellen Prozesse sind hochautomatisiert und hochpräzise, daher hat die Bearbeitung nur geringe Auswirkungen auf das Bausystem. Allerdings können die Oberflächenqualität und die Maschinentoleranz einen gewissen Einfluss auf das Robotersystem haben.

Die Oberflächenqualität, die entweder sägerau oder gehobelt und gefast sein kann, wirkt sich direkt auf die Handhabung des Materials durch den Roboter aus.

In DIN 18203-3 sind Toleranzen im Holzbau definiert, die sich auf bestimmte Bauteile beziehen (2008). Bei zwei Gruppen von Bauelementen gibt es Grenzwertabweichungen: (i) Träger, Binder und Stützen, und (ii) Wand-, Boden-, Decken- und Dachtafeln. Die Grenzwertabweichungen werden in Millimetern für Für alle Nennmaße liegen die Toleranzen zwischen 1 und 20 mm. in Metern angegeben. Daraus ergibt sich ein Toleranzbereich, den die Roboter beim Baustoff Holz bewältigen müssten. Für alle Nennmaße von Träger, Binder und Stützen liegen die Toleranzen zwischen -1,5 und 20 [mm]. Für alle Nennmaße von Wand-, Boden-, Decken- und Dachtafeln liegen die Toleranzen zwischen -5 und +5 [mm]

In **Abbildung 18** werden auch verschiedene andere Eigenschaften hervorgehoben, die bei der Betrachtung von Holz im Bauwesen ebenfalls diskutiert werden. Dazu gehören der Feuchtigkeitsgehalt, die Widerstandsfähigkeit gegen Insekten und Pilze, die Akzeptanz von Farben und die Kosten. Obwohl diese Eigenschaften berücksichtigt werden sollten, hätten sie im Vergleich zu den anderen in **AP 2** diskutierten Parametern einen geringeren Einfluss auf die Entwicklung eines von einem verteilten Robotersystem gebauten Gebäudesystems.

Zusammenfassung (AP 2) und Meilensteindiskussion (MS 2)

Die Forschungen des **AP 2** haben zusammen mit denen des **AP 1** eine gemeinsame Sprache zur Beschreibung und zum Vergleich solcher Systeme ergeben. Um die Beziehung zwischen solchen Konstruktionssystemen und den anderen Kategorien, die in diesem Projekt untersucht werden, näher zu beleuchten, werden die Beziehungen zwischen den in den vorherigen Arbeitspaketen definierten Systemen parametrisch beschrieben und abgebildet: Bausystem, Baugruppe, Bauteil, Verbindung, Robotersystem und Roboter. Jede dieser Kategorien ist in feinere Unterkategorien aufgeteilt, die zur Definition von Beziehungen verwendet werden.

In Anlehnung an das DIN-System wurde ein Katalogisierungssystem entwickelt, um wichtige Zusammenhänge für das Co-Design von verteilten Robotik- und Gebäudesystemen zu identifizieren. Dieses Katalogisierungssystem dient dazu, eine systematische Darstellung der verschiedenen Interaktionen und Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Elementen des verteilten Robotik- und Gebäudesystems zu ermöglichen. Es erleichtert die Identifizierung und Analyse der Auswirkungen, die bestimmte Entscheidungen oder Änderungen in einem Bereich auf andere Bereiche haben können. Durch die Verwendung eindeutiger Kennungen und die Bereitstellung von visuellen Darstellungen, Beschreibungen und mathematischen

Gleichungen wird eine präzise und klare Kommunikation ermöglicht. Durch das Verständnis dieser Beziehungen können Entscheidungsträger und Ingenieure fundierte Entscheidungen treffen und potenzielle Konflikte oder Probleme im Voraus erkennen.

Dieses Katalogisierungssystem verwendet eindeutige Kennungen, die auf den verbundenen Zellen basieren. Zum Beispiel zeigt die erste Spalte bzw. die erste Beziehung (B1) in **Abbildung 19** dass es eine Abhängigkeit zwischen der Bearbeitungstoleranz des Materials, der Überwachungsstrategie des Robotersystems und den Erfassungsmöglichkeiten der Roboterhardware selbst besteht. Jede Beziehung wird durch ein Bild und, wenn möglich, eine mathematische Gleichung (wie eine Einschränkung oder eine Abhängigkeit) definiert (**Abbildung 20 links**).

Meilenstein 2 (**MS 2**) war die erfolgreiche Synthese aller Parameter zu einem einheitlichen Designkonzept und Designprinzipien. Obwohl ein Konstruktionskonzept identifiziert wurde, das im folgenden Abschnitt näher erläutert wird, führten AP1 und AP2 eher zu einer allgemeineren Analyse des breiteren Feldes. Ziel war es daher, anderen Forschern die Möglichkeit zu geben, verteilte Robotersysteme im Holzbau zu untersuchen. Weitere Forschung kann auf AP1 und AP2 aufbauen, um die Entwicklung des Katalogisierungssystems für andere Arten von verteilten Robotersystemen weiter zu analysieren. Dabei können weitere Abhängigkeiten entdeckt werden.

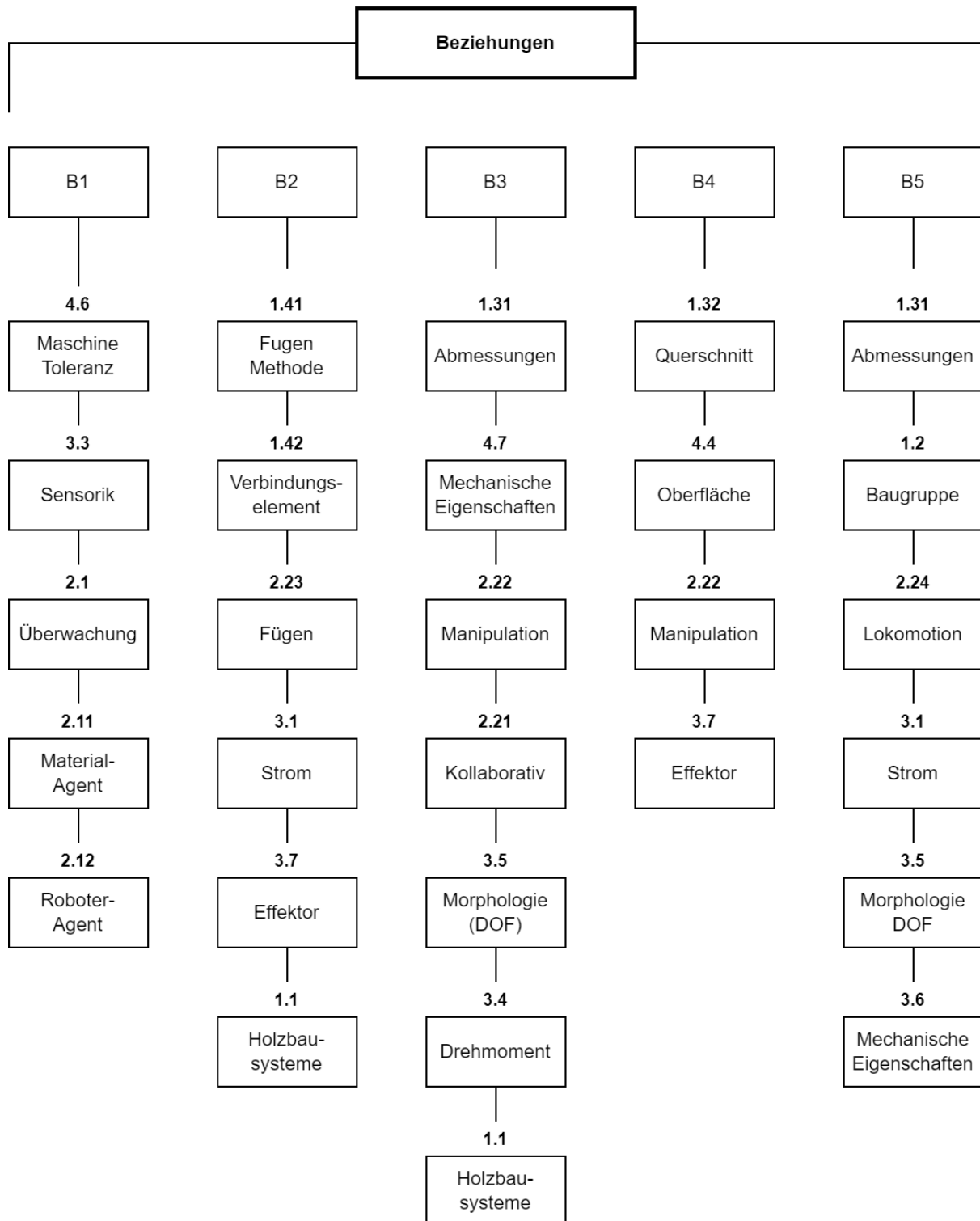
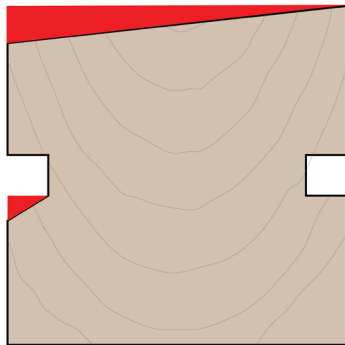
Abbildung 19: Beschreibung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den verschiedenen Robotern und Materialien

Abbildung 20: Beschreibung der ersten und zweiten Beziehung (B1 & B2)

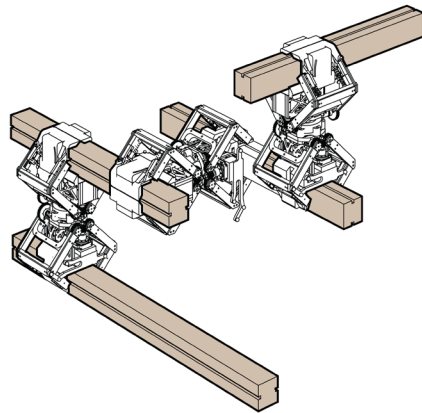
B1: 4.52-3.3-2.1-2.11-2.12



Wenn die Maschinentoleranz abnimmt, sollte die Genauigkeit der Erfassungshardware und der Überwachungssoftware zunehmen und umgekehrt. Die Erfassungs- und Überwachungsgenauigkeit α des Robotersystems ist daher umgekehrt proportional zur Bearbeitungstoleranz δ des Materials:

$$\alpha = k/\delta, \quad k \geq 1$$

B2: 1.41-1.42-2.212-3.1-3.7-1.1



Diese Beziehung kann mathematisch mit den Newton-Euler-Gleichungen beschrieben werden, die die Translations- und Rotationsdynamik eines starren Körpers beschreiben:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \boldsymbol{\tau} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m\mathbf{I}_3 & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{cm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{cm} \\ \boldsymbol{\alpha} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_{cm} \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix},$$

$\mathbf{F}$ = Gesamtkraft, die auf den Massenschwerpunkt wirkt
 m = Masse
 $\mathbf{I}_3$ = die 3×3-Identitätsmatrix
 $\mathbf{a}_{cm}$ = Beschleunigung des Massenschwerpunkts
 $\mathbf{v}_{cm}$ = Geschwindigkeit des Massenschwerpunkts
 $\boldsymbol{\tau}$ = Gesamtdrehmoment, das um den Massenschwerpunkt wirkt
 $\mathbf{I}_{cm}$ = Trägheitsmoment um den Massenschwerpunkt
 $\boldsymbol{\omega}$ = Winkelgeschwindigkeit des Körpers
 $\boldsymbol{\alpha}$ = Winkelbeschleunigung des Körpers

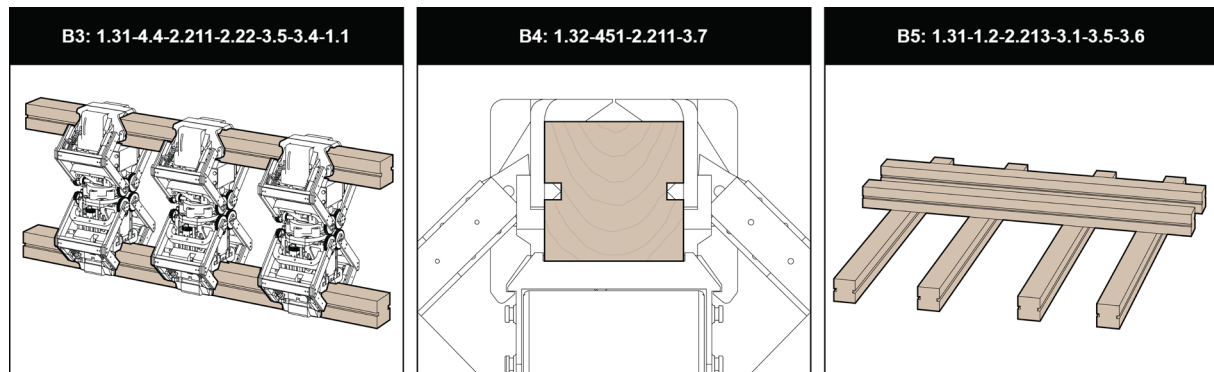
Die zweite Beziehung (B2) besagt, dass die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils, z. B. seine Dichte, seine Trägheitsmatrix und seine Abmessungen, die zusammen das Gewicht und die Dynamik des zu transportierenden Bauteils bestimmen, in direkter Beziehung zum Drehmoment und den Freiheitsgraden des Roboters selbst betrachtet werden müssen. Bei der verteilten Robotik ist dieses Verhältnis oft der begrenzende Faktor, da nur ein bestimmtes Drehmoment in derart kleinen Robotern untergebracht werden kann. (**Abbildung 20 links**).

Diese Beziehung (B2) verdeutlicht, dass die Auswahl der richtigen Roboterkomponenten und die Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften der zu transportierenden Bauteile von entscheidender Bedeutung sind. Das Gewicht und die Dynamik eines Bauteils bestimmen die erforderliche Leistungsfähigkeit des Roboters, insbesondere in Bezug auf das Drehmoment und die Anzahl der Freiheitsgrade. Kleine Roboter haben oft begrenzte Ressourcen und können nur ein begrenztes Drehmoment bereitstellen. Daher ist es wichtig, die mechanischen Eigenschaften der Bauteile zu berücksichtigen, um sicherzustellen, dass der Roboter in der Lage ist, die Bauteile effizient und sicher zu transportieren.

Die dritte Beziehung (B3) besagt, dass ein verteiltes Robotersystem ein Bauteil mehr oder weniger manipulieren kann, je nachdem, wie groß die Abmessungen des Bauteils und seine mechanischen Eigenschaften sind. Wenn die Abmessungen zunehmen, bedeutet dies, dass für die Durchführung von Manipulationsaufgaben eine Zusammenarbeit erforderlich ist oder dass das Drehmoment der Motoren erhöht

werden muss (**Abbildung 21 rechts**). Um alle diese Parameter auszubalancieren, können auch Änderungen am Bausystem notwendig werden (z. B. die Festlegung einer maximalen Bauteilgröße). Es kann auch notwendig sein, eine maximale Bauteilgröße festzulegen, um sicherzustellen, dass das verteilte Robotersystem in der Lage ist, die Manipulationsaufgaben effizient und sicher durchzuführen

Abbildung 21: Beschreibung der dritten und vierten Beziehung (B3 & B4)



Die vierte Beziehung (B4) besagt, dass der Endeffektor eines mobilen Roboters eng mit vielen Materialparametern abgestimmt werden muss (**Abbildung 21 Mitte**). Dazu gehört der Querschnitt eines Bauelements, da der Roboter das Material greifen muss, um es zu manipulieren, oder sich an der Struktur festhalten muss, um sich um sie herum zu bewegen. Die Oberflächenbeschaffenheit des Materials ist ebenfalls von Bedeutung, da das Material rutschig oder rau sein kann. In diesem Fall muss die Beschaffenheit des Endeffektors diese Eigenschaften widerspiegeln (z. B. hart für raue Oberflächen oder Gummi für das Greifen auf glatten Materialien).

Das letzte Beziehungsbeispiel (B5) beschreibt, dass die Abmessungen eines Bauelements sowie die Anordnung solcher Elemente in einer Baugruppe in Bezug auf die Morphologie des Roboters entworfen werden sollten (**Abbildung 21 rechts**). Eines der wichtigsten Prinzipien der verteilten Robotik ist, dass sich die Roboter auf der Struktur selbst fortbewegen, daher sollte die kinematische Freiheit, die erforderlich ist, um sich von Element zu Element in einer Baugruppe zu bewegen, innerhalb der Grenzen des Arbeitsbereichs des Roboters liegen. Die Morphologie des Roboters, einschließlich seiner Größe, Form und Bewegungsmöglichkeiten, sollte entsprechend den Anforderungen der Baugruppe entworfen werden. Wenn beispielsweise die Bauelemente klein und eng angeordnet sind, muss der Roboter in der Lage sein, sich in engen Räumen zu bewegen und präzise Manipulationen durchzuführen. Dies erfordert möglicherweise spezielle Gelenke oder Greifmechanismen, um die erforderliche Beweglichkeit zu gewährleisten.

Durch die Definition der Beziehungen sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht sind solche Systeme für die interdisziplinäre Zusammenarbeit prädestiniert und erleichtern die Co-Design-Methoden von Architekten und die Co-Optimierungsmethoden von Informatikern und Ingenieuren.

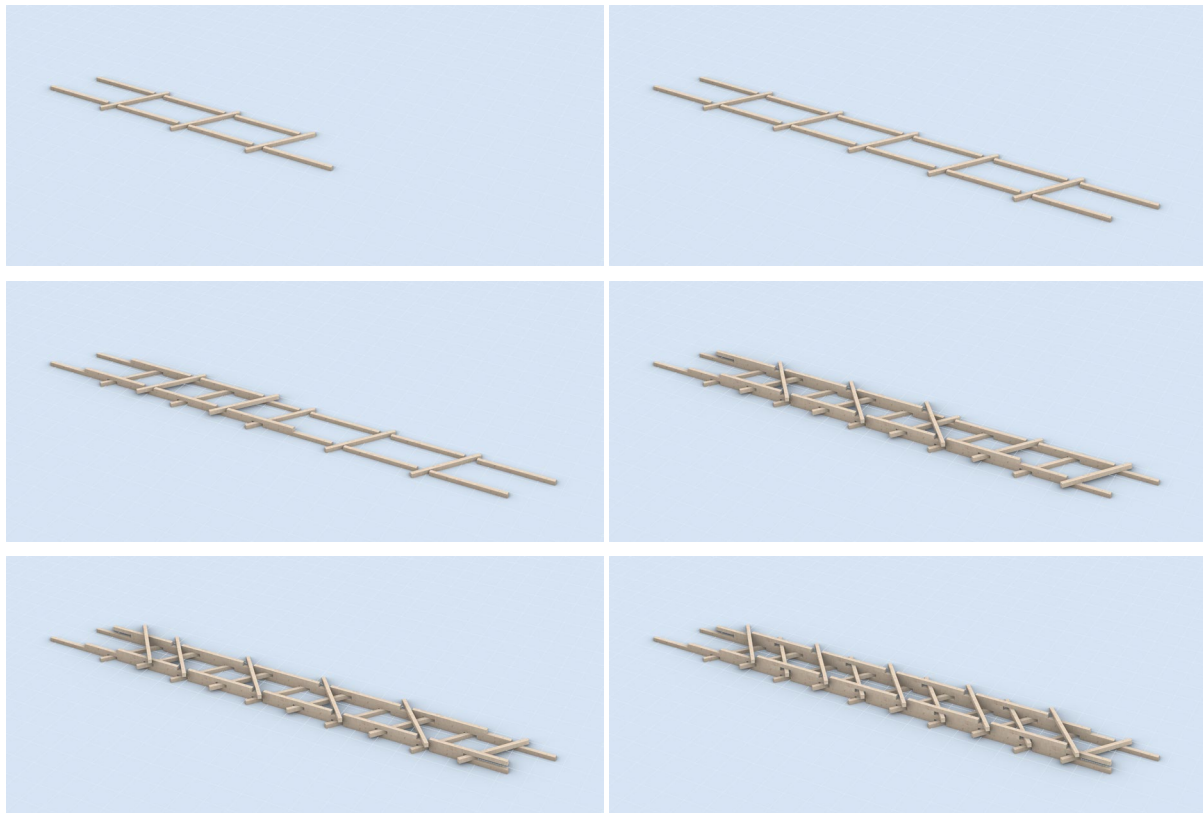
Methoden zur Entwicklung des Holzbaus mittels verteilter Robotik aus den verschiedenen Hierarchien der Baukonstruktion (d.h. Verbindung, Bauelement und Baugruppe)

Aufgrund der inhärenten Verbindungen und Abhängigkeiten zwischen dem Gebäudesystem und dem Robotersystem bei der Arbeit mit verteilten Robotern ist es schwierig, die Bausysteme isoliert vom Automatisierungssystem zu entwickeln. Wie die Skizze der Beziehungen zeigt, gibt es direkte Korrelationen zwischen dem Entwurf des Gebäudes und dem Robotersystem, das es zusammenbaut (**Abbildung 19**).

Daher wurde mit dem im Stand der Forschung beschriebenen System gearbeitet, das im Rahmen des IntCDC entwickelt wurde (Leder et al. 2022). Die entwickelten Methoden, wie sie in den folgenden Unterabschnitten diskutiert werden, beziehen sich auf den einachsigen Roboter, der Strukturen aufbaut, die schichtweise

aufeinander aufbauen. Jede Schicht der Struktur besteht aus Vierkanthölzern, die nacheinander in die Struktur eingesetzt werden. Die Schichten werden, wie in **Abbildung 22** gezeigt, übereinander aufgebaut. Die entwickelten Methoden lassen sich aber auch auf andere Robotersysteme übertragen, die in der Lage sind, Holzstreben auf die gleiche Weise schichtweise von oben zu montieren. Wenn zum Beispiel die Drohnen der „*Flight Assembled Architecture*“ Holzstreben tragen könnten, ließen sich die Methoden auch auf sie anwenden (Augugliaro et al. 2013).

Abbildung 22: Visualisierung der sequentiellen Schichtung von Holzkonstruktionen



Die Entwicklung des Holzbausystems wurde, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, in drei Hierarchien aufgeteilt: Füge- und Verbindungsprinzipien, Einzelteilausbildung und Baugruppenausbildung. Jede dieser Hierarchien enthält spezifische methodische Beiträge.

Identifikation von Computerentwurfsprozessen (AP 3.1)

Obwohl die Industrialisierung und Automatisierung in der Architektur und im Baugewerbe im Allgemeinen nur langsam voranschreitet, wird der Einsatz von Building Information Modeling (BIM) zur Koordinierung aller Teile des Planungs- und Bauprozesses immer mehr zur gängigen Praxis. BIM ermöglicht es derzeit, Bauprozesse kostengünstiger zu gestalten, die Produktivität zu steigern und die Kosten zu senken (Bryde/ Broquetas/Volm 2013; Doumbouya/Gao/Guan 2016). In jüngster Zeit hat die Einführung parametrischer Entwurfsprozesse, bei denen algorithmische Beziehungen zwischen Parametern aus dem Entwurfs- und Konstruktionsprozess den Entwurfsprozess steuern, eine Erweiterung der BIM-Arbeitsabläufe ermöglicht, um kompliziertere Probleme anzugehen und Elemente der Roboterfertigung einzuführen. Zwei Beispiele für

solche Software sind Grasshopper⁴ für Rhinoceros 3D⁵ und Dynamo⁶, das sich mit Revit⁷ verbinden lässt. Beides sind visuelle Programmiersprachen, die eine rechnergestützte Steuerung der Entwurfs- und Modellierungsprozesse in der architektonischen Konstruktion ermöglichen und manchmal sogar die Analyse, Herstellung und Simulation eines Bauwerks unterstützen.

Bei der Betrachtung der Anwendung von Roboterautomatisierung und verteilten Robotersystemen im Bauwesen müssen viele Bereiche jenseits der architektonischen Planung einbezogen werden. Dazu gehören Robotik, Informatik und Bauingenieurwesen, die eine Vielzahl unterschiedlicher Softwaretools verwenden. Dazu gehören vor allem Tools, die sich mit der robotergestützten Bahnplanung der Roboter befassen, die das Bauwerk errichten. Um Informationen auszutauschen, werden derzeit meist große Dateien übertragen, die von der jeweiligen Software und der Person, die die Datei öffnet, nachbearbeitet werden. Dieser Arbeitsablauf steht jedoch nachweislich im Widerspruch zur multidisziplinären Natur der Bauplanung und kann die Möglichkeiten von Entwürfen generell einschränken (Elshani et al. 2022a). Darüber hinaus können bestehende Arbeitsabläufe nur schwer angepasst werden, wenn mehr experimentelle Entwurfstechniken und -methoden in Betracht gezogen werden.

Um dieses Problem zu lösen, nutzt die Forschung am IntCDC das Buildings and Habitat Object Model (BHoM), das von der Firma Buro Happold entwickelt wurde, als potenzielle Lösung (Elshani et al. 2022). BHoM⁸ ist ein Open-Source-Rahmenwerk, das den Austausch von Gebäudeobjektinformationen zwischen verschiedenen Softwareprogrammen über lesbaren Code anstelle von abstrakten *Industry Foundation Classes* (IFC)-Dateien ermöglicht. Es kann sowohl in visueller, ablaufbasierter Programmiersoftware als auch direkt in textbasiertem, imperativem Code verwendet werden, was seine einfache Nutzung in einer Vielzahl von Software ermöglicht (Poinet et al. 2020). Ein Beispiel für die Datenübergabe ist die Übertragung eines 3D-Modells einer zu bauenden Struktur von Rhino3D an das Robot Operating System (ROS), um beispielsweise eine Roboterbahnplanung durchzuführen. Dies hängt jedoch von Adaptern ab, die Daten zwischen verschiedenen Softwareprogrammen abbilden und übersetzen. Es gibt zwar einige davon, aber nicht alle, die für die Konstruktion mit verteilter Robotik notwendig wären, wurden bereits entwickelt.

Aufgrund des Potenzials von BHoM, seiner zunehmenden Nutzung und der Möglichkeit, neuen Code anzupassen und zu erstellen, um seine Funktionalität zu verbessern, wurde das BHoM-Objektmodell gewählt. Das BHoM-Objektmodell wurde erweitert, um die verschiedenen Daten von Gebäudesystemen zu berücksichtigen, die von verteilten Robotersystemen gebaut werden. Der Einsatz von BHoM ermöglicht die weitere Integration von verteilter Robotik in Standardsoftware in den Bereichen Architektur, Ingenieurwesen und Bauwesen. Die Diskussion darüber wird in den folgenden Abschnitten erfolgen.

Entwicklung von Füge- und Verbindungsprinzipien (AP 3.2)

Das Ziel bei der Untersuchung von Verbindungsstrategien war es, eine Verbindungsstrategie weiterzuentwickeln, die drei wichtige Kriterien erfüllt (Leder et al. 2024). Das erste war, eine bestehende Holzbautechnik zu nutzen. In Anbetracht der langjährigen Geschichte des Holzbaus und der Neuartigkeit des Roboter-Montagesystems wurde das Ziel verfolgt, bestehende Verbindungsstrategien im Holzbau zu untersuchen, anstatt eine neue zu entwickeln. Das zweite wichtige Bewertungskriterium war, ob kleine mobile Maschinen dies leisten können. Die größte Einschränkung dabei ist die relativ geringe Kraft solcher Maschinen. Das letzte Kriterium ist, dass die Verbindung das Potenzial der Bauelemente, lösbar und wiederverwendbar zu sein, berücksichtigen sollte. Da eines der Potenziale verteilter Robotersysteme darin besteht, dass die Roboter

⁴ <https://www.grasshopper3d.com/>

⁵ <https://www.rhino3d.com/>

⁶ <https://dynamobim.org/>

⁷ <https://www.autodesk.com/products/revit/overview/>

⁸ <https://bhom.xyz>

eine Struktur während des gesamten Bauprozesses funktional anpassen und die Struktur nutzen können, um sie im Laufe der Zeit zu verändern, wäre die Fähigkeit der Verbindung, reversibel zu sein, die einzige Möglichkeit, dies zu ermöglichen. Deshalb wurden die drei Evaluationskriterien für Verbindungsmethoden eingeführt.

Zur allgemeinen Einordnung der verschiedenen Verbindungsmethoden wurde eine DIN-Norm aus der Fertigung herangezogen (DIN 8580:2003-09). **Tabelle 3** beschreibt die Begründung für die Auswahl des *An- und Einpressens* als Verbindungsart von Holzelementen als die beste Strategie bei der Nutzung verteilter Robotersysteme. Solche Verbindungen erfordern in der Regel keine großen Kräfte und erfordern zudem die minimalste Hardware für den Roboter. Innerhalb dieser Kategorie wurden die Optionen auf der Grundlage der Begründungen in **Tabelle 4** weiter auf das Verschrauben eingegrenzt. Beim Nageln zum Beispiel benötigen die Roboter Luftdruck oder hohe Kraft. Genagelte Verbindungen lassen sich nicht so leicht lösen, um eine Neuordnung oder Demontage der Bauelemente zu ermöglichen.

Tabelle 3: Begründung für den Ausschluss bestimmter Verbindungsarten für diese Untersuchung

Verbindungsarten	Begründung
Zusammensetzung	Erfordert große Kraft
Füllen	keine Anwendung im Holzbau
An- und Einpressen	-
Fügen durch Urformen	im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt
Fügen durch Umformen	im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt
Fügen durch Schweißen	keine Anwendung im Holzbau
Fügen durch Lötten	keine Anwendung im Holzbau
Kleben	Nicht wiederherstellbar

Tabelle 4: Begründung für den Ausschluss bestimmter Arten des An- und Einpressens

Verbindungsarten	Begründung
Schrauben	-
Klemmen	Nicht leicht rückbaubar / wiederverwendbar
Klammern	Nicht leicht wiederherstellbar
Fügen durch Presspassung	keine Anwendung im Holzbau
Nageln Verstiften Einschlagen	Nicht wiederherstellbar

Verbindungsarten	Begründung
Verkeilen	keine Anwendung im Holzbau
Verspannen	keine Anwendung im Holzbau

Quelle: (Leder et al. 2024)

Daher wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung Physikalische Intelligenz des Max-Planck-Instituts ein mobiler Schraubeffektor entwickelt, der auf einem zuvor skizzierten Design basiert (Leder et al. 2019). Der Effektor soll es mobilen Maschinen ermöglichen, einen Satz von Schrauben zu tragen und mit diesen Schrauben Holzelemente miteinander zu verbinden. Das Design des Effektors basiert auf einem Magazinschrauber, der insofern ähnliche Eigenschaften hat, als er viele Schrauben halten kann und sich wiederholende Verbindungsaufgaben ermöglicht.

Konkret wurde ein Bosch Akku-Trockenbauschrauber GSR 18V-EC TE PROFESSIONAL⁹ zusammen mit einem Bosch Magazinaufsatz GMA 55 PROFESSIONAL¹⁰ für die Erstellung des Effektors analysiert. Der Trockenbauschrauber dient als Rotationsmechanismus, der die Schraube antreibt, während der Zweck des Magazinaufsatzes darin besteht, die Magazinschrauben zu halten und die Schrauben vorzuschieben, sobald eine Schraube eingeschraubt ist. Diese drei Funktionen waren also die Vorgaben für die Konstruktion des Bohreffektors (Leder et al. 2024).

Die allgemeinen Abmessungen der beiden Teile betragen 451 x 239 x 63 [mm] ohne die zusätzliche Länge der nachlaufenden Magazinschrauben. Obwohl dies bereits relativ klein ist, bestand ein zusätzliches Designkriterium darin, die Größe des Effektors so weit wie möglich zu minimieren, da er von einem kleinen Roboter verwendet werden soll. Daher war das Ziel, die gesamte Roboterhardware so klein wie möglich zu gestalten (Leder et al. 2024).

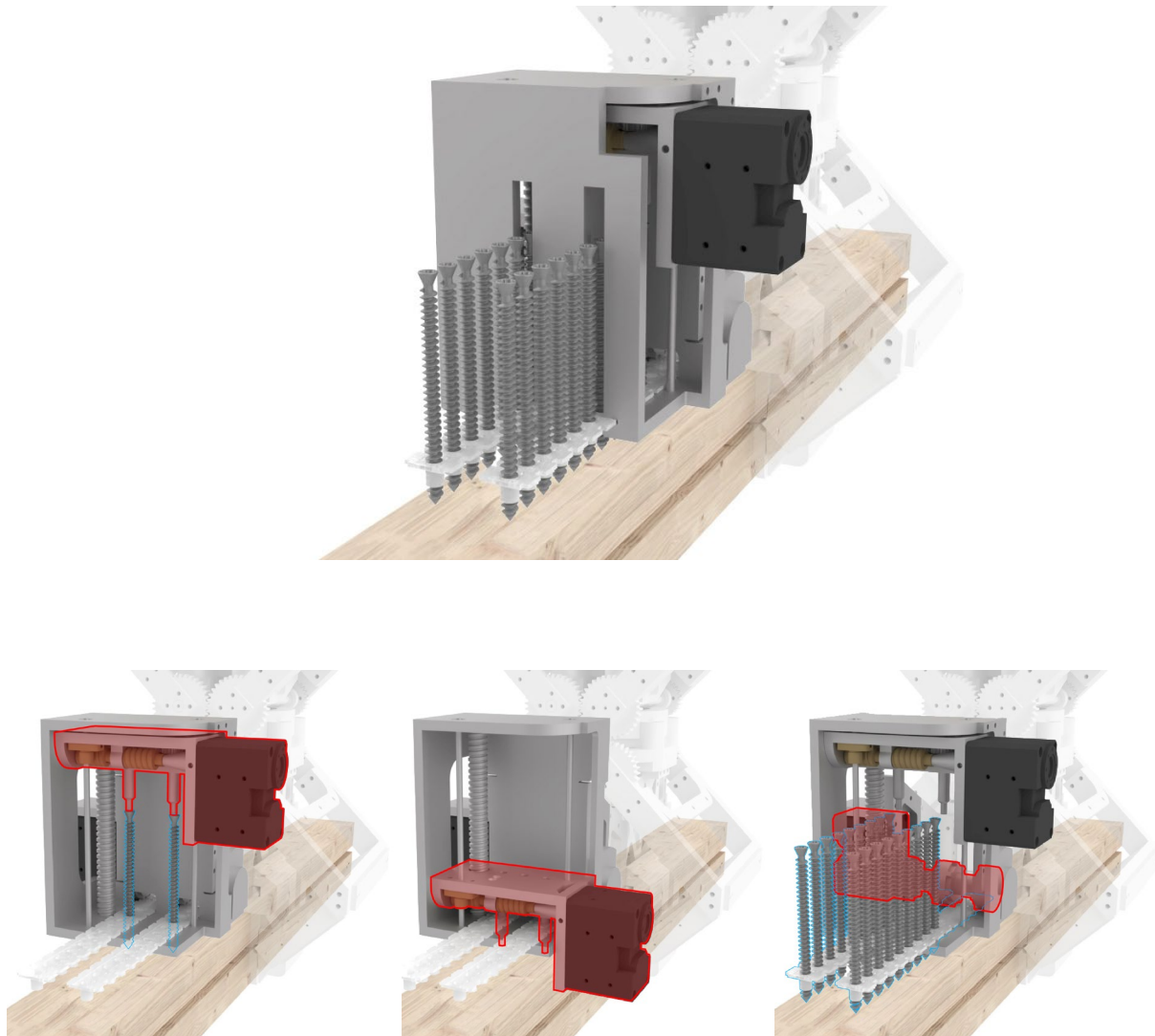
Der Effektor ist sowohl in einer Visualisierung (**Abbildung 23**) als auch in einem Foto (**Abbildung 24**) dargestellt. Der Effektor arbeitet, indem er einen ersten Motor antreibt, der die Bohrer für die beim Schrauben erforderliche Drehbewegung dreht und gleichzeitig Kraft in Richtung der Verbindung ausübt. Ein zweiter Motor schiebt die Magazinschrauben vor, sodass nach Abschluss einer Verbindung die nächste Schraube für die nächste Verbindung gesetzt werden kann. Eine weitere Besonderheit des Effektors ist, dass er zwei Schrauben gleichzeitig setzen kann. Dies soll es ermöglichen, strukturelle Verbindungen in einem einzigen Moment herzustellen, da das Zusammenfügen von zwei Streben mit einer Schraube möglicherweise eine Drehung um die Achse der Schraube ermöglichen würde.

Abbildung 23: Custom Effektor für ein verteiltes Robotersystem, mit dem ein Roboter Holzelemente zusammenschrauben kann (oben). Er enthält zwei Aktoren. Der erste dreht die Schrauben und gibt Kraft in die Schraubrichtung (unten links und unten Mitte). Der zweite

⁹ <https://www.bosch-professional.com/de/de/products/gtb-18v-45-06019K7000>

¹⁰ <https://www.bosch-professional.com/de/de/products/gma-55-1600A025GD>

Aktuator schiebt das Schraubenmagazin vor, sodass nach dem Setzen der Schrauben neue Schrauben nachgeschoben werden (Unten rechts).



Die Steuerung und die Stromversorgung der Motoren sind mit der Hauptsteuerplatine und der Stromversorgung des Roboters verbunden. Das Endmaß wiederum ohne die zusätzliche Länge der nachlaufenden Magazinschrauben beträgt 117,7 x 136,3 x 85 [mm]. **Tabelle 5** entspricht einer Stückliste für den Effektor.

Abbildung 24: Foto eines Custom Effektor für ein verteiltes Robotersystem

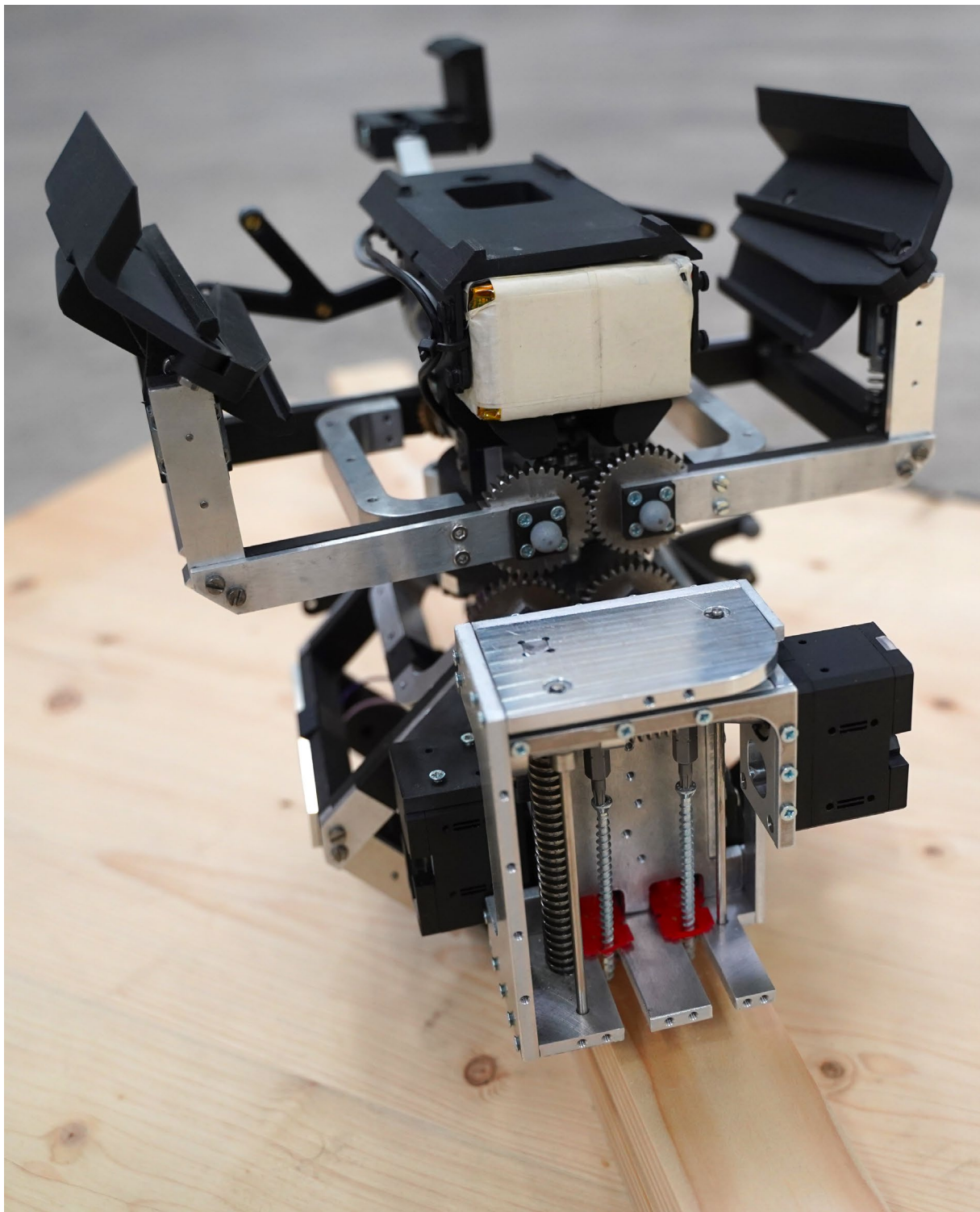


Tabelle 5: Teileliste für den Custom Effektor

Teil	Beschreibung	Menge
ROBOTIS Dynamixel XL430-W250 ¹¹	Servomotor	2
Motorwelle	kundenspezifisch bearbeitet zur Aufnahme von Schneckenrädern	1
Schneckenradsätze	Übersetzung der Motordrehung in Axialbewegung und Bohrerndrehung	2
3D-gedruckte Ausrüstung	Custom Gear für den Vorschub von magazinierten Schrauben	1
Zahnräder	Zahnräder für die Drehung von Wellen	2
Getriebewelle	Kundenspezifisch gefräst	2
Lineare Wellen	Wellen, auf denen die beweglichen Teile des Effektors gleiten	2
Leitspindel	Kundenspezifische Länge	1
Bohreinsätze	Torx-Schraubenbits	2
Kunststoff-Magazinschrauben	Schrauben, die mit einer Kunststoffkette verbunden sind	2
Kugellager	Kugellager in verschiedenen Abmessungen zur Aufnahme von Wellen und Zahnrädern	12
Aluminium-Platten	Kundenspezifische bearbeitetes Gehäuse zur Aufnahme aller Teile	18
M3-Schrauben	Für die Montage der Aluminium-Platten	zahlreich

Die Regeln für die Anordnung von Schrauben zwischen Holzbauteilen und ihre Anwendung bei der Konstruktion von Holzbauteilen waren ein weiterer Aspekt bei der Untersuchung von Schraubverbindungen. Es gibt eine spezielle DIN-Anforderung (DIN EN 1995-1-1:2022-12) für Verbindungen im Holzbau. Darin werden Mindestabstände zum Rand eines Holzbauteils, Schraubenabstände und Schraubendurchmesser festgelegt. Diese sind abhängig von der Faserrichtung sowie dem Winkel, in dem die Schrauben eingebracht werden. Die Nutzung dieser Informationen ist wichtig für die Bemessung von Konstruktionen, die den aktuellen Normen der Industrie entsprechen.

¹¹ <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl430-w250/>

Daher wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, die in der DIN definierten Regeln integriert. Die Entwicklung der Methode wurde in zwei Teile gegliedert: (i) die maximalen Schraubverbindungen zwischen zwei Elementen und (ii) die maximalen Schraubverbindungen zwischen allen Elementen innerhalb einer Struktur. Der erste Teil wird hier erörtert und der zweite wird in einem folgenden Unterabschnitt bei der Betrachtung der Bemessung von Baugruppen behandelt.

Um die Schrauben zwischen zwei Streben zu definieren, wird ein ähnlicher Ansatz wie von Apolinarska et al. (2016) verwendet, der auf einem ähnlichen, nicht mehr gültigen Schweizer Code basierte (SIA 265:2003 Timber Structures 2003). **Abbildung 25** stellt den entwickelten Algorithmus dar. Der Algorithmus beginnt mit der Berechnung des Überschneidungsbereichs zwischen den beiden Elementen anhand der definierten Randabstände aus der DIN. Ist dieser Bereich kein Parallelogramm, werden die Kanten zu einem solchen erweitert. Anhand der Abmessungen der Elemente kann der Schraubendurchmesser berechnet werden. Dieser wird verwendet, um die beiden nicht-parallelen Seiten des Parallelogramms unter Berücksichtigung der Schraubenversatzmaße in das Innere des Parallelogramms einzuordnen. Die Visualisierung des Versatzes erfolgt mithilfe von Ellipsen, die den Versatz in Bezug auf die Faserrichtung wie in Apolinarska et al. (2016) darstellen, wobei in Faserrichtung ein größerer Versatz erforderlich ist. Eine abschließende Prüfung erfolgt unter Berücksichtigung der potenziellen Erweiterung des Überlappungsbereichs durch Erstellen des Parallelogramms, um zu sehen, ob alle Schnittpunkte innerhalb des ursprünglichen Überlappungsbereichs liegen. Der Algorithmus wird auch in **Abbildung 26** visualisiert. Dieser Algorithmus ist derzeit in Grasshopper innerhalb von Rhinoceros3D, einer gängigen Software für Architekturdesign, implementiert. **Abbildung 27** ist eine Visualisierung verschiedener Beispiele der maximalen Schraubenplatzierung für lineare Holzbauteile mit verschiedenen Querschnitten.

Abbildung 25: Algorithmus für die Schraubenplatzierung zwischen zwei Elementen

Algorithmus 1: Algorithmus für die Schraubenplatzierung zwischen zwei Elementen

- 1 **Eingabe:** Geradlinige Holzelemente
- 2 **Ausgang:** Maximales Schraubenplatzierung in den Verbindungszonen zwischen zwei Streben
- 3 Überlappungsbereich berechnen
- 4 **If** Überlappungsbereich $\neq$ Parallelogramm:
 - 5 Überlappungsbereich in Überlappungsparallelogramm umwandeln
- 6 Berechnung des Überlappungsgitters
- 7 Überprüfen, ob Schnittpunkte innerhalb der Überlappungsregion liegen
- 8 **Return** der Schnittpunkte als Schraubenposition

Abbildung 26: Visualisierung des Algorithmus zur Schraubenplatzierung zwischen zwei Elementen: (A) Überlappungsbereich berechnen (B) Überlappungsbereich in Überlappungsparallelogramm umwandeln (C) Berechnung des Überlappungsgitters (D) Überprüfen, ob Schnittpunkte innerhalb der Überlappungsregion liegen. Die Faserrichtung verläuft parallel zur längeren Kante der

Rechtecke. Zwei Ellipsen, eine rote und eine blaue, zeigen den Einflussbereich einer einzelnen Schraube an. Die Ellipsen basieren auf der Faserrichtung der Strebe, die farblich dazu passt. Keine zwei Schrauben können innerhalb einer einzigen Ellipse liegen.

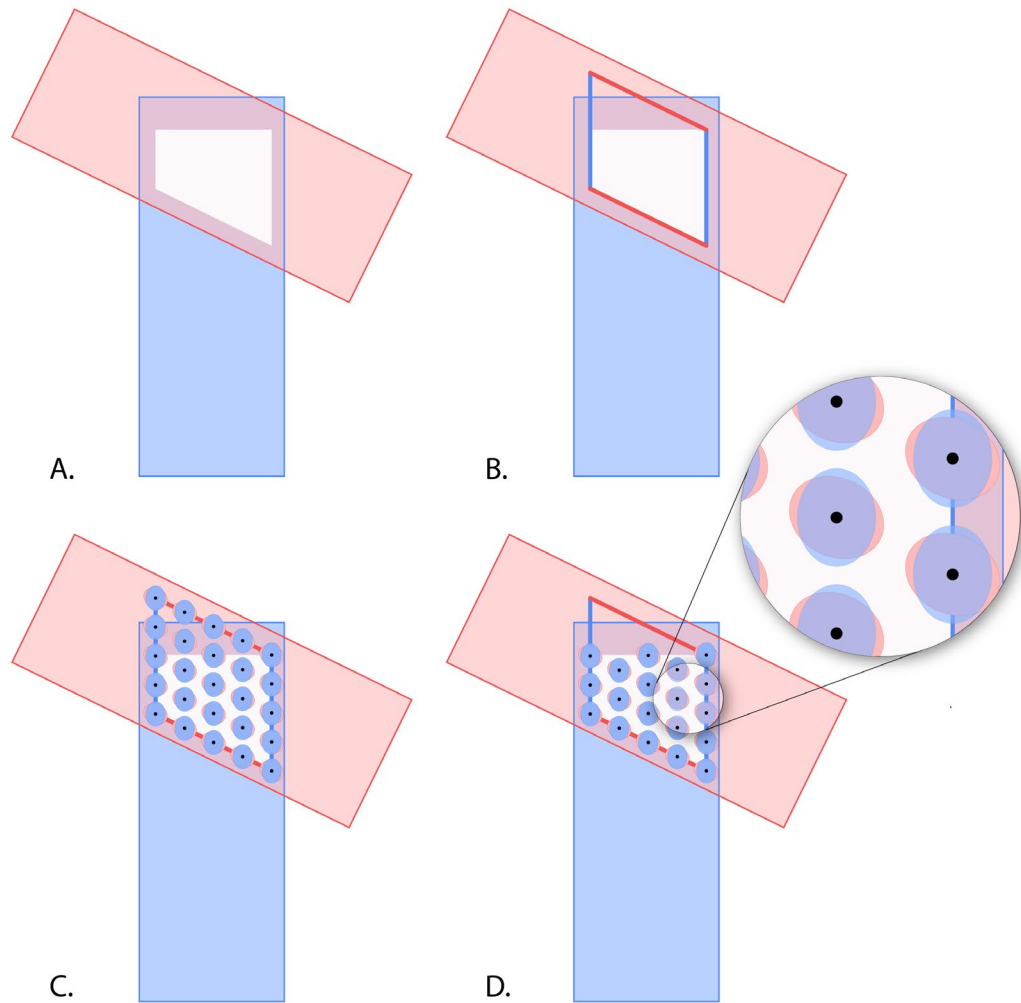
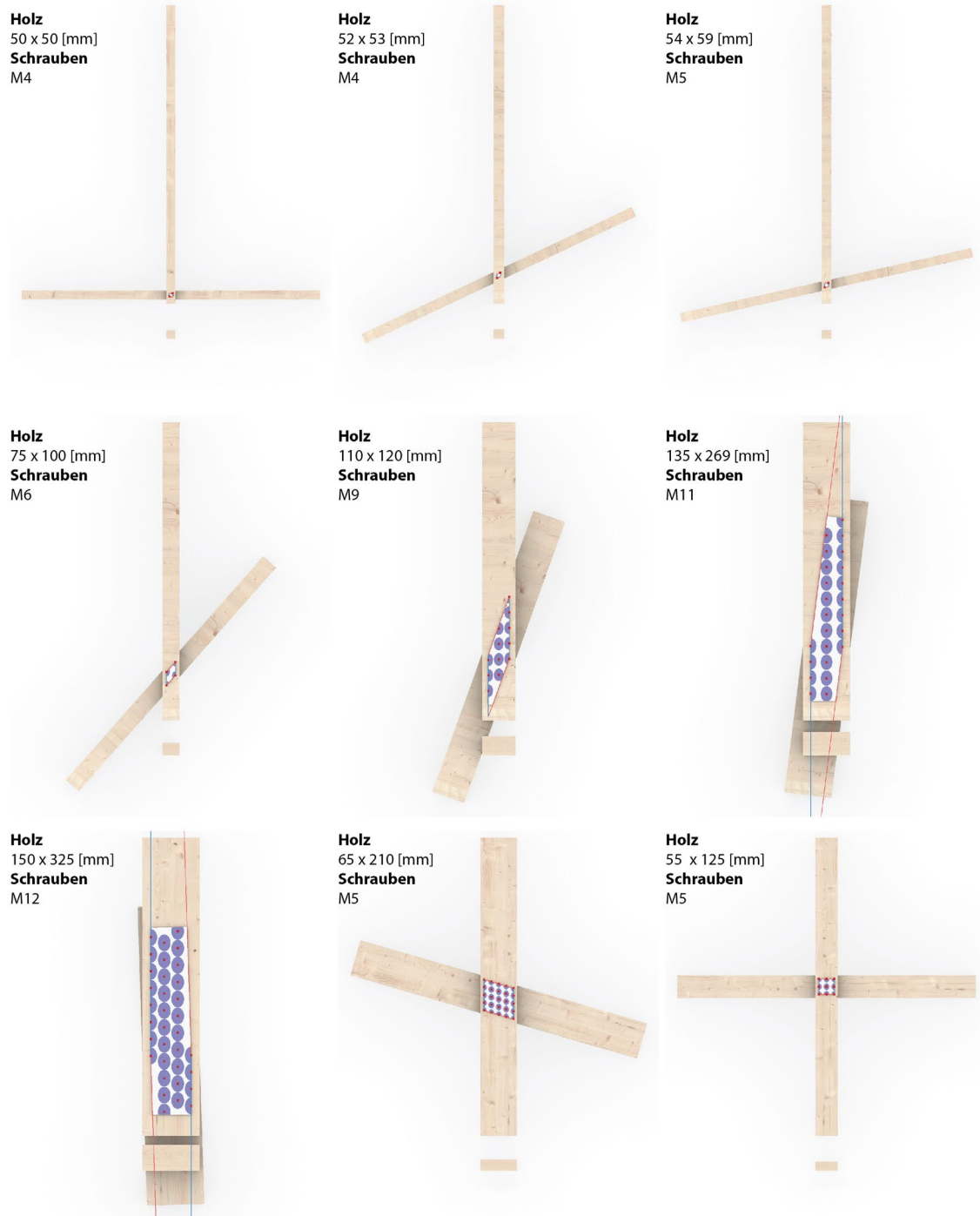


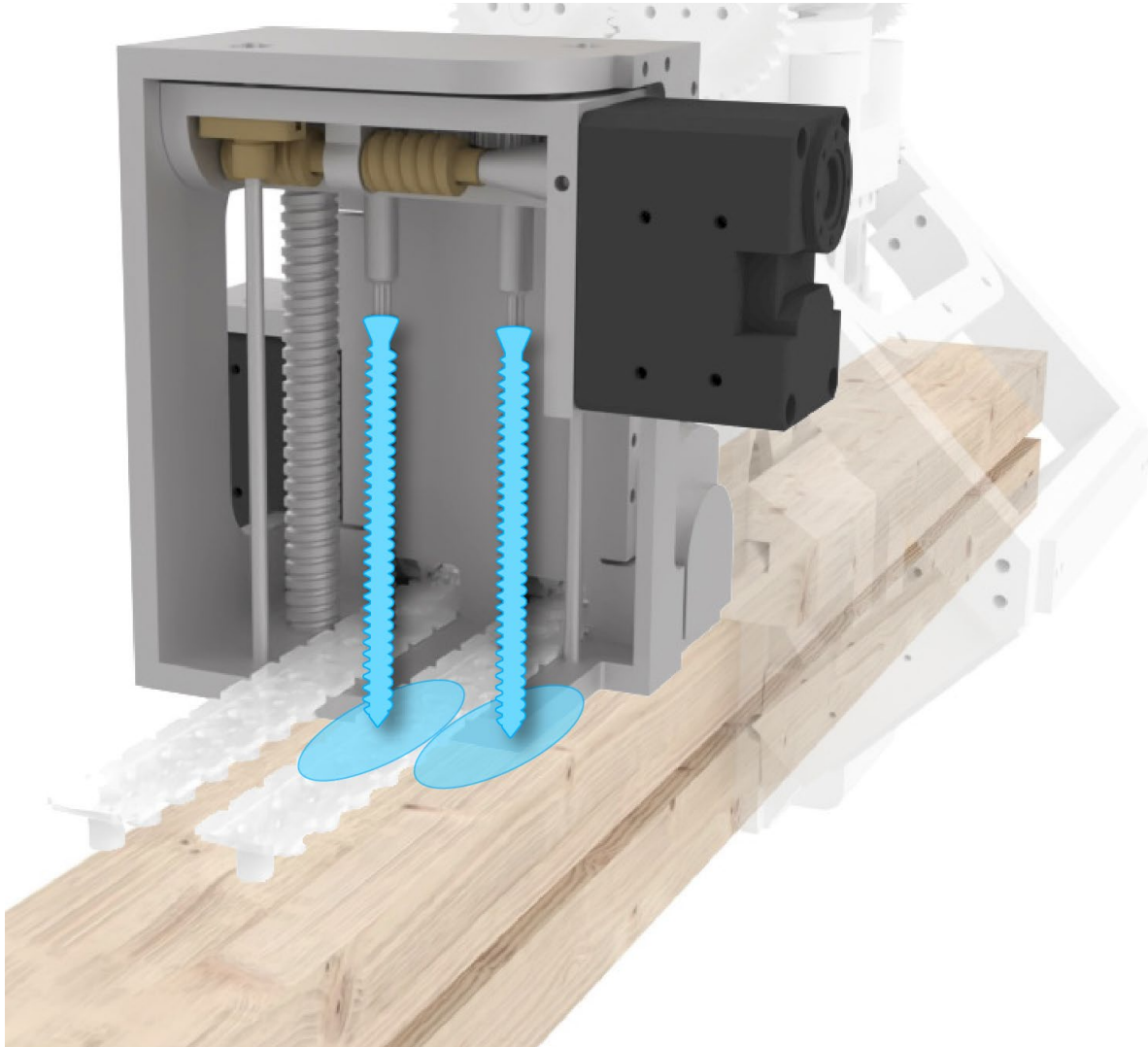
Abbildung 27: Visualisierung der maximalen Schraubenplatzierung zwischen zwei Streben in verschiedenen Winkeln und Querschnitten. Der Querschnitt ist am unteren Rand der Bilder dargestellt. Die blauen Ellipsen zeigen den Versatz zwischen den Schrauben relativ zur Faserrichtung der oberen Strebe (derjenigen, die sich nicht dreht) und die roten Ellipsen für die andere Strebe.



Dies hat auch die Dimensionierung des Effektors beeinflusst, der auf der Grundlage der Schraubenabmessungen angepasst werden kann (**Abbildung 28**). Eine Änderung der Schraubenabmessungen würde eine Anpassung des Abstands zwischen den Schrauben erfordern, was

letztlich einen Austausch der Motorwelle und eine Verlängerung einiger der Aluminiumplatten des Effektors bedeuten würde.

Abbildung 28: Untersuchung der Auswirkungen der Schraubenplatzierung auf das Design des Effektors. Die Ellipse zeigt die erforderlichen Abstände zwischen den Schrauben in Bezug auf die Faserrichtung, die in Längsrichtung des Holzelements verläuft.



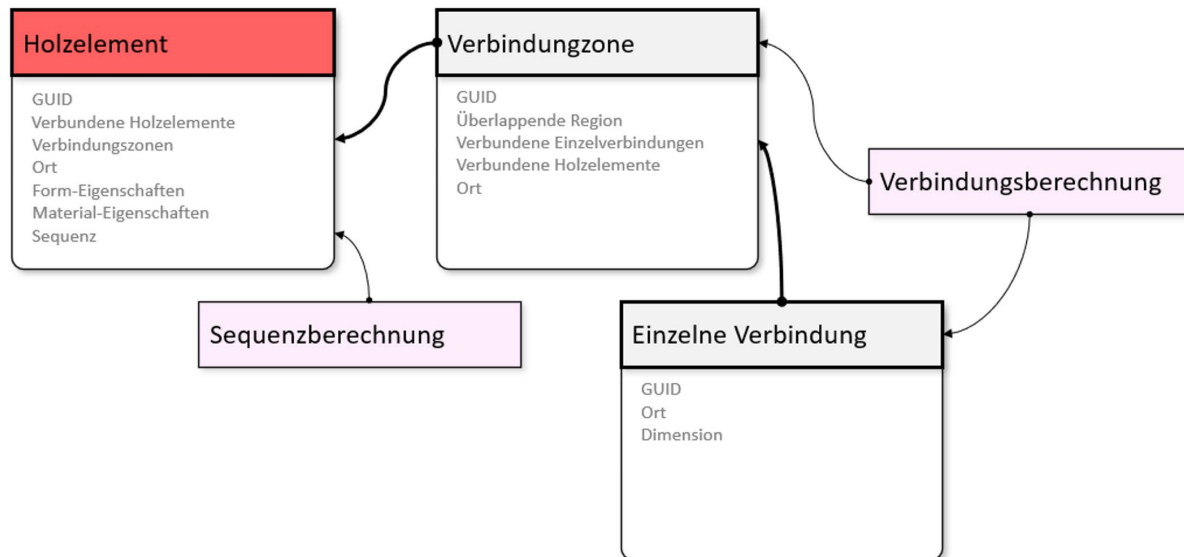
Entwicklung der Einzelteilausbildung (AP 3.3)

Weil Einzelteile in direkter Beziehung zum Robotersystem, konkret zur Roboter-Tragfähigkeit und seinem Greifer, definiert werden, konzentrierte sich die Entwicklung von Einzelteilen hauptsächlich auf die digitale Darstellung von Einzelementen. Die Einzelemente und die Verbindung zwischen ihnen sind die grundlegenden Elemente, die es ermöglichen, Baukonstruktionen zu spezifizieren. Das BHoM-Objektmodell wurde aus den oben genannten Gründen verwendet, um eine Methode für die Kommunikation von Entwürfen zwischen verschiedenen Softwareprogrammen zu entwickeln.

Im Mittelpunkt des entwickelten Objektmodells stehen die Holzelemente (**Abbildung 29**). Die Holzelemente enthalten Informationen über ihre Position in der Struktur, die anderen Elemente, mit denen sie verbunden sind, die Details der Verbindungen zwischen den Elementen sowie die Form und die Materialeigenschaften des Elements. Die Ergebnisse des Algorithmus zur Bestimmung der Schraubenposition werden an zwei Stellen gespeichert. In einer einzelnen Verbindungsschicht werden die genaue Lage der Schrauben sowie ihre

Abmessungen gespeichert und in einer Verbindungszone werden der Überlappungsbereich, die Elemente, die er verbindet, seine Lage in der Struktur sowie die Schrauben, die er enthält, gespeichert. Die Holzelemente enthalten darüber hinaus Informationen über die Reihenfolge, in der sie zusammengesetzt werden, was im folgenden Unterabschnitt erläutert wird.

Abbildung 29: Grafischer Überblick über das mit BHoM entwickelte benutzerdefinierte Objektmodell, das die Beziehungen zwischen den Objekten und ihren Eigenschaften zeigt. Rosa Kästchen zeigen Berechnungen an, die Teile des Modells informieren.



Die Entwürfe werden dann als ein Objektmodell in einer einzigen JSON-Datei ausgegeben, wie in **Abbildung 30** zu sehen ist. Während der Bearbeitung des Entwurfs kann das Modell aktualisiert und erweitert werden, um weitere Informationen über den Entwurf zu speichern. Derzeit liegt der Schwerpunkt der Entwicklung des Objektmodells auf seiner Ergänzung mit Informationen über die Baukonstruktion und die Montageabfolge.

Abbildung 30: Beispiel für die Erstellung von Code zur Darstellung der Bauelemente einer Holzkonstruktion

```

0      [
1      {
2          "_t": "BH.oM.Physical.Elements.Beam",
3          "BHoM_Guid": "d05e7da7-4246-4708-92c3-c41ea28720c2",
4          "Name": "Strut",
5          "Fragments": [],
6          "Tags": [],
7          "CustomData": {
8              "Connecting_Strut_Guids": [ "d05e7da7-4246-4708-92c3-c41ea28720c2", "d05e7da7-
9              4246-4708-92c3-c41ea28720c2", "d05e7da7-4246-4708-92c3-c41ea28720c2" ],
10             "Connection_Guids": [ "e8a1353b-a62b-4430-a2b1-0aee089c2bee", "7d747ac9-d976-
11             4fef-90ae-15e7549ffc35", "e0f6cf1f-0e57-4331-b50e-d92d301de3a0" ],
12             "Root": 1,
13             "Source": 0
14         },
15         "Location": {
16             "_t": "BH.oM.Geometry.Polyline",
17             "ControlPoints": [
18                 {
19                     "_t": "BH.oM.Geometry.Point",
20                     .
21                     .
22                     .
23                 }
24             ]
25         }
26     }
27 ]

```

Aufgrund der Flexibilität von BHoM können in Zukunft weitere Informationen aus anderen Bereichen hinzugefügt werden. Ein Beispiel hierfür wurde vor kurzem von anderen Forschern im Rahmen des IntCDC gezeigt (Gil Perez et al. 2022). Gil Perez et al. haben ein computergestütztes Co-Design-Framework entwickelt, um neue Formen der Zusammenarbeit für kernlose, gewinkelte Faserstrukturen zu ermöglichen. Sie haben das gemeinsame Objektmodell BHoM eingeführt, das als zentraler Datenspeicher fungiert und den interdisziplinären Datenaustausch sowie die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Bereichen erleichtert. Die ausgetauschten Daten enthalten Informationen über Design, Simulation, Fertigung, Qualitätsbewertung und Datenintegration, die verschiedene Bereiche in der Architektur-, Ingenieur- und Bauindustrie repräsentieren.

Für diese Forschung wurden die BHoM-Dateien mit zwei Softwareprogrammen, Grasshopper und RAI¹², verknüpft. Grasshopper wird für den Entwurf der Gebäudekonstruktion verwendet, während RAI für die Abfolge der Bauelemente in der Struktur zuständig ist. RAI ist eine Codebasis, die eine Reihe von Darstellungen und Methoden für Robotik, maschinelles Lernen (ML) und künstliche Intelligenz (KI) enthält. Sie umfasst auch eine Simulationsumgebung sowie einen Roboterbewegungsoptimierer für das Problem der k-Order Motion Optimization (KOMO) (Toussaint 2014). In dieser Untersuchung wurde die Simulationsumgebung verwendet. Um eine Schnittstelle zu den JSON-Ausgabedateien von BHoM zu schaffen, wurden von den Codeentwicklern verschiedene Toolkits entwickelt, die zusammen mit BoHM heruntergeladen und in der Open-Source-Codebasis¹³ eingesehen werden können. Das bereits vorhandene Toolkit für Grasshopper¹⁴ wurde direkt implementiert. Für RAI wurde jedoch ein eigenes Toolkit entwickelt. Weitere Einzelheiten zu diesem benutzerdefinierten Toolkit werden im nächsten Abschnitt erörtert.

Entwicklung der Baugruppenausbildung (AP 3.4)

Für die Entwicklung von Baugruppen wurde die Forschung in zwei Richtungen aufgeteilt, wobei sich die eine auf die Vor-Ort-Konstruktion und die andere auf die Vorfertigung konzentrierte. Diese Entscheidung wurde getroffen, weil durch die Literaturrecherche in **AP 1** deutlich wurde, dass beides potenziell starke Anwendungen für verteilte robotische Bausysteme sind. Obwohl sie oft für die Vor-Ort-Montage vorgesehen sind, könnten verteilte robotergestützte Konstruktionssysteme dazu verwendet werden, die Art und Weise, wie die Vorfertigung in On- oder Off-Site-Fabriken durchgeführt wird, neu zu überdenken. Große, vergleichsweise teure Maschinen können durch kleinere, kostengünstigere Maschinen ersetzt werden, um die gleiche Aufgabe der Vormontage zu erledigen. Im Rahmen der Aufteilung wurden verschiedene Baugruppen aus unterschiedlichen Blickwinkeln im Gesamtdesign des Herstellungsprozesses untersucht.

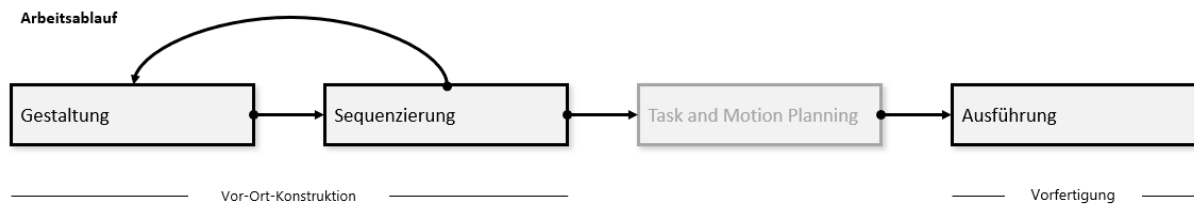
Es wurde ein sehr linearer Arbeitsablauf implementiert, um verschiedene Probleme im Zusammenhang mit der Entwicklung von Baugruppen zu lösen (**Abbildung 31**). Bei der Vor-Ort Konstruktion lag der Schwerpunkt auf der Entwurfs- und Sequenzierungsphase der Baugruppenmontage und bei der Vorfertigung auf der Ausführung der Montage einer Baugruppe. Wie aus der Hintergrundforschung zum verteilten Roboterbau weiter hervorgeht, besteht das Potenzial, dass solche Systeme bei der Montage verschiedener Gebäudekomponenten eingesetzt werden können. Dazu gehören Bodenplatten, Wände, Stützen, Gewölbe, Gitterelemente oder -strukturen, Spaceframes sowie Kuppeln. Es wurde entschieden, Rahmenstrukturen für die Vor-Ort-Konstruktion und ein Deckensystem für die Vorfertigung zu betrachten (**Abbildung 31**). Rahmenkonstruktionen waren die häufigste Gebäudegruppe, die bei der Hintergrundforschung für lineare Holzelemente ermittelt wurde. Daher wurden sie als eine der Typologien für die Untersuchung mit verteilten robotischen Bausystemen ausgewählt. Das Deckensystem wurde aufgrund seiner aktuellen Erforschung im Rahmen des IntCDC ausgewählt. Daher konnten das Bausystem und die Roboterfertigungsmethoden, die im IntCDC verwendet werden, als direkter Bezugspunkt für Vergleiche dienen.

¹² <https://github.com/MarcToussaint/rai>

¹³ <https://github.com/BHoM>

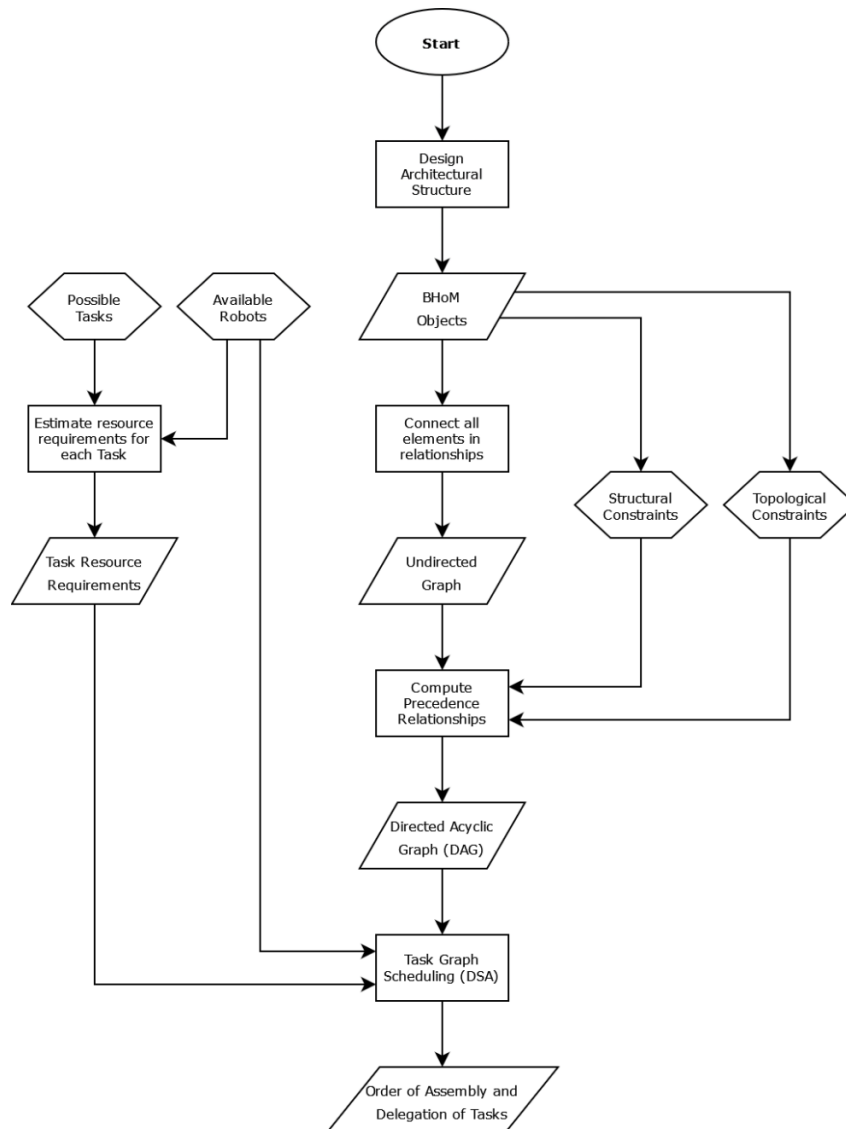
¹⁴ https://github.com/BHoM/Grasshopper_UI

Abbildung 31: Untersucher Arbeitsablauf vom Entwurf bis zur Ausführung. In den jeweiligen Phasen des Arbeitsablaufs wurden zwei Typologien untersucht, die mit unterschiedlichen Arten von Fabrikation verbunden sind und sich auf unterschiedliche Gebäudegruppentypologien beziehen.



Vor-Ort-Konstruktion: Für den Übergang vom Entwurf zur Sequenzierung wurde eine Pipeline erstellt. Die Pipeline folgt der folgenden Logik: Eine architektonische Struktur wird entworfen, in BHoM-Objekte umgewandelt und dann sequenziert (**Abbildung 32**). Das Ergebnis ist ein geordneter Satz von Aufgaben und die Identifikation der Agenten, denen diese Aufgaben zugewiesen werden. Innerhalb der Pipeline wurden spezifische Tools geschaffen, um die Ziele des Entwurfs und der Sequenzierung der Elemente innerhalb einer Struktur zu erreichen.

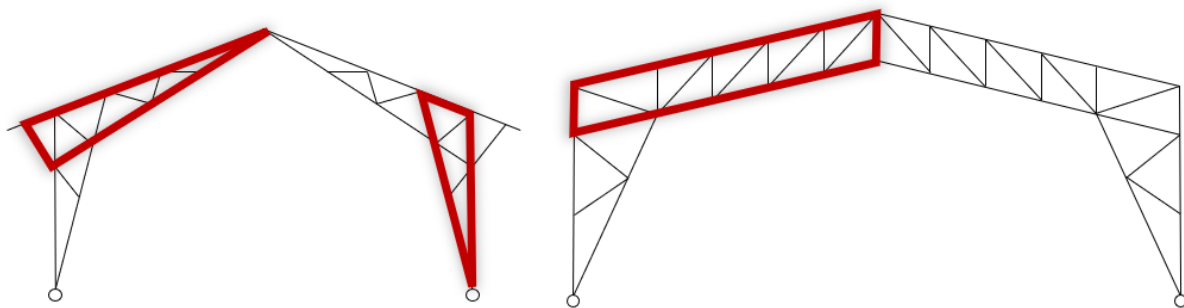
Abbildung 32: Pipeline zur Umsetzung von architektonischen Entwürfen in eine geordnete Abfolge von Stützen und den dazugehörigen Roboterarbeiten, die für die Umsetzung des Entwurfs erforderlich sind



Bei der Betrachtung des Entwurfs von Rahmenkonstruktionen wurden zwei Aspekte untersucht: (i) den Entwurf von Rahmenstrukturen und (ii) die maximal verschraubten Verbindungen zwischen allen Elementen innerhalb einer Struktur, wie zuvor eingeführt.

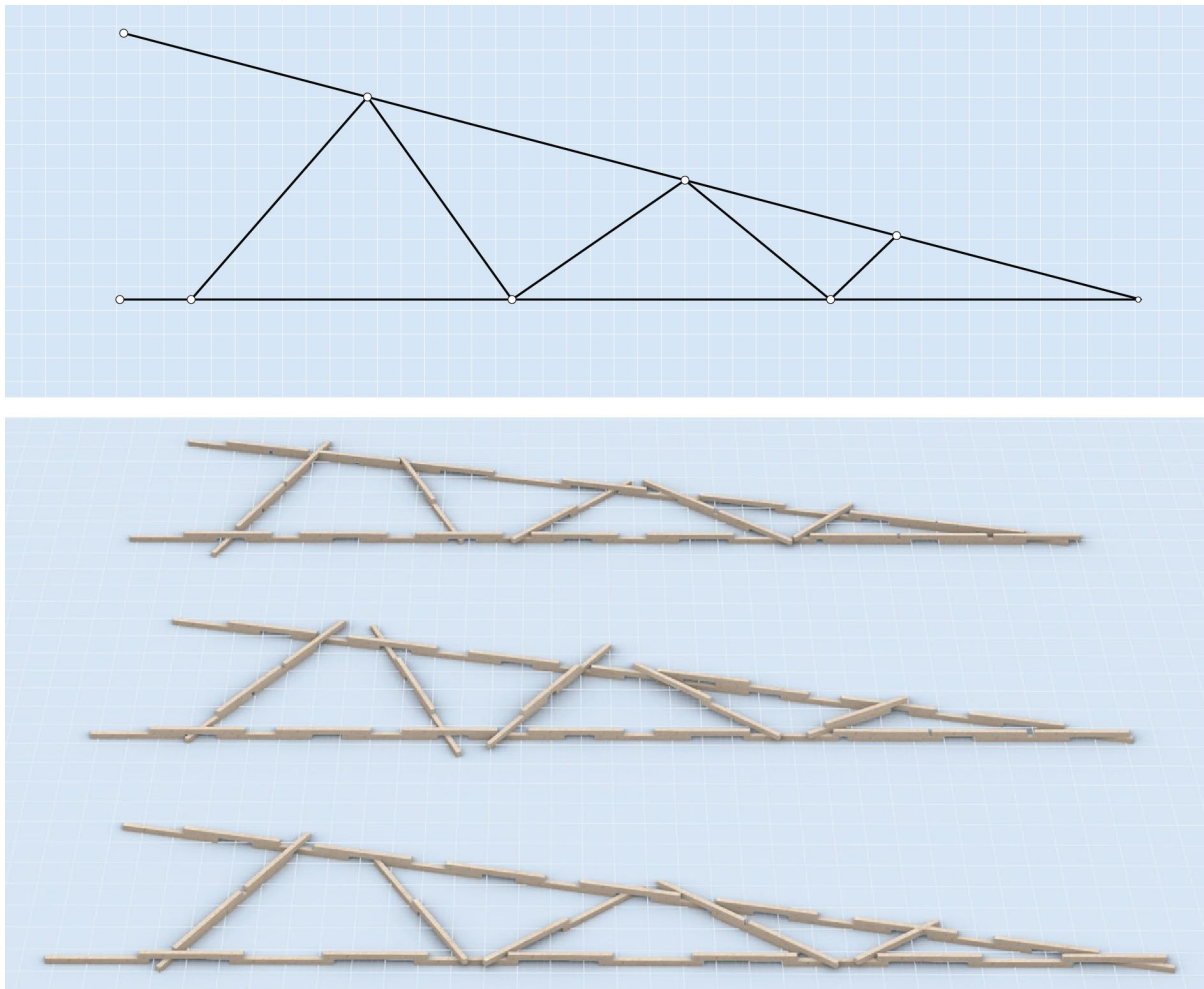
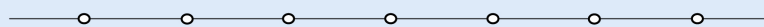
Auf der Entwurfsseite wurde durch die Analyse bestehender Strukturen festgestellt, dass die Grundkomponenten von Rahmenstrukturen entweder Dreiecke oder Rechtecke mit verschiedenen Arten von Diagonalen sind (**Abbildung 33**). Daher wurde ein Tool entwickelt, das die Erzeugung von Rahmen auf der Grundlage der Eingabe ihrer äußeren Geometrie ermöglicht, die entweder ein Dreieck oder ein Rechteck ist. Der Benutzer des Tools gibt Geraden ein, um die äußere Rahmengometrie darzustellen. Es wird geprüft, ob es sich um eine der zulässigen Geometrien handelt. Die Auswahl des gewünschten Diagonaltyps erfolgt über ein Dropdown-Menü mit einer Liste von Diagonaltypen. Die vorgegebenen Typen sind Diamantdiagonale, versetzte Rautendiagonale, steigende und fallende Diagonale, Pfosten plus steigende Diagonale, Pfosten plus fallende Diagonale und Pfosten plus Rautendiagonale. Zur weiteren Definition der Diagonalen stehen parametrische Steuerelemente zur Verfügung, mit denen die Abstände und Winkel der Diagonalen festgelegt werden können. Anschließend werden die Geraden mit Holzelementen gefüllt, die an den Konstrukteur zurückgegeben werden können.

Abbildung 33: Übliche Rahmenkonstruktionen im Holzbau lassen sich in Dreiecke oder Rechtecke mit verschiedenen Arten von Diagonalen zerlegen



Die Frage, wie die Kurvendarstellung eines Rahmens (**Abbildung 34** oben) mit Holzelementen gefüllt werden kann, lässt sich jedoch auf verschiedene Weisen lösen. Einige mögliche Varianten der gleichen Geometrie sind in **Abbildung 34** dargestellt. Der gewählte Ansatz besteht darin, jede Kurve auf der Grundlage einer vom Benutzer festgelegten Anzahl von Schichten zu füllen. (**Abbildung 35**). Daher wird jede Kurve durch die Hälfte der Länge der Holzelemente geteilt und die Positionen werden dann so bestimmt, dass für jede Schicht der gleiche Abstand entsteht. Das Tool ist parametrisch, um dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, eventuelle Unstimmigkeiten oder Überschneidungen im generierten Entwurf zu korrigieren und um eine Iteration des Entwurfs zu ermöglichen. Der Benutzer kann die Abstände zwischen den Elementen, die Anzahl der Schichten, den Abstand der Diagonalen von der Begrenzung, den Abstand zwischen den Diagonalen an den Stellen, an denen sie die Begrenzung kreuzen, sowie die Reihenfolge der Schichten in jeder Kurve anpassen.

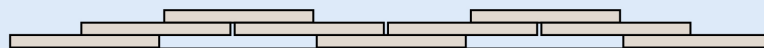
Einige Beispiele für die Arbeit mit dem Entwurfstool sind in **Abbildung 36** dargestellt. In jedem Beispiel werden die mit dem Tool erstellten Ebenen in vertikaler Richtung hintereinander kopiert.

Abbildung 34: Kurvendarstellung eines Rahmens (oben), der auf drei verschiedene Arten aus Holzelementen zusammengesetzt ist**Abbildung 35:** Schritte für den Übergang von einer Kurve zu den Schichten der Holzelemente**Schritt 1:** Kurvengabe**Schritt 2:** Dividieren der Kurve durch die Hälfte der Holzelemente**Schritt 3:** Verschiedene Optionen je nach Anzahl der Schichten

2 Schichten



3 Schichten



4 Schichten

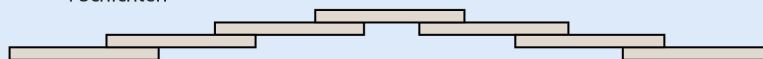
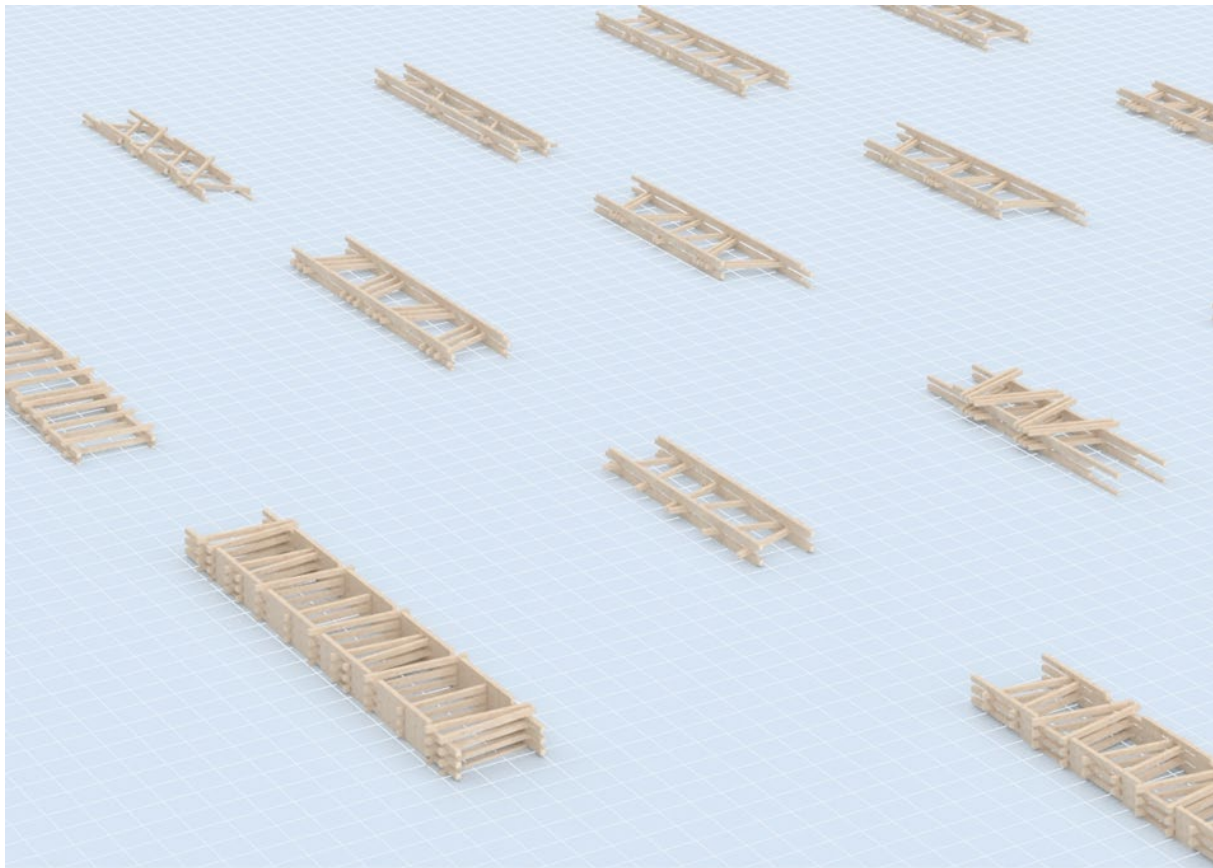


Abbildung 36: Beispiele für Rahmengeometrien unter Verwendung des entwickelten generativen Entwurfstools

Zusätzlich zu den Tools für die Geometrieerzeugung wurde der Algorithmus für die Schraubenberechnung weiterentwickelt, um anhand der eingegebenen Entwürfe eine maximale Schraubenplatzierung in den Verbindungszonen zwischen den Streben zu definieren, die potenzielle Überschneidungen von Schrauben ausschließen würde. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Anpassung der Verbindungszonen, um sicherzustellen, dass sich Schrauben zwischen verschiedenen Schichten auf derselben Strebe nicht überschneiden, was ein Problem im Montageprozess darstellen würde. Eine Beschreibung des Algorithmus zur Aktualisierung der Verbindungszonen findet sich in **Abbildung 37**. Dabei werden die Holzelemente schichtweise durchlaufen und die Verbindungszonen auf der Grundlage möglicher Überlappungen aktualisiert. Der neue Überlappungsbereich (Zeile 9 in **Abbildung 37**) wird auf der Grundlage bestimmter Bedingungen der überlappten Verbindungszonen berechnet. Es gibt drei Hauptbedingungen: (1) die Verbindungszonen überschneiden sich genau, (2) die Verbindungszonen sind verschoben und die Fläche der Zonen ist klein und (3) die Verbindungszonen sind verschoben und die Fläche der Zonen ist groß. Im ersten Fall (1) werden die Verbindungszonen in zwei Hälften geteilt und jede Hälfte wird einer Verbindung zugeordnet. Im zweiten Fall (2), in denen die Fläche klein ist, d. h. nur maximal vier Schrauben aufnehmen kann, wird die Fläche so aufgeteilt, dass jede Verbindung mindestens zwei Schrauben aufnehmen kann. Bei einem größeren Bereich, dem letzten Fall (3), wird der Bereich der Länge nach geteilt und jeder Verbindung werden abwechselnde Abschnitte zugewiesen.

Abbildung 37: Algorithmus zur Anpassung der Verbindungszonen, um sicherzustellen, dass sich die Schrauben zwischen verschiedenen Schichten auf derselben Strebe nicht überschneiden

Algorithmus 2: Algorithmus zur Anpassung der Verbindungszonen, um sicherzustellen, dass sich die Schrauben zwischen verschiedenen Schichten auf derselben Strebe nicht überschneiden

- 1 **Eingabe:** Gerade Holzelementstruktur in Schichten zerlegbar
- 2 **Ausgang:** Maximale Schraubenplatzierung in den Verbindungszonen zwischen den
- 3 Streben
- 4 **Foreach** Schicht in der Struktur:
- 5 **Foreach** Element in der Schicht:
- 6 Geplante Überschneidungen für Schnittpunkt prüfen
- 7 **If** Kreuzung gefunden:
- 8 Neue Überlappungsregion berechnen
- 9 Neue Überlappungsregion beiden Elementen zuweisen
- 10 **Return** Holzelementstruktur mit Schraubenplatzierung in den Verbindungszonen zwischen
- 11 den Streben

Einige Beispiele hierfür für verschiedene Rahmenkonstruktionen sind in **Abbildung 38** zu sehen. Durch die Kombination des Tools zur Geometrieerzeugung mit dem Tool zur Schraubenplatzierung kann der Entwurf von Rahmenstrukturen, die in kleine Elemente zerlegt und durch ein verteiltes Robotersystem verbunden werden können, ausgegeben werden. (**Abbildung 39**). Der nächste Schritt besteht darin, eine strukturelle Analyse des vorgeschlagenen Entwurfs durchzuführen und die maximale Anzahl der Schrauben für jede Verbindung zu reduzieren, um nur so viele Schrauben wie nötig pro Verbindung zu verwenden.

Abbildung 38: Schraubenplatzierung in den Verbindungszonen zwischen den Streben in verschiedenen Traversenkonstruktionen

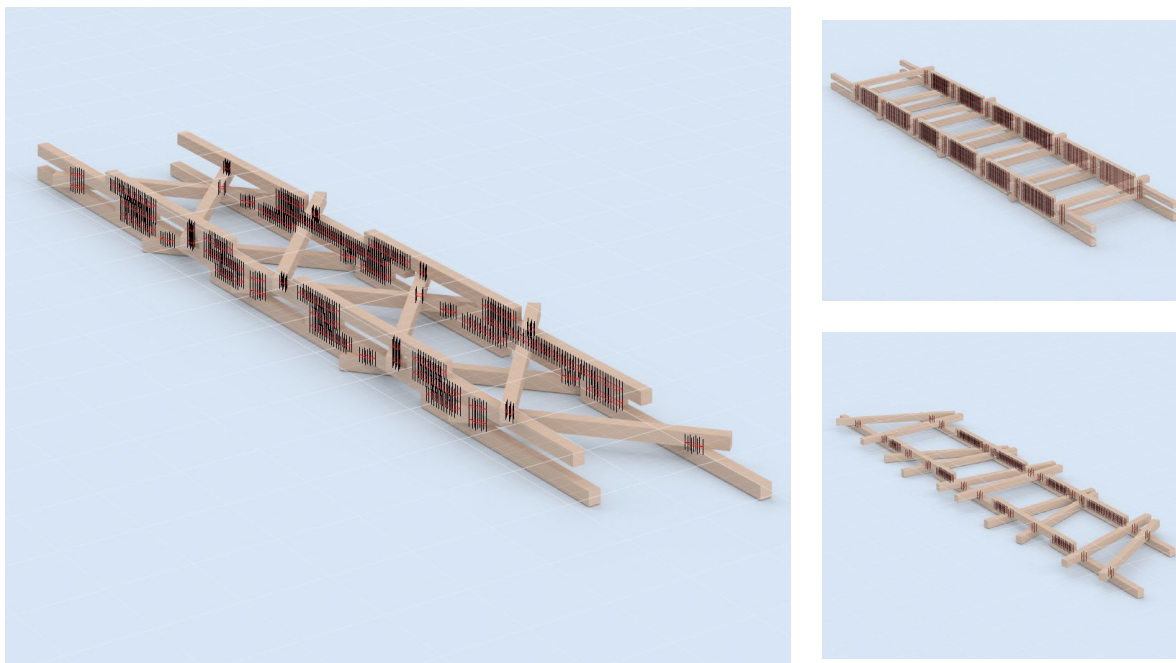
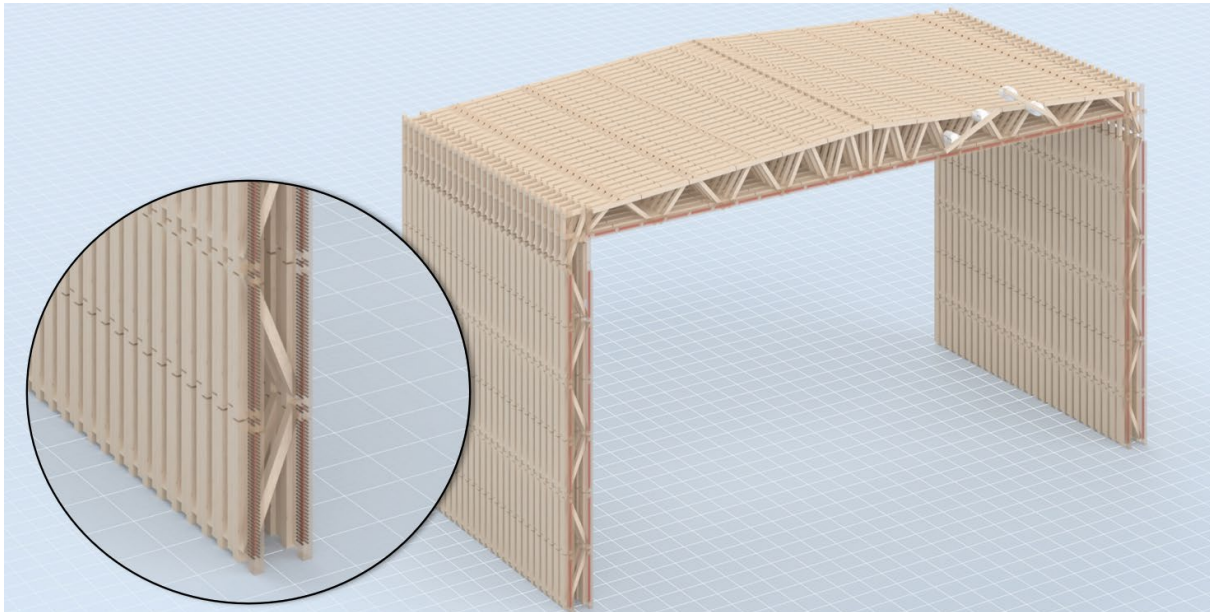


Abbildung 39: Beispiel für eine Konstruktion, die mit den entwickelten Tools für die Rahmenstrukturen und Schraubenplatzierung entworfen wurde



Das Tool wurde in Grasshopper3D erstellt, wodurch architektonische Entwürfe in BHoM-Objekte umgewandelt werden können, indem das vorhandene BHoM-Plugin angepasst wird. Die generierte JSON-Datei ermöglicht den Übergang der Entwürfe von der Designumgebung zum Sequenzierungsprozess.

Auf der Grundlage der BHoM-Informationen werden die einzelnen Gebäudeelemente in eine Graphdatenstruktur zerlegt, wobei die Knoten die Materialelemente und die Kanten die Verbindungen darstellen. Zunächst handelt es sich um einen ungerichteten Graphen (d. h. eine Datenstruktur mit Knoten und Kanten, die die Knoten verbinden, aber ohne eine Richtung, in die diese Kanten zeigen), da es keine zeitliche oder vorrangige Beziehung zwischen den Elementen gibt. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Grundverbindungen oder Basiselemente die Wurzel dieses Graphen sind, lässt sich aus dem ungerichteten Graphen ein gerichteter azyklischer Graph extrahieren, indem den oben genannten Kanten eine Richtung und damit eine zeitliche Bedeutung zugewiesen wird. Für weitere Informationen über die verschiedenen Arten von Diagrammen siehe Lauritzen und Richardson (2002). Dies kann durch die Anwendung einer *Breadth First Search* (BFS) erreicht werden (Bundy/Wallen 1984). BFS ist ein Algorithmus zur Suche eines Knotens in einer Baum- oder Graphenstruktur, der eine bestimmte Bedingung erfüllt. Im Gegensatz zur *Depth First Search* werden bei BFS alle Knoten in der aktuellen Ebene untersucht, bevor zur nächsten Tiefe übergegangen wird. Mit anderen Worten, der Prozess beginnt mit den Basiselementen, dann werden die Elemente, die damit verbunden sind, ermittelt und bewertet, um zu sehen, ob sie die strukturelle Bedingung erfüllen (im vorliegenden Fall sind bereits zwei Verbindungen vorhanden.). Wenn diese Bedingung erfüllt ist, wird das Element der aktuellen Bauphase hinzugefügt. Andernfalls wird es in der nächsten Phase erneut geprüft.

Der im vorherigen Schritt erhaltene gerichtete azyklische Graph wird weiterverarbeitet und in einen Aufgabengraphen umgewandelt. Dieser Aufgabengraph stellt eine Abfolge von Aufgaben dar, die durchgeführt werden müssen, um das gewünschte Bauergebnis zu erreichen. Jeder Knoten im Aufgabengraphen entspricht einer bestimmten Bauaufgabe, wie beispielsweise der Aufnahme eines Elements vom Materiallagerort, dem Transport zu einer bestimmten Position oder dem Anbringen von Schrauben an bestimmten Stellen.

Sobald der Aufgabengraph vorliegt, wird er mit den verfügbaren Ressourcen kombiniert, in diesem Fall mit den Robotern und ihren Fähigkeiten, bestimmte Aktionen auszuführen. Dieser Zusammenführungsprozess wird als Task Graph Scheduling-Algorithmus bezeichnet. Dabei geht es darum, den verfügbaren Robotern anhand ihrer Fähigkeiten Aufgaben aus dem Aufgabengraphen zuzuweisen und die Planung dieser Aufgaben zu optimieren.

Vereinfacht ausgedrückt beschreibt der Aufgabengraph die Reihenfolge der Bauaufgaben, während der Planungsalgorithmus des Aufgabengraphen sicherstellt, dass diese Aufgaben den Robotern unter Berücksichtigung ihrer Fähigkeiten und verfügbaren Aktionen auf effiziente und optimierte Weise zugewiesen werden. Zum besseren Verständnis der Pipeline werden in den folgenden Abschnitten die Implementierung des beschriebenen Algorithmus sowie die Softwarearchitektur und deren Details beschrieben.

Bei der Ausführung dieser Software gibt der Benutzer zunächst eine BHoM-Datei an, die im JSON-Format vorliegt und verarbeitet werden soll. Daher beginnt der erste Abschnitt mit dem Laden und Parsen der in der Konfiguration angegebenen BHoM-Datei unter Verwendung des entwickelten RAI-Toolkits. Die Hauptfunktion des Toolkits trägt den Namen "Scene Generation" und ist in der Funktion "GenerateScene" gekapselt. (**Abbildung 40**). Hier wird mit der Erstellung einer Liste von Elementobjekten (in diesem speziellen Szenario Streben) und Verbindungsobjekten (die die Verbindungen zwischen den einzelnen Streben darstellen) begonnen. Diese Listen sind anfangs leer und werden beim Parsen des JSON mit Daten gefüllt. Dann wird die Funktion `ReadJSON` aufgerufen, welche die angegebene JSON-Datei mit einem `std::ifstream` öffnet und die JSON-Bibliothek `nlhomann` zur Interpretation der Elemente verwendet. Diese Bibliothek erweist sich als äußerst hilfreich, da sie es ermöglicht, die JSON-Objekte direkt in C++-Klassenobjekte umzuwandeln (siehe Zeilen 12 und 16 in **Abbildung 41**). Das bedeutet, dass alle Informationen, die in das BHoM-Objekt auf der Grasshopper-Seite eingegeben wurden, wie Länge, Querschnitte, Materialtyp, ob das Element Teil des Fundaments ist und ob es ein Quellort ist (was bedeutet, dass Roboter von hier aus neue Elemente aufnehmen können), automatisch ausgefüllt werden. Sobald alle Elemente in der JSON-Datei durchlaufen wurden, werden die Listen der Elemente und Verbindungen als Referenzen an die Funktion `GenerateScene` zurückgegeben (siehe Zeile 0 in **Abbildung 41**). Auf diese Weise wird vermieden, alle diese Objekte zu kopieren, was zu einer Einsparung von Rechenzeit führt.

Außerdem ist die Rückgabe eines komplexen Datenobjekts von der Funktion nicht erforderlich, da die C++-Funktion *pass-by-reference* zur Verfügung steht (IBM 2021). In C++ ist *pass-by-reference* eine Funktion, die direkt auf die übergebenen Originaldaten zugreifen und diese ändern kann, anstatt eine Kopie der Daten zu erstellen. Dies wird erreicht, indem die Speicheradresse der Daten als Referenzparameter an die Funktion übergeben wird. Anstatt ein neues Objekt zu erstellen und zurückzugeben, kann die Funktion das ursprüngliche Objekt direkt ändern, indem sie über den Referenzparameter darauf zugreift. Wenn diese Funktion zurückkehrt, wird die Liste der Elemente durchlaufen, um die "physischen" Objekte in der RAI-Simulationsumgebung zu erzeugen.

Es ist wichtig zu beachten, dass im Rahmen dieses Projekts keine Erstellung solcher Simulationsobjekte erforderlich ist. Um jedoch die Codebasis für zukünftige Anwendungen zu erweitern (z. B. den Aspekt der Aufgaben- und Bewegungsplanung, der für die Ausführung der in einem solchen Konstruktionssystem festgelegten Aufgaben erforderlich ist), wurde beschlossen, mit RAI-Objekten zu arbeiten. Nachdem die Elemente konstruiert sind, werden die Verbindungen iterativ abgearbeitet. Diese erhalten jeweils eine eindeutige Kennung und werden mit den entsprechenden Elementen gepaart (d. h. jede Verbindung ist mit zwei Elementen gekoppelt). Durch diese Verknüpfung entstehen die Kanten des Graphen, die Elemente selbst werden zu den Knoten. Es ist zu beachten, dass die Kanten noch keine Verbindung haben, was bedeutet, dass diese Datenstruktur einen ungerichteten Graphen darstellt. Später wird sich dies als nützlich erweisen, wenn die Konstruktion geordnet werden soll.

Dann wird die Funktion `SequenceElements` aufgerufen, die die Elemente der Konstruktion in einer logischen Reihenfolge anordnet, wobei ein BFS-Ansatz (Breadth First Search) verwendet wird. Die Planung beginnt durch den Aufruf der Funktion `Schedule` innerhalb des `Scheduler`-Objekts und der Übergabe der Liste der Elemente, die mit der Funktion `GenerateScene` erzeugt wurde. Der Scheduler erstellt zunächst ein Dictionary-Objekt mit String-Schlüsseln und Element-Werten, das die ungeordnete Liste von Elementen (den ungerichteten Graphen) repräsentiert, die logisch sortiert werden sollen. Dann wird eine "do-while"-Schleife gestartet, die erst dann abbricht, wenn jedes Element aus dieser Map herausgepickt wurde und somit alle Elemente in der Struktur geordnet sind.

Abbildung 40: GenerateScene-Funktion, die die BHoM-Informationen aus einer json-Datei analysiert und eine objektorientierte Szene erstellt

```

0      void World::GenerateScene(rai::String fileName){
1
2          // Separate elements and connections
3          std::vector<arch::Element> jElements;
4          std::vector<arch::Connection> jConnections;
5          ReadJSON(fileName, jElements, jConnections);
6
7          // Process elements
8          for(auto& e : jElements){
9              // Offsets
10             double x_offset = 0;
11             double y_offset = 0;
12             double z_offset = 0.05;
13             rai::Vector ptA =
14             rai::Vector((e.location.control_points.at(0).x+x_offset)*0.001,
15             (e.location.control_points.at(0).y+y_offset)*0.001,
16             e.location.control_points.at(0).z*0.001+z_offset);
17             rai::Vector ptB =
18             rai::Vector((e.location.control_points.at(1).x+x_offset)*0.001,
19             (e.location.control_points.at(1).y+y_offset)*0.001,
20             e.location.control_points.at(1).z*0.001+z_offset);
21             rai::Vector ptC = ptB-ptA;
22             rai::Vector midPt = (ptA + ptB)/2;
23             // get sam to change this to bool value instead of text?
24             bool isRoot = false;
25             bool isSource = false;
26
27             if(e.custom_data.root == 1){
28                 isRoot = true;
29             }
30             if(e.custom_data.source == 1){
31                 isSource = true;
32                 sources.push_back(e.b_ho_m_guid);
33             }
34             rai::Element e2(midPt, ptC, e.b_ho_m_guid, e.property.profile.height*0.001,
35             ptC.length(), isRoot, isSource);
36
37             if(e.custom_data.feed == 1){
38                 feed = e2;
39             }else{
40                 elements.insert(std::make_pair(e2._id, e2));
41             }
42         }
43
44         // Process connections
45         for(auto& c : jConnections){
46             rai::Connection co(c.b_ho_m_guid);
47             for(auto& i : c.connecting_strut_guids){
48                 co.AddElement(i);
49             }
50             connections.insert({co._id, co});
51
52             // Add connections to element objects
53             for(auto& i : co._adj){
54                 auto it = elements.find(i);
55                 if(it != elements.end()){
56                     for(auto& y : co._adj){
57                         if(y != i){
58                             it->second._adj.push_back(y);
59                         }
60                     }
61                 }
62             }
63         }
64     }

```

Abbildung 41: Details zur ReadJSON-Funktion

```

0      void World::ReadJSON(const rai::String& env_json, std::vector<arch::Element>&
1      jElements, std::vector<arch::Connection>& jConnections) {
2
3          // Read whole bhom json
4          std::ifstream ifs_json(env_json);
5          nlohmann::json j;
6          ifs_json >> j;
7          // Separate elements and connections
8          for(auto& x : j.items()){
9              arch::Element e;
10             arch::Connection c;
11             try{
12                 e = x.value().get<arch::Element>();
13             }
14             catch(...){
15                 try{
16                     c = x.value().get<arch::Connection>();
17                 }
18                 catch(...){
19                     continue;
20                 }
21                 jConnections.push_back(c);
22                 continue;
23             }
24             jElements.push_back(e);
25         }
26         OUT("Elements Count: " + STRING(jElements.size()));
27         OUT("Connections Count: " + STRING(jConnections.size()));
28
29     }

```

Abbildung 42: Zeitplanungsfunktion

```

0
1      void Scheduler::Schedule(std::map<std::string, rai::Element> map)
2      {
3          std::map<std::string, rai::Element> unordered_map = map;
4          int phase = -1;
5          int culmsLeft = -1;
6          int oindex = 0;
7          do{
8              OUT("Phase " + STRING(phase));
9              OUT("Culms left: " + STRING(unordered_map.size()));
10             phase++;
11             culmsLeft = unordered_map.size();
12             for(auto& e : unordered_map){
13                 // OUT("A: " + STRING(internal_map.size()));
14                 if(e.second._sources.size() >= 1){
15                     //OUT(phase);
16                     e.second._oindex = oindex;
17                     e.second._phase = phase;
18                     oindex++;
19                     ordered_map.insert(std::make_pair(e.first, e.second));
20                 }
21             }
22
23             for(auto& e : ordered_map){
24                 if(e.second._isVis == false){
25                     // Iterate through edges
26                     for(auto& a : e.second._adj){
27                         // if edge is not source
28                         if(std::find(e.second._sources.begin(), e.second._sources.end(),
29
30
31
32

```

```

.      .
.      .
.      .
29      a) == e.second._sources.end()){
30          // Add edge to sink
31          e.second._sinks.push_back(a);
32          // Add edge as source to next node
33          auto it = unordered_map.find(a);
34          if(it != unordered_map.end()){
35              it->second._sources.push_back(e.first);
36          }
37      }
38  }
39      e.second._isVis = true;
40  }
41  }
42  // Remove visited elements from unordered map
43  for(auto& e : ordered_map){
44      unordered_map.erase(e.first);
45  }
46
47  if(culmsLeft == unordered_map.size()){
48      OUT("FAILED TO FIND PATH");
49      unordered_map.clear();
50  }
51
52  }while(unordered_map.size() > 0);
53  }

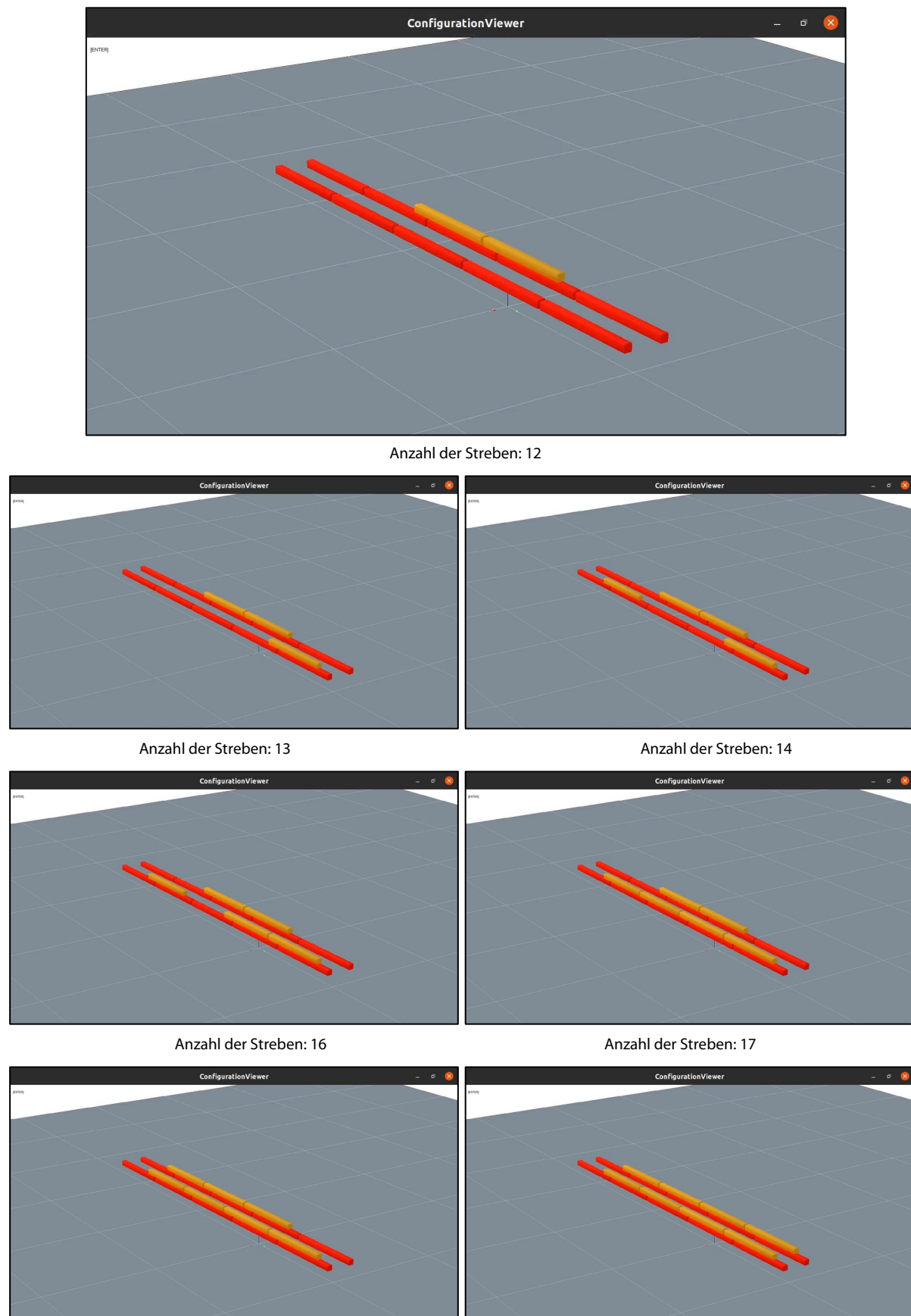
```

Innerhalb dieser Schleife werden die (verbleibenden) Elemente in der Map durchlaufen und überprüft, ob sie mehr als zwei Quellen haben. Eine Quelle ist ein Begriff aus der Informatik und bezeichnet das Elternelement eines Graphenobjekts. Im vorliegenden Szenario repräsentieren die Quellen die Elemente, mit denen das jeweilige Element verbunden ist. In Bezug auf die Holzkonstruktion bedeutet das, welche Streben miteinander verbunden sind. Mit anderen Worten, wenn ein Element zwei Quellen hat, bedeutet dies, dass es stabil an seinem Platz montiert werden kann. Dieses Element wird dann der geordneten Map-Liste als machbare Option hinzugefügt. Sobald die ungeordnete Map durchlaufen wurde, wird die geordnete Map überprüft. Dies geschieht, damit alle in der ungeordneten Map verbliebenen Elemente ihre Quellen als platziert aktualisieren können, und alle Elemente in der geordneten Map ihre verbleibenden Kanten (Verbindungen, die weder als Quelle noch als Senke markiert wurden) als Senken (Kinder Elemente in einem Graphen) markieren können.

Anschließend werden die besuchten Elemente aus der ungeordneten Map entfernt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die ungeordnete Map entweder leer ist (was bedeutet, dass eine vollständige Sequenz gefunden wurde) oder keine weiteren Elemente aus der ungeordneten Map entfernt werden können. In letzterem Fall bedeutet dies, dass keine praktikable Konstruktionssequenz verfügbar ist.

Ein interessanter Aspekt besteht darin, dass auch die Anzahl der Phasen extrapoliert werden kann, die für jede Baureihenfolge benötigt wird. Eine Phase ist eine zeitliche Einheit, die alle gleichzeitigen Elemente abgrenzt, d. h. alle Elemente, die zu einem bestimmten Zeitpunkt T platziert werden können. Theoretisch können alle Elemente in jeder Phase gleichzeitig platziert werden, was jedoch durch die Anzahl der verfügbaren Roboter und ihre sich überschneidenden Bewegungspfade begrenzt wird. Die Phasengröße kann dann durch die Anzahl der verfügbaren Agenten geteilt und in Unterphasen für eine angemessene Planung aufgeteilt werden. Nun, da eine Abfolge von zu platzierenden Elementen und eine Reihe von Phasen vorhanden sind, in denen sie platziert werden sollen, kann mit der Lösung der Aufgaben begonnen werden, die erforderlich sind, um die Elemente zu ihren jeweiligen Positionen zu bewegen und zu verbinden. Die Pipeline vom Entwurf zur Sequenzierung endet mit der Visualisierung der Abfolge der auszuführenden Aufgaben, wie in **Abbildung 43** und **Abbildung 44** dargestellt.

Neben der Anordnung der Elemente können auch die Bewegungen gelöst werden, die zur Erfüllung dieser Aufgaben erforderlich sind. Dazu müssen die Kinematik und die Bewegungspfade gelöst werden. Dies war jedoch nicht Teil dieses Projekts.

Abbildung 43: Grafische Ausgabe des Sequenzierungsprozesses eines geradlinigen Rahmens

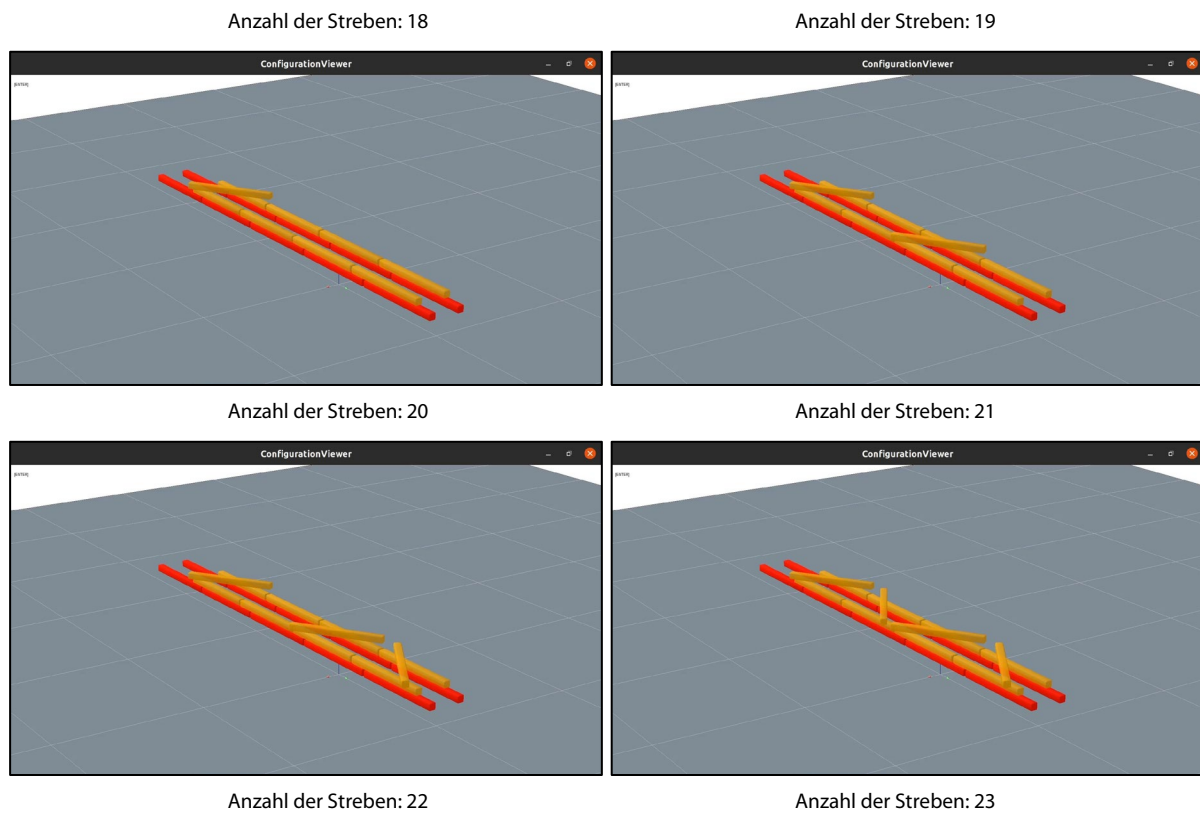
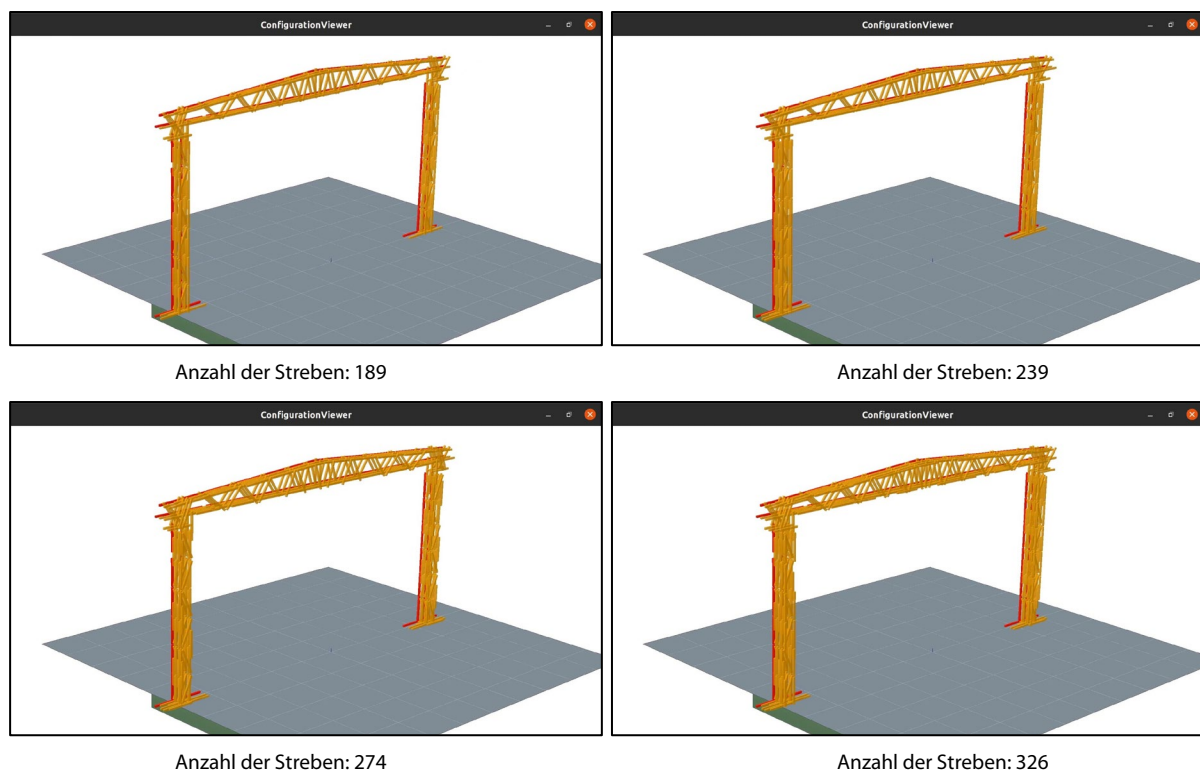
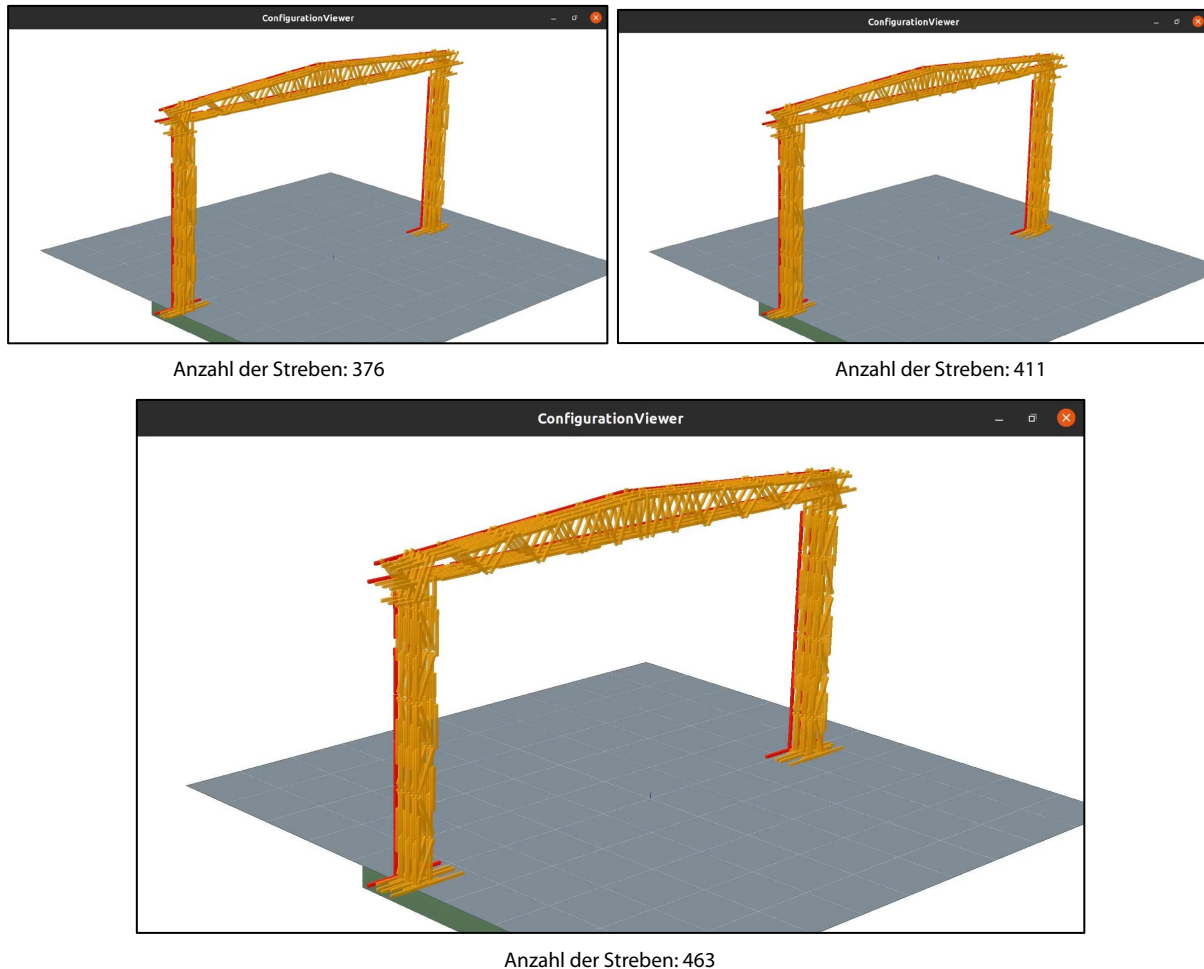


Abbildung 44: Grafische Ausgabe des Sequenzierungsprozesses einer großen Rahmenstruktur





Vorfertigung: Bei der Betrachtung der Vorfertigung verlagerte sich der Schwerpunkt von der Design- zur Sequenzierungspipeline auf die eigentliche Ausführung der Montage. Eine weitere wichtige Überlegung war, diesen Prozess mit anderen Formen der Roboterautomatisierung vergleichen zu können. Bei der Vorfertigung ging es also nicht darum, neuartige Baugruppen zu entwerfen, sondern darum, eine solche für die Ausführung mit einem verteilten Roboterbausystem anzupassen.

In diesem Zusammenhang wurde eine Baugruppe entwickelt, die im Rahmen eines Forschungsprojekts am IntCDC mit dem Titel "Research Project 3 (RP3): Computational Design, Engineering and Development Of Digitally Fabricated Multi-storey Wood Building System" untersucht wurde (<https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/research/research-projects/rp-3/>). RP3 war ein Forschungsprojekt von vier Instituten, dem Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), dem Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE), dem Institut für Akustik und Bauphysik (IABP) und der Materialprüfungsanstalt (MPA), alle an der Universität Stuttgart. Ziel des Projekts war es, ein digitales Holzbausystem zu entwickeln, um die weitere Verbreitung von Holzbaugruppen im Bauwesen zu fördern.

Moderne mehrstöckige Holzbauten sind in ihrer Gestaltung und ihrem Grundriss oft auf ein Raster ausgerichtet (Svatoš-Ražnjević et al. 2022). Dieses Raster begrenzt die möglichen Formen von mehrgeschossigen Holzgebäuden und begrenzt den Einsatz von Holzkonstruktionen in städtischen Umgebungen und als Erweiterung von bestehenden Gebäuden. Die Forschung des IntCDC im Rahmen von RP3 zielt darauf ab, dieses Problem durch die Entwicklung der Hohlkastendecke zu lösen. Konkret wurde eine multidirektional gespannte Hohlkastendecke mit lastabtragenden Verbindungen entwickelt, um den Gestaltungsspielraum im Holzbau zu erweitern. Die entwickelte Hohlkastendecke besteht aus zwei dünnen CLT-Platten oben und unten,

die durch innere Scherstege miteinander verbunden sind (Krtschil et al. 2022). Die Hohlkastendecke wird linear auf Stützen gelagert und ermöglicht Spannweiten in zwei Richtungen (**Abbildung 45**). Orozco et al. (2022) haben den Entwurf eines solchen Systems erforscht. Eine ähnliche Hohlkastendecke wurde auch veröffentlicht von Bissig und Frangi in 2022 (Bissig/Frangi 2022).

Abbildung 45: Hohlkastendecke auf linearen Stützen



Quelle: Research Project 3 (RP3): Computational Design, Engineering And Development Of Digitally Fabricated Multi-storey Wood Building System, IntCDC, Universität Stuttgart

Abbildung 46: Vergleich des ursprünglich geplanten Roboter-Automatonsystems mit einem verteilten Robotersystem für die Montage von einer Hohlkastendecke



Quelle: Auf Basis von Research Project 3 (RP3): Computational Design, Engineering And Development Of Digitally Fabricated Multi-storey Wood Building System, IntCDC, Universität Stuttgart

Obwohl die Herstellung der Hohlkastendecke ursprünglich für eine robotergestützte Vorfertigungsplattform mit zwei Industrieroboterarmen konzipiert wurde, die bei der Herstellung der Decke zusammenarbeiten, könnte die Montage einer solchen Struktur auch mit einem verteilten Robotersystem erfolgen (**Abbildung 46**). Bei der Konstruktion der Decke müssten die neue Reichweite des verteilten Robotersystems und

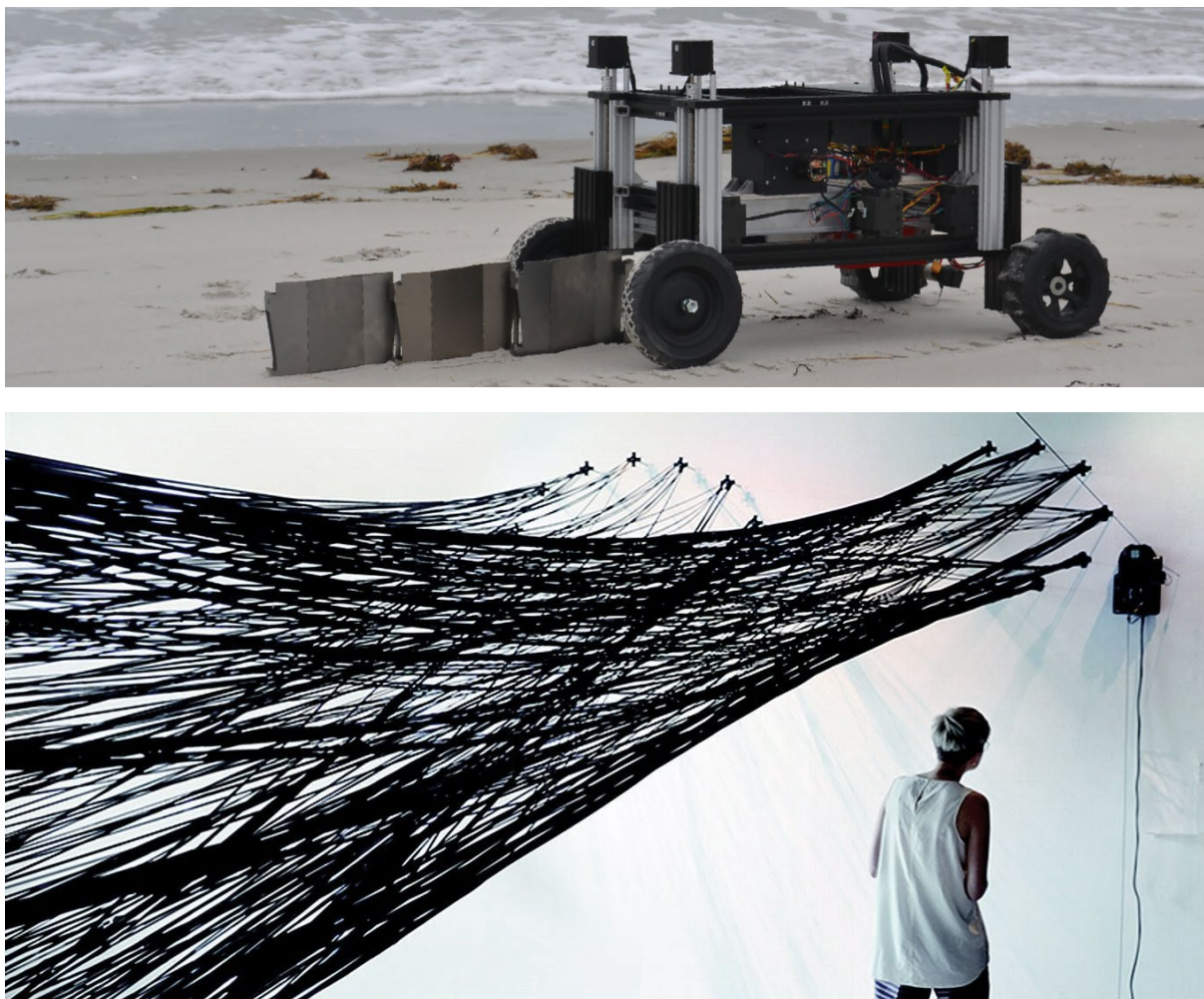
möglicherweise auch die Abmessungen der Scherstege berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich jedoch um geringfügige Änderungen, sodass die Decke so gestaltet werden kann, dass alle Scherstege von einem verteilten Robotersystem gesetzt werden können. Ein Ansatz zur Anpassung des Entwurfs wäre die Integration dieser neuen Randbedingungen in den agentenbasierten Modellierungsansatz (ABM) für den Entwurf, der sowohl für die Decke als auch für das verteilte robotische Bausystem, das die Ausführung übernimmt, erforscht wird (Orozco et al. 2021; Leder et al. 2022). Die Einführung einer Nebenbedingung, die sich mit den Abständen zwischen den Elementen befasst, könnte die Berücksichtigung der Reichweite des Robotersystems ermöglichen.

Die genauen Einzelheiten der Ausführung des Baus der vorgeschlagenen Hohlkastendecke mit einem verteilten Robotersystem werden im nächsten Kapitel behandelt.

Verbindung mit anderen Gebäudesystemen und Automatisierungssystemen (AP 3.5)

Im Bereich des Bauwesens gibt es zahlreiche Bausysteme, die für die Schaffung eines vollständigen und funktionalen Bauwerks unerlässlich sind. Eine umfassende Übersicht über die Automatisierung im Bauwesen hat kürzlich die wichtigsten Teile des Hochbaus in drei Hauptkategorien eingeteilt: Baustellenvorbereitung, Verankerung und Überbau (Melenbrink/Werfel/Menges 2020). Beispiele für die einzelnen Teile des Hochbaus mit den entsprechenden Automatisierungssystemen sind in **Abbildung 47** zu sehen.

Abbildung 47: Verschiedene verteilte Robotersysteme für unterschiedliche Aufgaben im Hochbau: Verankerung (oben) und Überbau (unten)



Quelle: oben (Melenbrink et al. 2020), unten (Yablonina/Menges 2019)

Die Baustellenvorbereitung ist die erste Phase des Bauvorhabens und umfasst die verschiedenen Prozesse, die erforderlich sind, um die Baustelle für die Bauarbeiten vorzubereiten. Dazu gehören Aufgaben wie Erdarbeiten, bei denen Erde oder Felsen ausgehoben, entfernt und umverteilt werden, um das Gelände entsprechend dem gewünschten Plan zu gestalten. Die Nivellierung des Geländes ist häufig ein weiterer Aspekt der Bauvorbereitung, um sicherzustellen, dass der Boden eben und für die nachfolgenden Bauphasen geeignet ist.

Die Verankerung, die zweite Kategorie, bezieht sich auf den Prozess der sicheren Einbettung des Bauwerks in die Baustelle. Dazu gehört in erster Linie die Erstellung von Fundamenten, die dem Bauwerk eine stabile Basis geben. Die Fundamente können je nach Art des Bauwerks und den Standortbedingungen variieren. Sie können aus Betonfundamenten, Pfählen oder anderen Strukturelementen bestehen, die das Gewicht des Gebäudes auf sichere und effiziente Weise auf den Boden übertragen.

Die dritte Kategorie, der Überbau, umfasst die übrigen Teile der Gebäudestruktur, die am meisten sichtbar sind und direkt zur Funktionalität und Ästhetik des Bauwerks beitragen. Dazu gehören tragende Elemente wie Balken, Säulen und Wände, die die Struktur stützen und das Gewicht des Gebäudes verteilen. Fassaden sind die Außenflächen eines Gebäudes, die zu seinem Erscheinungsbild beitragen und Schutz vor Witterungseinflüssen bieten. Die Sanitärsysteme, einschließlich der Rohre, Armaturen und der Entwässerung, sind ebenfalls Teil des Überbaus, da sie wichtige Dienstleistungen wie Wasserversorgung und Abfallentsorgung bereitstellen. Verkabelung, HLK (Heizung, Lüftung und Klimaanlage), Beleuchtung und verschiedene andere Installationen werden ebenfalls als integrale Bestandteile des Überbaus betrachtet.

Aufbauend auf dem vorangegangenen Überblick von Melenbrink, Werfel und Menges (2020), der die Automatisierung im Bauwesen in verschiedenen Größenordnungen von Robotern untersuchte, zielt dieser Abschnitt darauf ab, die Analyse von verteilten Robotersystemen in kleinem Maßstab zu vertiefen. Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung, wie diese Systeme zu verschiedenen Aspekten des Bauwesens beitragen und wie sie spezifische Herausforderungen in diesen Bereichen angehen. **Tabelle 1** wurde an **Tabelle 6** angelehnt, um den Teil des Bauwesens widerzuspiegeln, in dem die verschiedenen aufgeführten Robotersysteme eingesetzt werden.

Einige der in **Tabelle 6** aufgelisteten Forschungsarbeiten sind sehr experimentell, so dass die aufgelistete Hochbaufaufgabe nicht unbedingt aus den verfügbaren Veröffentlichungen ersichtlich ist. In solchen Fällen wurden die Bauaufgaben auf der Grundlage des vorgeschlagenen Systems zugewiesen. D. Andreen et al. (2016) schlugen zum Beispiel ein System aus vibrierenden Robotern vor, die entworfene Bauelemente zu einem ebenen Element zusammenschieben. Dieses Element dient als Fundament, auf dem das Gebäude errichtet werden kann. Wie in der **Tabelle 6** aufgeführt, werden in einigen Forschungsarbeiten Robotersysteme untersucht, die mehr als eine Bauaufgabe erfüllen können, je nachdem, wie das System analysiert wird. So beschreiben Irawan et al. (2020) ein modulares Robotersystem, das Regolith von der Marsoberfläche sammelt und damit ein ganzes Bauwerk errichtet. Daher wird das System in allen drei Kategorien identifiziert.

Tabelle 6: Normen und Vorschriften für bestimmte Holzwerkstoffarten

Autoren	...	Baufaufgabe
N. Napp und R. Nagpal (2014)		Baustellenvorbereitung / Verankerung
F. Augugliaro, A. Mirjan, F. Gramazio, M. Kohler und R. D'Andrea (2013)		Überbau
F. Nigl, S. Li, J. E. Blum und H. Lipson (2013)		Überbau

Autoren	...	Baufeld
Q. Lindsey, D. Mellinger und Vijay Kumar (2012)		Überbau
Y. Terada und S. Murata (2008)		Überbau
D. Andreen, P. Jennings, N. Napp und K. Petersen (2016)		Verankerung
K. Petersen, R. Nagpal und J. Werfel (2011)		Verankerung / Überbau
Y. Yoon und D. Rus (2007)		Überbau
F. Augugliaro, S. Lupashin, M. Hamer, C. Male, M. Hehn, M. Mueller, J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler und R. D'Andrea (2014)		Überbau
M. Yablonina und A. Menges (2019)		Überbau
D. Wood, M. Yablonina, M. Aflalo, J. Chen, B. Tahanzadeh und A. Menges (2019)		Überbau
M. Kayser, L. Cai, S. Falcone, C. Bader, N. Inglessis, B. Darweesh und N. Oxman (2018)		Überbau
S. Hauser, M. Mutlu, P.-A. Léziart, H. Khodr, A. Bernardino und A.J. Ijspeert (2020)		Überbau
J. Petrs, H. Dahy und M. Florian (2019)		Überbau
J. Irawan, X. De Kestelier, N. Argyros, B. Lewis und S. Gregson (2020)		Baustellenvorbereitung / Verankerung / Überbau
C. Parker und H. Zhang (2002/2006)		Baustellenvorbereitung
C. Parker, H. Zhang und C.R. Kube (2003)		Baustellenvorbereitung
N. Melenbrink und J. Werfel (2017)		Überbau
N. Melenbrink, K. Rinderspacher, A. Menges und J. Werfel (2020)		Baustellenvorbereitung / Verankerung
J. Sustarevas, K. Benjamin Tan, D. Gerber, R. Stuart-Smith und V. Pawar (2019)		Überbau

Autoren	...	Baufeld
M. Saboia, V. Thangavelu und N. Napp (2019)		Baufeldvorbereitung
Zhang et al. (2022)		Verankerung / Überbau
B. Jenett, A. Abdel-Rahman, K. Cheung und N. Gershenfeld (2019)		Überbau
N. Kubail Kalousdian, G. Łochnicki, V.N. Hartmann, S. Leder, O. Oguz, A. Menges und M. Toussaint (2022)		Überbau
S. Jin, S. Maggs, D. Sadan, C. Nan, S. Jokić und P. Novikov (2013)		Verankerung / Überbau

Im Folgenden wird die **Tabelle 6** im Zusammenhang mit dieser Analyse ausführlich erörtert:

- **Baufeldvorbereitung:** Obwohl kleine, verteilte Robotersysteme das Potenzial haben, bei der Vorbereitung von Baustellen eingesetzt zu werden, gibt es derzeit nur wenige Beispiele, in denen sie bei Erdarbeiten verwendet wurden. Diese Einschränkung lässt sich auf zwei Hauptfaktoren zurückführen, die in diesem Bereich eine Herausforderung darstellen.

Der erste Grund hängt mit der Art der Baustellenvorbereitung zusammen, bei der häufig mit unregelmäßigen Materialien wie Felsen gearbeitet wird. Obwohl die Sensortechnologie in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht hat, ist die Fähigkeit von Robotern, effektiv mit unregelmäßigen Materialien zu arbeiten, immer noch begrenzt. Unregelmäßige Materialien stellen eine Herausforderung beim Greifen, Handhaben und Manipulieren dar, da die für solche Aufgaben erforderliche präzise Steuerung schwieriger ist als bei der Arbeit mit regelmäßigen und gleichförmigen Objekten.

Der zweite Grund ist die begrenzte Fähigkeit kleiner Robotersysteme, große Mengen an Material auf einmal zu verarbeiten. Bei der Vorbereitung von Baustellen müssen in der Regel große Mengen an Material über die Baustelle bewegt werden. Kleine Roboter haben eine begrenzte Tragfähigkeit und Nutzlast, sodass es ineffizient ist, sich bei großen Erdbewegungsarbeiten ausschließlich auf einzelne kleine Roboter zu verlassen. Um die Produktivität größerer Robotersysteme zu erreichen, wäre ein großer Schwarm kleiner Roboter erforderlich. Die effektive Koordinierung solcher Schwärme stellt an sich schon eine große Herausforderung für die Forschung dar, da sie die Entwicklung ausgeklügelter Algorithmen und Kontrollsysteme für die Schwarmkoordinierung voraussetzt.

Es gibt jedoch laufende Bemühungen, diese Herausforderungen zu bewältigen und verteilte Robotersysteme zu entwickeln, die Erdbewegungsaufgaben bewältigen können. Ein bemerkenswertes Beispiel ist die Arbeit von Saboia, Thangavelu und Napp (2019), die ein Robotersystem mit entsprechenden Steuerungsalgorithmen entwickelt haben, das speziell für die Modifikation unstrukturierter Umgebungen unter Verwendung von Materialien mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften und Größen, insbesondere Felsen und Sandsäcken, konzipiert ist. Diese Roboter sind in der Lage, mit den Materialien umzugehen und Entscheidungen über die zu verwendenden Materialien zu treffen, um ihre Umgebung effektiv zu manipulieren.

Neben der Erdbewegung werden auch die Organisation und der Transport von Erdmaterialien auf Baustellen erforscht. Dabei lassen sich die Forscher häufig von der Natur inspirieren, die eine bemerkenswerte Koordination zwischen einer großen Anzahl von Akteuren beim Aufbau von Strukturen zeigt. Parker, Zhang und Kube (2003) ließen sich von Ameisenkolonien inspirieren, um eine Koordinationsstrategie für das Planieren von zufällig angeordneten Kieselsteinen zu entwickeln. Durch das Studium des kollektiven Verhaltens von Ameisen wollen die Forscher ähnliche Koordinationsmechanismen für verteilte Robotersysteme entwickeln, die an der Vorbereitung von Baustellen beteiligt sind.

Es gibt zwar nur wenige Beispiele für verteilte Robotersysteme in kleinem Maßstab, die an Erdbewegungsarbeiten zur Vorbereitung von Baustellen beteiligt sind, aber die laufende Forschung zielt darauf ab, die Herausforderungen zu überwinden, die sich durch unregelmäßige Materialien und die Skalierbarkeit kleiner Roboter ergeben. Die spezifischen Anwendungen, die im Rahmen der Baustellenvorbereitung erforscht wurden, sind das Abtragen und Anordnen von Erdmaterialien, die Bodenstabilisierung und die Verwendung von amorphen Materialien zur Nivellierung des Geländes. Im letzteren Fall konzentriert sich die Forschung auf die Verwendung amorpher Materials, wie z. B. Sprühschäume, zur Nivellierung des Geländes, wie in der Arbeit von Napp und Nagpal (2014) beschrieben. Amorphe Materialien sind Stoffe, die fließen und sich vor dem Aushärten an die Form ihrer Umgebung anpassen können. Kleine verteilte Robotersysteme können eingesetzt werden, um flüssiges amorphes Material, wie z. B. Sprühschäume, in Lücken oder auf unebenen Flächen auf der Baustelle aufzubringen. Sobald das Material aushärtet, bildet es eine ebene und stabile Oberfläche. Auf diese Weise können Roboter Hindernisse und Unebenheiten auf der Baustelle ausgleichen und eine effektive Methode zur Nivellierung der Baustelle bieten.

- *Verankerung:* Neben der Baustellenvorbereitung wurde festgestellt, dass ein kleiner Teil der verteilten Robotersysteme an den Verankerungsprozessen beteiligt ist. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus der Übersichtsarbeit von Melenbrink, Werfel und Menges (2020). Es hat jedoch bemerkenswerte Entwicklungen in diesem Bereich gegeben. Zu den Anwendungen verteilter Robotersysteme bei der Verankerung gehören der Fundamentbau und das Rammen von Pfählen.

Beim Bau von Fundamenten haben verteilte Robotersysteme gezeigt, dass sie in der Lage sind, große ebene Flächen zu schaffen, die eine Gebäudekonstruktion tragen können. Andreen et al. (2016) und Petersen, Nagpal und Werfel (2011) haben verteilte Robotersysteme erforscht, die in der Lage sind, solche Flächen zu bauen. Bei diesen Systemen arbeiten mehrere Roboter zusammen, um diese Flächen zu erstellen, die als Grundlage für Gebäudekonstruktionen dienen können.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Verankerung dieser ebenen Elemente auf der Baustelle, um die Lasten des Gebäudes in den Boden zu übertragen, ein entscheidender Schritt bleibt. Zwar gibt es derzeit kein spezifisches verteiltes Robotersystem, das diesen Aspekt direkt anspricht, doch könnte die Forschung zu amorphen Materialien wertvolle Erkenntnisse für diese Anwendung liefern.

Amorphe Materialien, wie z. B. Sprühschäume oder spezielle Betonmischungen, haben das Potenzial, für die Verankerung von Flächenelementen verwendet zu werden. Diese Materialien können Lücken füllen und sich an unregelmäßige Oberflächen anpassen, wodurch eine starke und stabile Schnittstelle zwischen dem flächigen Element und der Baustelle entsteht. Der Einsatz von Drohnen für die additive Fertigung, wie er von Zhang et al. (2022) demonstriert wurde, ist ein vielversprechender Weg, um die Anwendung amorpher Materialien im Fundamentbau zu erforschen.

Es gibt auch ein Projekt namens Minibuilders von Forschern des Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), das sich auf die Arbeit mit Beton konzentriert (Jin et al.

2013). Der endgültige Prototyp von Minibuilders ist zwar eine selbsttragende Struktur, aber das Projekt demonstriert die Fähigkeit kleiner Maschinen, mit Beton zu arbeiten. Minibuilders erreicht dies durch einen verteilten Ansatz, bei dem verschiedenen Robotern unterschiedliche Aufgaben zugewiesen werden. Ihre Funktionalität beruht auf der reinen Zusammenarbeit zwischen den Robotern. Die Erwähnung von Minibuilders im Zusammenhang mit Verankerungen ist von Bedeutung, da Beton eines der wichtigsten Materialien für Fundamente im Bauwesen ist. Indem das Projekt zeigt, wie kleine Maschinen effektiv mit Beton arbeiten können, unterstreicht es das Potenzial verteilter Robotersysteme, einen wesentlichen Beitrag zu grundlegenden Bauprozessen mit Beton zu leisten.

Pfähle werden in der Regel als Gründungselemente zur Stützung von Bauwerken verwendet. Verteilte Robotersysteme können eingesetzt werden, um den Rammvorgang zu automatisieren. Mit speziellen Werkzeugen ausgerüstete Roboter können Pfähle effektiv in den Boden treiben und so eine ordnungsgemäße Unterstützung des Fundaments gewährleisten. Die Forschungsarbeiten von Melenbrink et al. (2020) zur Verankerung haben gezeigt, wie kleine, verteilte Maschinen für das Rammen von Spundwänden und Pfählen eingesetzt werden können. Der Anwendungsbereich der Forschung liegt nach Angaben der Autoren im Bereich der Fundamente, aber sie zeigen auch, wie die Pfähle für verschiedene Arten der Standortvorbereitung verwendet werden können.

- **Überbau:** Die Bauaufgabe, zu der die meisten kleinräumig verteilten Robotersysteme beitragen, ist der Überbau. Dabei kommen verschiedene Robotertypen und unterschiedliche Materialien zum Einsatz. Obwohl in dieser Hinsicht vielfältig, wurde die Forschung zum Überbau weitgehend für die Montage der strukturell tragenden Elemente eines Gebäudes betrieben. Dazu gehören sowohl 2-dimensionale als auch 3-dimensionale Strukturen wie Kuppeln, Zugstrukturen, Gitterstrukturen, Verzweigungsstrukturen und Space Frames.

Die Wahl des Materials spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Art der Struktur, die mit verteilten Robotersystemen gebaut werden kann. In verschiedenen Forschungsstudien wurden unterschiedliche Materialien verwendet, von denen jedes seine eigenen Eigenschaften und Beschränkungen hat. In der Untersuchung von Lindsey, Mellinger und Kumar (2012) wird zum Beispiel das im System verwendete Material mit Magneten als Verbindungselementen angepasst. Dieses Material schränkt die möglichen Strukturkonfigurationen auf quadratische Gitterstrukturen ein, da die Magnete nur auf bestimmte Weise verbunden werden können. Andererseits arbeiteten Petrs, Dahy und Florian (2019) mit einem würfelbasierten Material, was zu voxelisierten Formen als Ausgangsstrukturen führte. Das bedeutet, dass die Strukturen aus miteinander verbundenen Würfeln bestehen, die eine gitterartige Anordnung bilden.

Die Verwendung unterschiedlicher Materialien und die damit verbundenen Einschränkungen für die entstehenden Strukturen verdeutlichen die Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit kleiner verteilter Robotersysteme im Überbau. Die Forscher erforschen ständig neue Materialien und Konstruktionsstrategien, um die Fähigkeiten dieser Systeme zu erweitern und den Bau von komplexeren und vielfältigeren Strukturen zu ermöglichen.

Unter den verschiedenen anderen Teilen des Überbaus, wie Verkabelung, Beleuchtung und Fassade, wurde eine spezifische Bauaufgabe identifiziert, nämlich die Erstellung von Rohren. Die Erstellung von Rohren könnte potenziell dazu beitragen, Probleme bei der Integration von Dienstleistungen in Gebäuden zu lösen, insbesondere für HLK, Verkabelung oder andere Systeme, die Kanäle durch ein Gebäude benötigen. Obwohl die Forschung von Kayser et al. (2018) ein strukturell hochgradig performantes Material verwendet, zeigt die

Forschung zu Fiberbots, wie verteilte Robotersysteme zur Erstellung von Rohren eingesetzt werden können.

Die Verwendung verteilter Robotersysteme zur Herstellung von Rohren bietet mehrere Vorteile. Erstens ermöglicht die geringe Größe dieser Roboter eine bessere Manövrierbarkeit und den Zugang zu engen Räumen, sodass Rohre auch an schwer zugänglichen Stellen in einem Gebäude gebaut werden können. Darüber hinaus ermöglichen die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit verteilter Robotersysteme den Bau von Rohren direkt vor Ort, sogar innerhalb des Bauwerks, während es gebaut wird. Dieser Ansatz kann den Bauprozess rationalisieren, den Bedarf an vorgefertigten Rohren reduzieren und eine präzisere Integration von Dienstleistungen ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es bereits eine große Anzahl verteilter Robotersysteme gibt, die sich mit verschiedenen Aspekten des Bauwesens befassen. Obwohl es einige Ausnahmen gibt, befasst sich jedes System im Allgemeinen nur mit einem ganz bestimmten Aspekt des Bauwesens. Die in diesem Bericht vorgestellten Forschungsarbeiten gehören zu denjenigen, die sich mit der Automatisierung der Montage von tragenden Elementen eines Gebäudes befassen. Daher gibt es eine Reihe von Möglichkeiten für die Verbindung mit anderen Gebäudesystemen und Automatisierungssystemen. Im Folgenden werden einige der wichtigsten Aspekte, sowohl im Hinblick auf das Gebäude als auch auf die Konstruktionsmethoden, im Zusammenhang mit den vorgeschlagenen Systemen erörtert:

- *Baustellenvorbereitung (Nivellierung des Standorts):* Während verteilte Robotersysteme in unbekannten Umgebungen im Allgemeinen immer robuster werden, benötigte das vorgeschlagene Robotersystem aus dem IntCDC-Projekt eine ebene Fläche, um entweder eine Rahmenkonstruktion oder eine Hohlkastendecke zu bauen (Leder et al. 2022). Wie bereits erwähnt, gibt es einige verteilte Robotersysteme, die das Potenzial haben, bei der Schaffung einer ebenen Fläche zu helfen, auf der die Roboter arbeiten können (Saboia/Thangavelu/Napp, 2019; Parker, Zhang, 2006).

Bei der Hohlkastendecke-Struktur liegt eine weitere Herausforderung in der Platzierung der Grundplatte, auf der die Scherstege montiert werden können. Eine mögliche Lösung bestünde darin, die Platte zu diskretisieren und mit einem verteilten Robotersystem zu montieren, ähnlich wie bei Petersen, Nagpal und Werfel (2011) oder Andreen et al. (2016). Bei diesen Systemen wurden verteilte Robotersysteme eingesetzt, um rechteckige Bauelemente mit geringer Tiefe zu montieren. Die Anpassung dieser Systeme könnte die Montage einer aus kleinen Elementen zusammengesetzten Platte erleichtern, die von einem verteilten Robotersystem gehandhabt werden kann.

- *Überbau (Fassade und Gebäudeumhüllung):* Wie bei vielen der untersuchten verteilten Robotersysteme, die die Montage von tragenden Strukturen übernehmen, bilden die errichteten Gebäudekonstruktionen keine festen Umhüllungen. Zu den Beispielen, die über die bereits vorgestellten Rahmenstrukturen hinausgehen, gehören Bambuskuppeln (Kubail Kalousdian et al. 2022) und Konstruktionen aus Hohlblocksteinen (Jenett et al. 2019). Um diese Strukturen in sichere und bewohnbare Räume zu verwandeln, die unterschiedlichen Wetterbedingungen standhalten können, ist es notwendig, die Strukturen so zu verbessern, dass sie vollständig geschlossen sind.

Ein Ansatz besteht darin, sie mit oberflächenbasierten Bauelementen zu verkleiden, die eine zusätzliche Schutzschicht gegen äußere Einflüsse bieten können. Bei den bestehenden Systemen können solche festen Oberflächenelemente in Form von ziegelähnlichen Materialien verwendet werden, wie in den Forschungsarbeiten von Petersen, Nagpal und Werfel (2011) oder Petrs, Dahy und Florian (2019).

Eine weitere Möglichkeit, Witterungsbeständigkeit zu gewährleisten und bewohnbare Räume zu schaffen, ist die Versiegelung der Strukturen mit amorphen Materialien. Die

Forschung von Napp und Nagpal (2014) verwendet bereits Isolierschaum für die Schaffung von Rampenstrukturen. Eine Adaption dieses Systems könnte entwickelt werden, um auf einer bereits gebauten Tragstruktur zu navigieren und dann Schaum zu sprühen, um die Struktur zu versiegeln. Jin et al. (2013) geben ein Beispiel für verteilte Robotersysteme, die sich mit Hilfe eines Vakuums auf einer Struktur positionieren können, um die Oberfläche der tragenden Struktur zu detaillieren. Dabei legen sie während ihrer Bewegung Materialien auf der Oberfläche ab. Die Verwendung von Sprühschaum zur Abdichtung der Struktur kann auch nützlich sein, um eine Feuchtigkeitsbarriere zu schaffen, die Akustik zu kontrollieren und eine Wärmedämmung für ein Gebäude zu bieten.

- **Überbau (Haustechnik):** Der Umgang mit der Haustechnik ist ein weiterer wichtiger Aspekt, der bei der Betrachtung einer vollständigen Gebäudekonstruktion nicht außer Acht gelassen werden sollte. Für Rahmenkonstruktionen mit dem vorgeschlagenen verteilten Robotersystem besteht ein möglicher Ansatz darin, direkt mit der Installation von Rohrstrukturen in Zusammenarbeit mit einem Robotersystem wie Fiberbots (Kayser et al. 2018) zu arbeiten. Diese Roboter sind in der Lage, durch die Lücken zwischen den Diagonalen zu navigieren und Rohre für verschiedene Haustechniken wie HLK oder Verkabelung zu erstellen.

Bei der aktuellen Forschung zur Hohlkastendecke wird der Mensch in den Prozess einbezogen, um die Haustechnik zu handhaben. Dabei wird die Geschicklichkeit des Menschen für Aufgaben wie die Installation von Beleuchtungskabeln genutzt. Konkret wird der menschliche Arbeiter mit einem Augmented Reality (AR) Headset ausgestattet, das ihn durch den Installationsprozess führt (Skoury et al. 2022; Yang et al. 2022) (**Abbildung 48**). Dieser Ansatz könnte möglicherweise in Verbindung mit dem vorgeschlagenen verteilten Robotersystem erforscht werden.

Abbildung 48: AR-Integration bei der Konstruktion von Holzkonstruktionen. AR-Visualisierung auf der HoloLens¹⁵ (links) und ein Handwerker, der die HoloLens trägt, um mit einem Industrieroboterarm zusammenzuarbeiten (rechts).



Quelle: (Yang et al. 2022)

Die Arbeit mit verteilten Robotersystemen bietet den Vorteil einer geringeren Traglast der Maschinen, was die Möglichkeit der kollaborativen Arbeit am selben Werkstück eröffnet. Dieser kollaborative Aspekt hat das Potenzial, die Gesamteffizienz des Montageprozesses erheblich zu steigern. Durch die Kombination der Präzision und der Automatisierungsfähigkeiten verteilter Robotersysteme mit der Geschicklichkeit und den Entscheidungsfähigkeiten menschlicher Mitarbeiter kann ein Synergieeffekt erzielt werden.

¹⁵ <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

- *Sonstiges (Materialtransport)*: Die Montagezeit für verteilte Robotersysteme wird durch den Materialtransport erheblich verlängert. Die Materialtransportzeit bezieht sich auf die Zeit, die die Roboter benötigen, um die Materialien vom Lagerort auf der Baustelle abzuholen und an den Installationsort innerhalb der Struktur zu liefern. Wenn sich die Struktur in zwei oder drei Dimensionen ausdehnt, vergrößern sich auch der Montageort und der Materiallagerort, was zu einem exponentiellen Anstieg der Bauzeit führt. In ihrer Untersuchung zeigen Jenett et al. (2019), dass zwei Hauptfaktoren, die dieses Problem beeinflussen, die Anzahl der im System arbeitenden Roboter und die Anzahl der Materiallagerplätze sind, die sie als "Pick-up" Stellen bezeichnen. In ihrem System kann eine höhere Anzahl von Robotern einen größeren Einfluss auf die Montagezeit haben als die Anzahl der Abholplätze.

Um dieses Problem zu lösen, können verschiedene Robotersysteme speziell für den Materialtransport eingesetzt werden. Einige Robotersysteme benötigen weniger Aufwand für die Navigation auf der Baustelle als andere. Drohnen sind ein Beispiel für ein relativ unproblematisches Robotersystem. Wie Augugliaro et al. (2014) gezeigt haben, wurden Drohnen bereits für den Zusammenbau von Stapelbauten eingesetzt. Im Rahmen dieser Forschung könnten Drohnen möglicherweise für den Transport von Streben entwickelt werden. Die Drohnen würden die Streben an die verteilten Roboter übergeben, die für geschickte Manipulationsaufgaben besser geeignet sind, da Drohnen aufgrund der schwierigen Flugmuster nicht in der Lage sind, solche komplexen Manöver durchzuführen.

- *Sonstiges (Bauüberwachung)*: Ein weiterer wichtiger Aspekt, der durch die Einführung zusätzlicher Bauautomatisierungssysteme angegangen werden kann, ist die Bauüberwachung. Da es sich bei dem vorgeschlagenen System um den schrittweisen Aufbau eines inhomogenen Materials handelt, sind Abweichungen und Toleranzen unvermeidlich. Daher ist die Fähigkeit, den Bauprozess zu überwachen, von entscheidender Bedeutung, um etwaige Abweichungen von der geplanten Struktur zu erkennen und zu beheben.

Es gibt bereits Beispiele für den Einsatz von kleinen Robotern auf Baustellen, die den Bauprozess scannen und überwachen. So wird beispielsweise der vierbeinige Roboter Spot¹⁶ von Boston Dynamics derzeit zur Bauüberwachung eingesetzt. Außerdem wird derzeit der Einsatz von Drohnen für dieselben Überwachungsaufgaben erforscht (Anwar et al. 2018; Li/Liu, 2019).

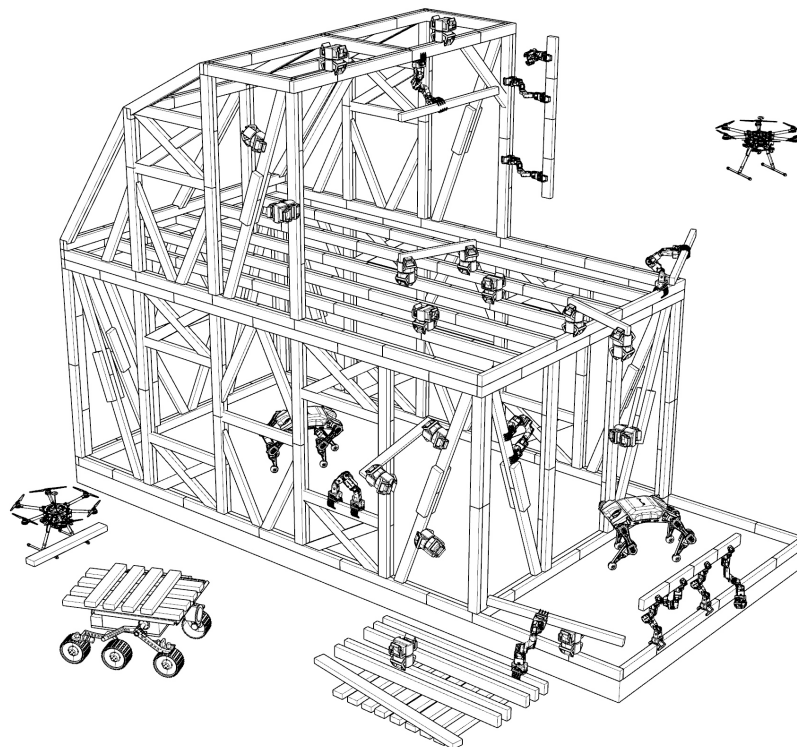
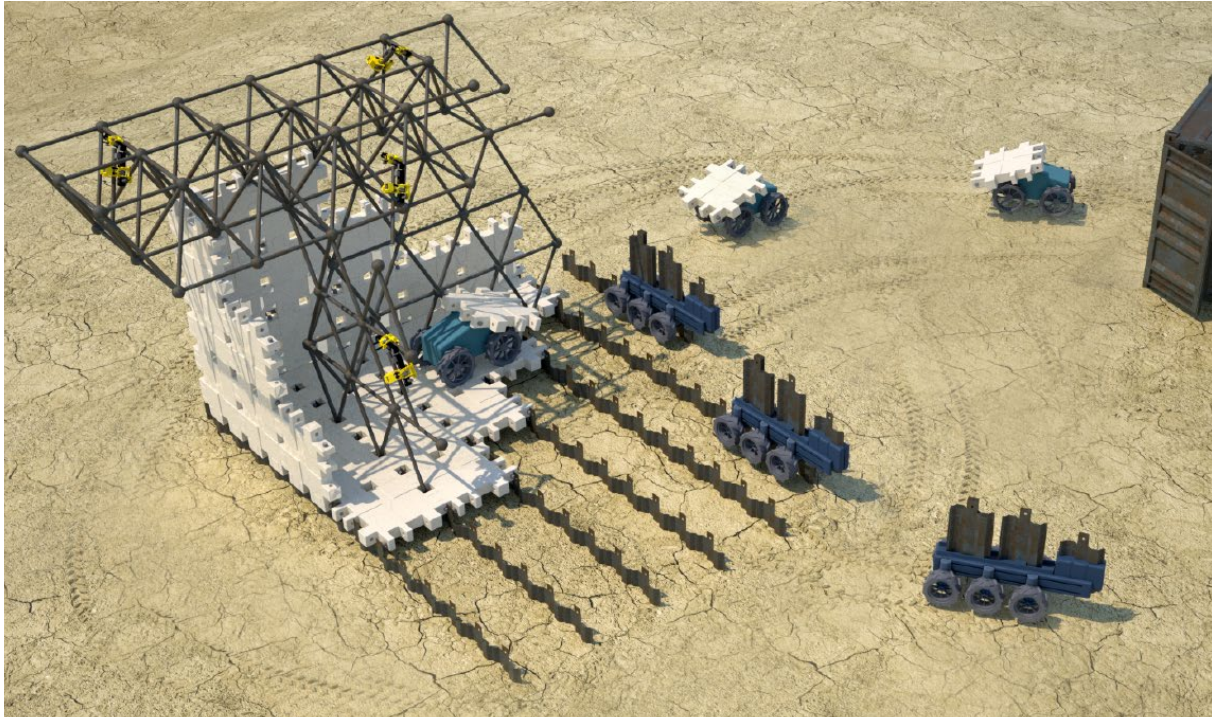
Ein weiterer Ansatz für die Bauüberwachung besteht darin, die Roboter mit der Fähigkeit auszustatten, die zu bauende Struktur zu erkennen. Melenbrink und Werfel (2017) stellten ein Beispiel für dieses Konzept vor, bei dem benutzerdefinierte Sensoren zwischen den Streben platziert wurden, sodass die Roboter diese bei ihrer Bewegung ablesen konnten. Um jedoch den Bedarf an zusätzlichen externen Materialien zu vermeiden, wäre es eine effizientere Lösung, die Roboter mit Onboard-Sensoren auszustatten. Wenn die Roboter in dem vorgeschlagenen System eine Schraubverbindung herstellen, messen sie den Winkel zwischen den beiden Streben, um die Aktualisierung des digitalen Modells der zu bauenden Struktur zu unterstützen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorgeschlagenen Systeme nur dann als vollwertige Gebäudekonstruktionen funktionieren können, wenn andere Gebäudesysteme und Automatisierungssysteme berücksichtigt und integriert werden. Da verteilte Robotersysteme in der Regel aufgabenspezifisch sind, ist die Überlegung, wie sie mit anderen Materialien und Robotersystemen zusammenarbeiten können, wichtig für ihre spätere Umsetzung in der industriellen Praxis. **Abbildung 49** gibt

¹⁶ <https://www.bostondynamics.com/products/spot>

einen Einblick in mögliche zukünftige Baustellen, auf denen verschiedene Maschinen nahtlos zusammenarbeiten, um ganze Strukturen zu errichten. Diese Visualisierung dient als Ausgangspunkt, um sich die Integration und Koordination verteilter Robotersysteme mit anderen Gebäudesystemen und Automatisierungstechnologien vorzustellen.

Abbildung 49: Mögliche Baustellen der Zukunft mit verschiedenen verteilten Robotersystemen, die unterschiedliche Aufgaben im Gebäudebau erfüllen



Quelle: oben(Melenbrink/Werfel/Menges 2020)

Eine solche Zusammenarbeit würde auch einen intelligenteren Planungsalgorithmus erfordern. Ein Algorithmus, der die unterschiedlichen Fähigkeiten der einzelnen Roboteragenten berücksichtigt und den Gesamtplan so optimiert, dass diese Fähigkeiten voll ausgeschöpft werden können. Die erfolgreiche Umsetzung einer solchen Planung würde zu erheblichen Effizienzsteigerungen bei der Systemleistung führen und damit die Wettbewerbsfähigkeit dieses Ansatzes im Vergleich zu konventionellen Fertigungsmethoden erhöhen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der für die zukünftige Umsetzung berücksichtigt werden muss, ist die Auswahl der Materialien, aus denen die verteilten Robotersysteme bestehen. Während sich diese Forschung primär auf den Einsatz von echten Holzstreben konzentriert, ist es erwähnenswert, dass viele der bestehenden verteilten Robotersysteme in der Praxis nicht-strukturelle oder Ersatzmaterialien verwenden. Um sicherzustellen, dass die angestrebte Zusammenarbeit verschiedener Maschinen tatsächlich funktional und in der realen Baupraxis anwendbar ist, ist eine Neubewertung der Baumaterialien erforderlich.

Zusammenfassung (AP 3) und Meilensteindiskussion (MS 3)

In diesem Abschnitt werden Methoden für die Entwicklung von Holzbausystemen mittels verteilter robotergestützter Bausysteme auf drei verschiedenen Ebenen beschrieben: Verbindung, Bauelement und Gebäudegruppe. Damit wurde Meilenstein 3 (**MS 3**), die erfolgreiche Entwicklung von Holzbausystemen, erreicht. Einige der in AP3 entwickelten Methoden können durch Weiterentwicklung auf andere Holzbausysteme mit verteilten Robotersystemen übertragen werden. Die wichtigsten Beiträge umfassen:

- Erweiterung eines bestehenden Ansatzes zum Informationsaustausch zwischen verschiedener Software für die Arbeit mit verteilten Robotersystemen
- Die Entwicklung eines mobilen Schraubeffektors
- Rechenverfahren zur Berechnung der Schraubenanordnung zwischen Holzelementen auf der Grundlage bestehender, aktueller DIN-Normen
- Eine Pipeline für den Entwurf und die Abfolge von Bauelementen, einschließlich Methoden für den Entwurf von aus kleinen Elementen zusammengesetzten Rahmenstrukturen und Methoden für die Abfolge von Bauelementen
- Eine Diskussion über die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Arten von verteilten Automatisierungssystemen

Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Gegenüber dem ursprünglichen Antrag gab es zwei kleinere Änderungen, die zwei Arbeitspakete betrafen.

Die erste war die neue Platzierung des **AP 3.1** Identifikation von rechnerischen Entwurfsprozessen (**AP 3.1**). Im ursprünglichen Antrag war dieses Arbeitspaket in einer anderen Reihenfolge als **AP 2.1** im Zusammenhang mit dem **AP 2** *Übertragung von Bauprozesseigenschaften in geeignete Bausystemeigenschaften und Entwurfsprinzipien* aufgeführt. Da es jedoch mehr mit der Entwicklung von Methoden, wie sie in **AP 3** durchgeführt werden, zusammenhängt, wurde es geändert.

Die zweite Änderung war die Einbeziehung des ursprünglichen **AP 3.5** in das endgültige **AP 4** *Exemplarische Prototypenerstellung, Bewertung und Erprobung*. **AP 3.5** beinhaltete die prototypische Implementierung und Evaluierung der entwickelten Systeme. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt besprochen.

Ergebnisse

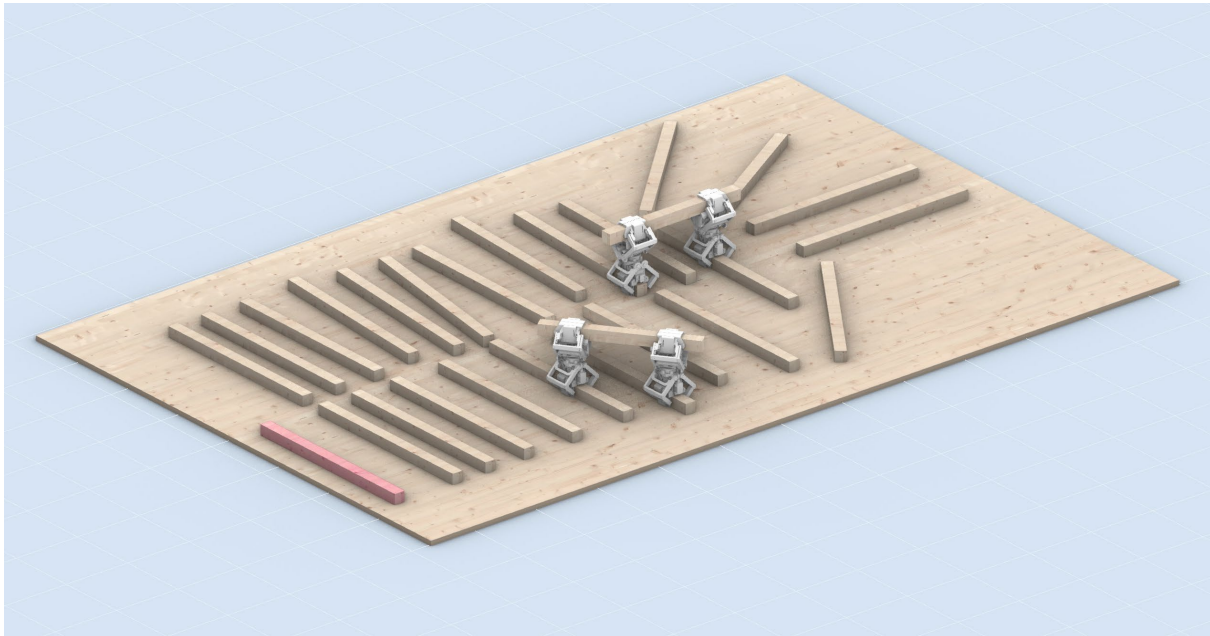
Neben der Vorstellung und Erprobung der Methoden im vorangegangenen Abschnitt, umfassten die Ergebnisse des Projekts die physische Montage einer Demonstrationsstruktur, die dem letzten Arbeitspaket des Projekts (**AP 4**) entsprach. In diesem Abschnitt wird der Bau eines großen Demonstrationsgebäudes vorgestellt, der die Anwendung und Kombination der verschiedenen entwickelten Methoden erforderte. In diesem Abschnitt werden auch die bei der Ausführung des Demonstrators erzielten Ergebnisse erörtert und bewertet.

Beispielhaftes Prototyping, Evaluierung und Testung (AP 4)

Bau des Baugruppen-Demonstrators

Ein endgültiger Demonstrator wurde auf der Grundlage des zuvor besprochenen Bauteils für eine Hohlkastendecke gebaut. Die Platzierung der Scherstege wurde unter Berücksichtigung der durch das verteilte Robotersystem vorgegebenen Randbedingungen konzipiert. Die Hauptbeschränkungen des verteilten Robotersystems sind, dass (i) jede Strebe nicht weiter als 40 [cm] von einer benachbarten Strebe entfernt sein darf, um in Reichweite zu sein und somit die Platzierung aller Streben zu ermöglichen, und (ii) alle Streben genügend Abstand zueinander haben müssen, damit sie vom Greifer des Roboters gegriffen und losgelassen werden können. Der endgültige Entwurf umfasste 25 Scherstege mit einem Querschnitt von 50 x 50 [mm], die auf einer Grundplatte von 2,5 x 4 [m] platziert wurden. Der Entwurf (**Abbildung 50**) zielt darauf ab, die Flexibilität des Robotersystems zu zeigen, indem die Streben in verschiedenen Winkeln und Abständen zueinander angeordnet wurden.

Abbildung 50: Entwurf des endgültigen Demonstrationsobjekts: Gebäudegruppe aus 25 Scherstegen, die über eine 2,5 x 4 [m] große Grundplatte gelegt werden



Für die Durchführung der Montage wurden vier Roboter innerhalb der *Distributed Robotic Platform* im *Large Scale Construction Robotics Laboratory*¹⁷ in Waiblingen über einen Zeitraum von drei Tagen eingesetzt, um eine Reihe von Stegen im endgültigen Design zu montieren. Die Montage erfolgte unter Verwendung des digitalen Zwillings, wie er in Leder et al. (2022) vorgestellt wurde, und des Modells von Leder und Menges (2024). Der Prozess wurde durch ein externes Tracking-System, insbesondere durch Optitrack¹⁸ IR-Kameras, überwacht, was eine erfolgreiche Durchführung ermöglichte.

Die allgemeine Abfolge der Roboter funktioniert folgendermaßen: (i) zuerst müssen die Roboterpaare zu der Stelle navigieren, an der neue Streben in das System eingeführt werden (in **Abbildung 51 A** rosa markiert), (ii) dann arbeiten sie zusammen, um eine Strebe an der Außenseite der Struktur entlang zu führen (in **Abbildung 51 B-E**), und (iii) schließlich kommen sie zu der Position, an der die Strebe in die Struktur geschraubt werden kann (in **Abbildung 51 F**). Diese Abfolge wiederholt sich, bis alle Stege zusammengefügt sind.

Abbildung 51: Abfolge der Roboter für die Montage einer Strebe

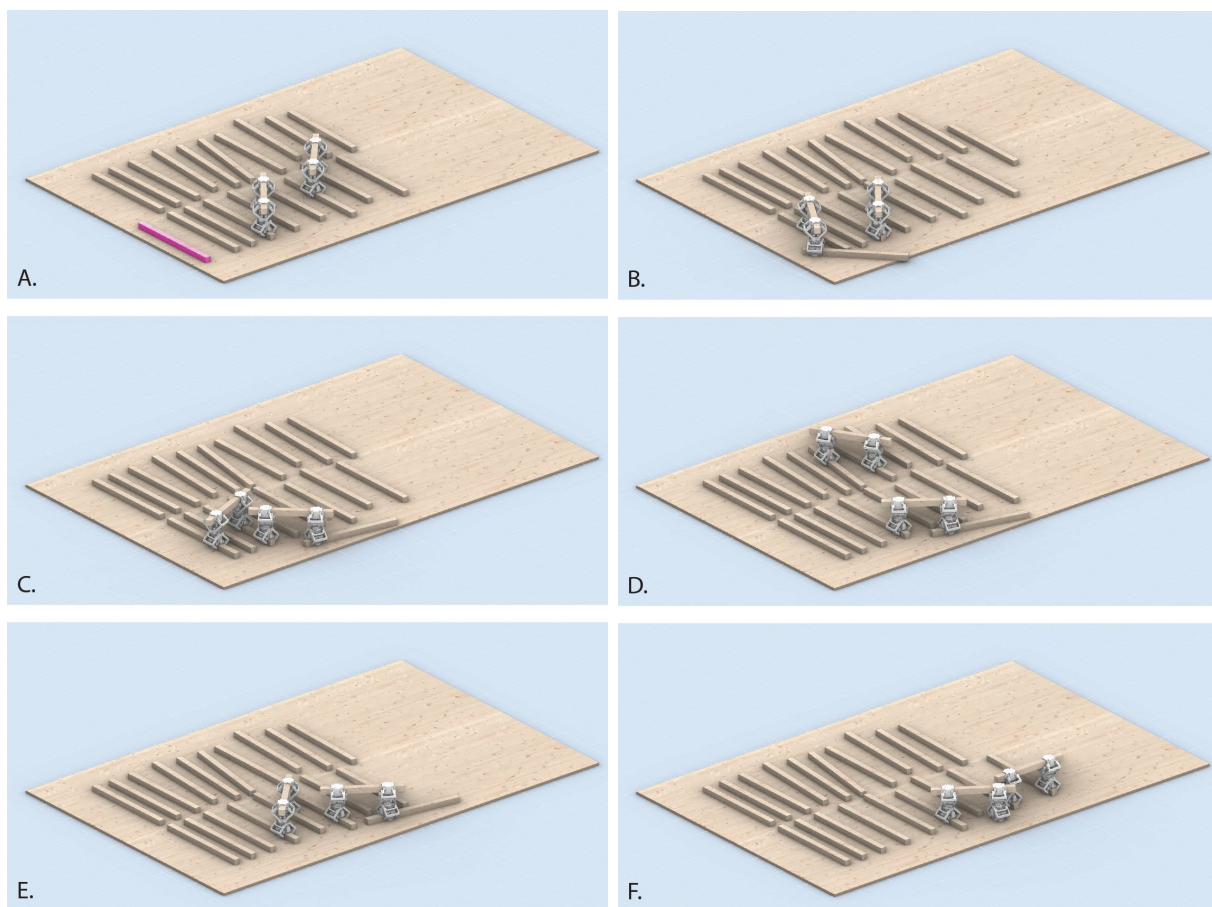


Abbildung 52 und **Abbildung 53** sind Fotos von der Montage. **Abbildung 54** und **Abbildung 55** zeigen den Ablauf der Montage zweier separater Holzstreben. Weitere Informationen über den Aufbau des Demonstrationsobjekts finden sich in Leder et al. (2024).

¹⁷<https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/news/Four-new-large-scale-robots-for-future-building-construction-00001/>

¹⁸ <https://optitrack.com/>

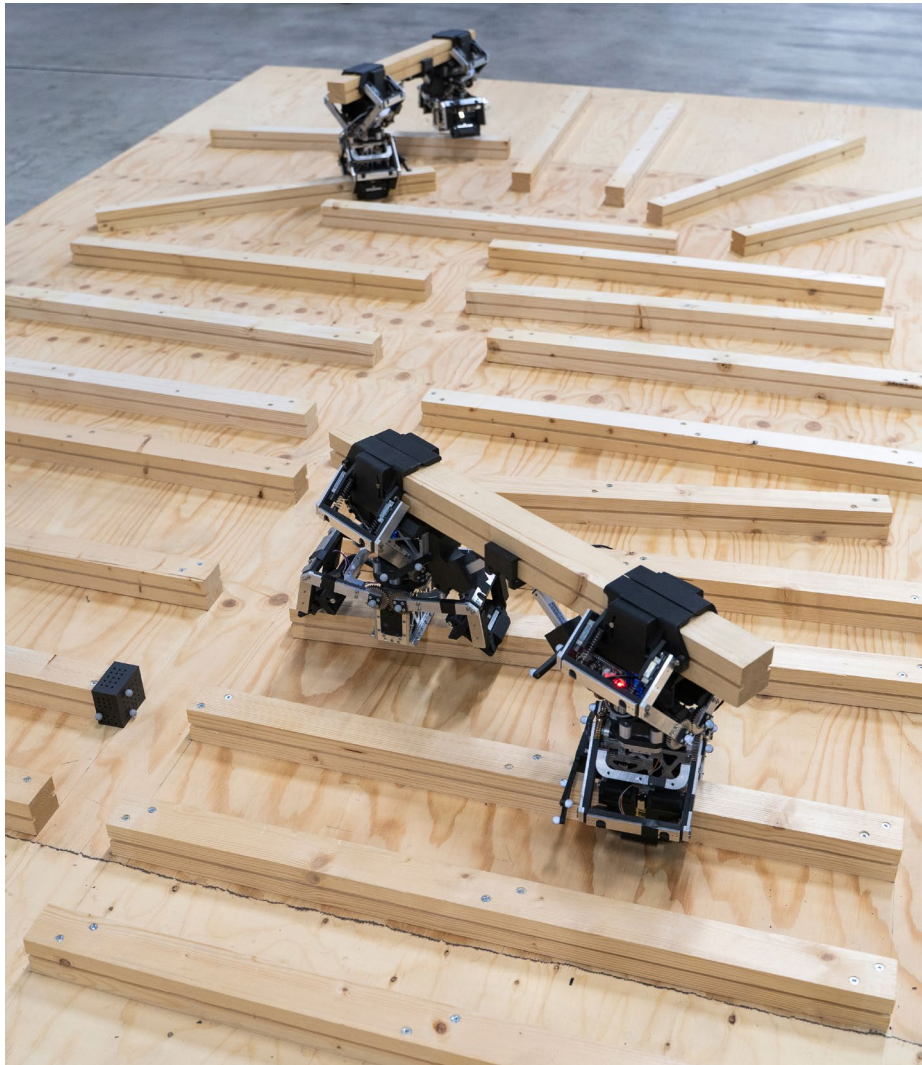
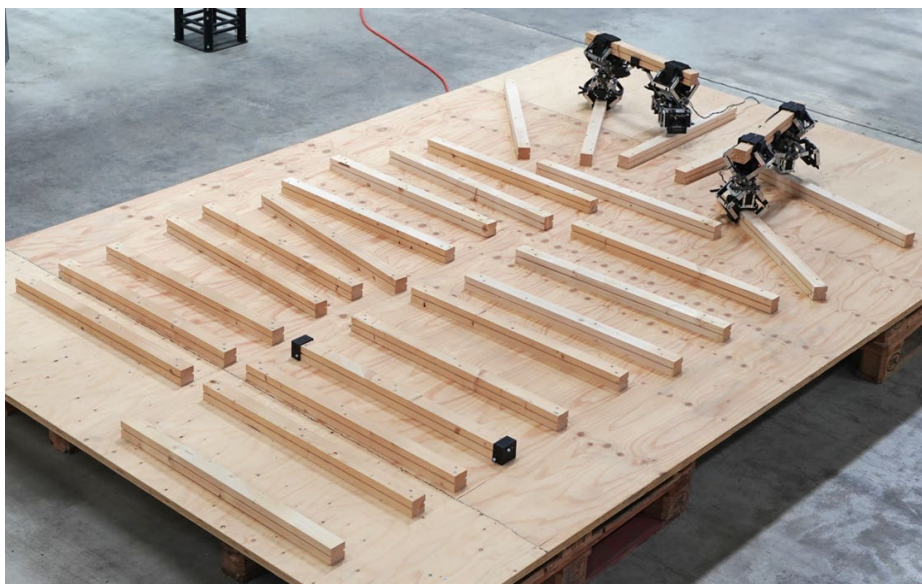
Abbildung 52: Foto von der Montage des endgültigen Demonstrators**Abbildung 53:** Foto des Ergebnisses der Demonstration

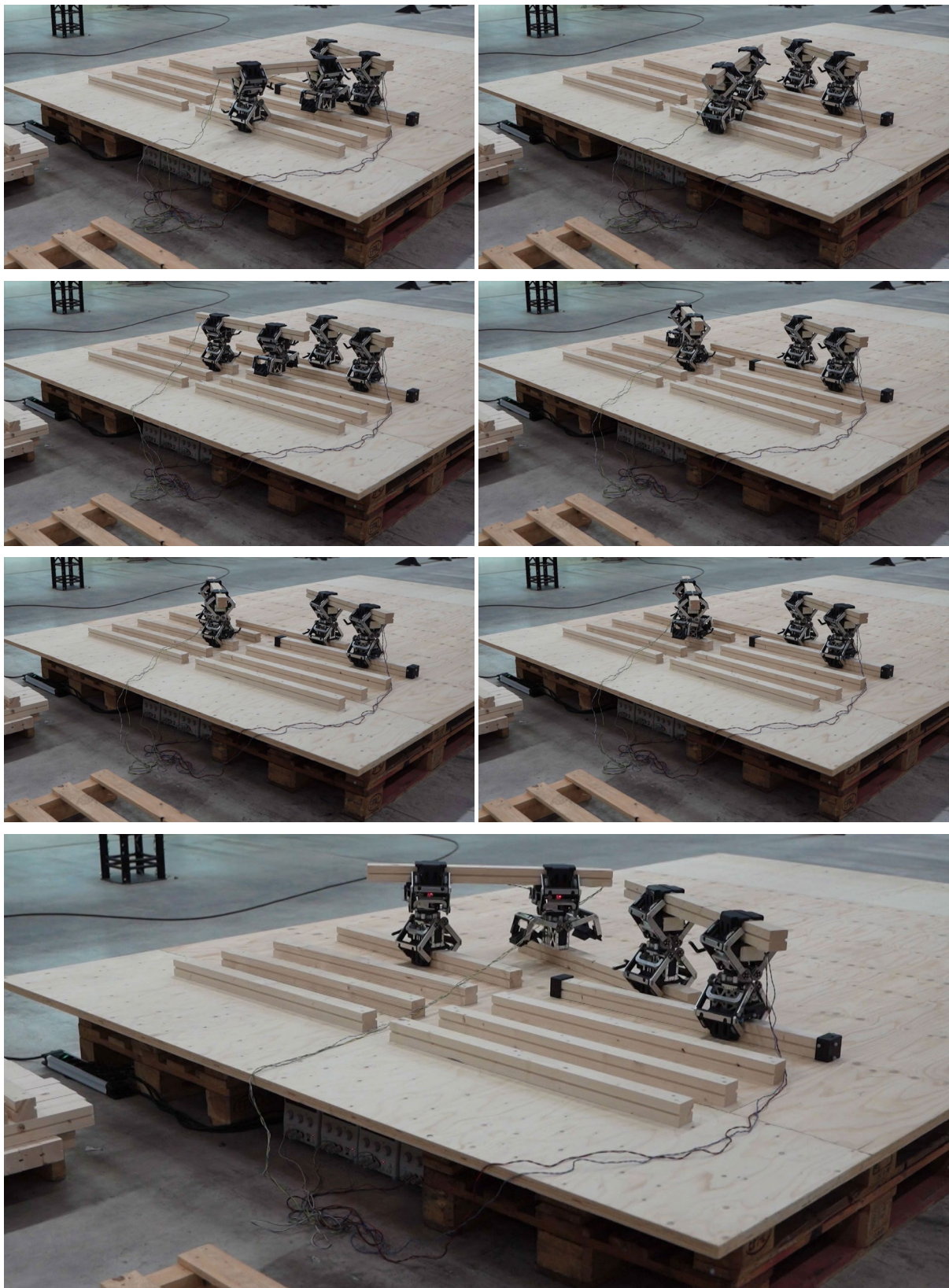
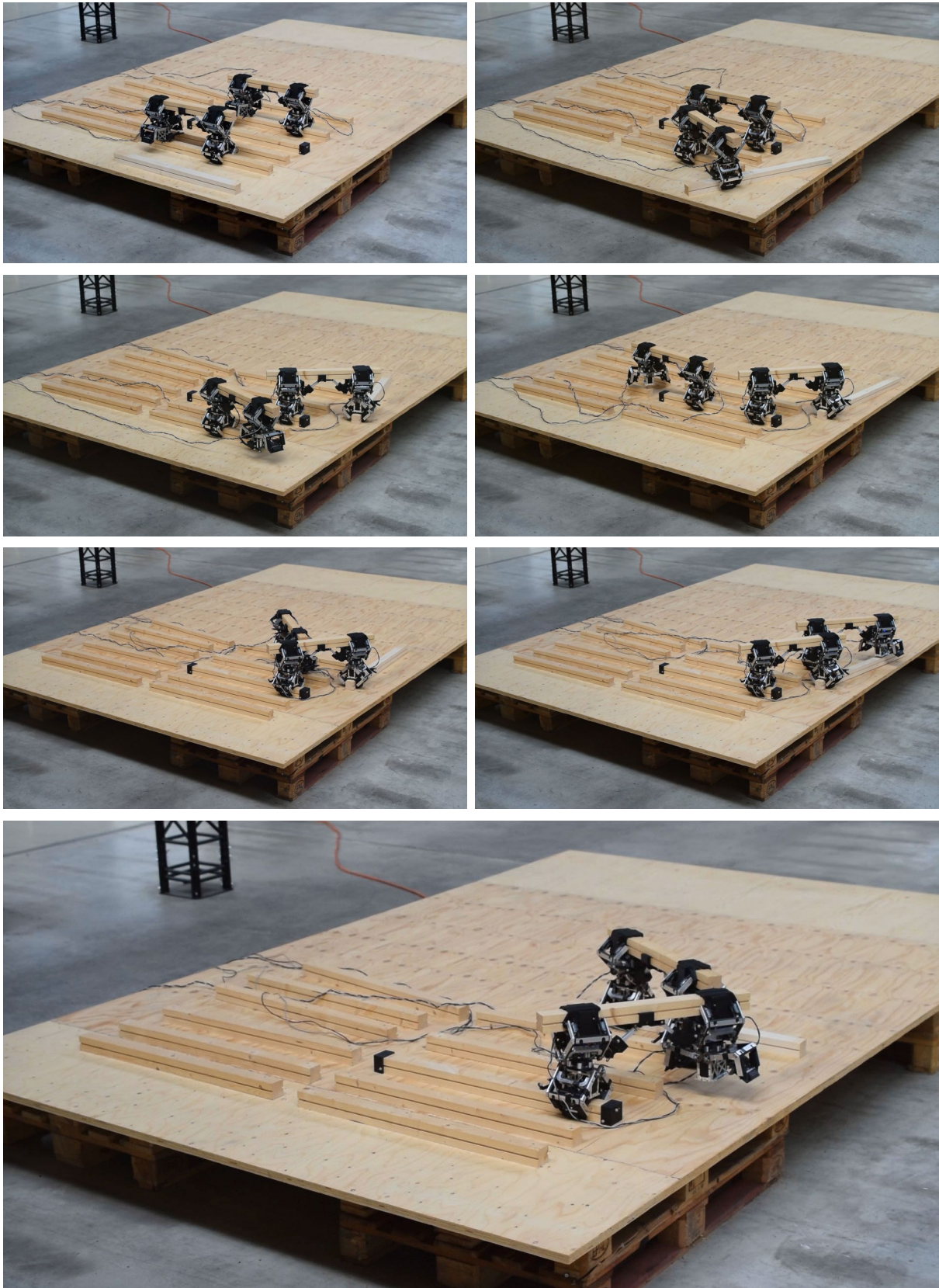
Abbildung 54: Fotoserie von der Montage des Demonstrators

Abbildung 55: Fotoserie von der Montage des Demonstrators mit aktualisierter Roboterhardware, eine zusätzliche Achse wurde hinzugefügt, um Toleranzen auszugleichen



Weitere Baugruppentests

Die entwickelten Rahmenbausysteme wurden auch manuell zusammengebaut, um diese Systeme physisch zu testen und ihre Baubarkeit zu validieren. **Abbildung 56** und **Abbildung 57** zeigen ein Beispiel für einen solchen Zusammenbau.

Abbildung 56: Foto einer Rahmenstruktur mit verteiltem Robotersystem als Maßstab



Abbildung 57: Foto einer Rahmenstruktur, die von einem verteilten Robotersystem montiert werden kann



Prototyping und Prüfung eines Schraubeneffektors

Der Schraubeneffektor (**Abbildung 58**) wurde durch eine Reihe von Iterationen mit zunächst 3D-gedruckten Teilen mit dem Markforged Mark Two-Drucker¹⁹ und Onyx-Filament²⁰ und dann mit speziell gefrästen Aluminiumteilen prototypisiert. Der Effektor wurde fünfmal entlang einer 1000 Millimeter langen Fichte/Tanne-Quadratleisten-Holzstrebe getestet, um seine Fähigkeit zu prüfen, zwei Schrauben unter potenziell unterschiedlichen Materialeigenschaften erfolgreich anzutreiben. Jede Schraube wurde sowohl in die Oberfläche der Strebe gebohrt als auch mit 100-prozentigem Erfolg herausgeschraubt. Auch das Nachziehen der Schrauben mit dem Effektor wurde durchgeführt, um die Lösbarkeit der Verbindungen nachzuweisen. Die Motoren des Effektors sind mit Getrieben verbunden. Dadurch kann die Kraft der Motoren erhöht werden, um die Verschraubung fertigzustellen. Allerdings verlangsamt die Übersetzung der Motoren die Geschwindigkeit des gesamten Mechanismus. Die Dauer des Eindrehens einer einzelnen Schraube beträgt 5 Minuten und 35 Sekunden. Ein Beispiel für den Bohrvorgang ist in **Abbildung 59** dargestellt.

¹⁹ <https://markforged.com/3d-printers/mark-two>

²⁰ <https://markforged.com/materials/plastics/onyx>

Abbildung 58: Foto der Vorderansicht des Bohreffektors. Ein Teil des Aluminiumrahmens wurde entfernt, um den inneren Mechanismus des Effektors zu sehen

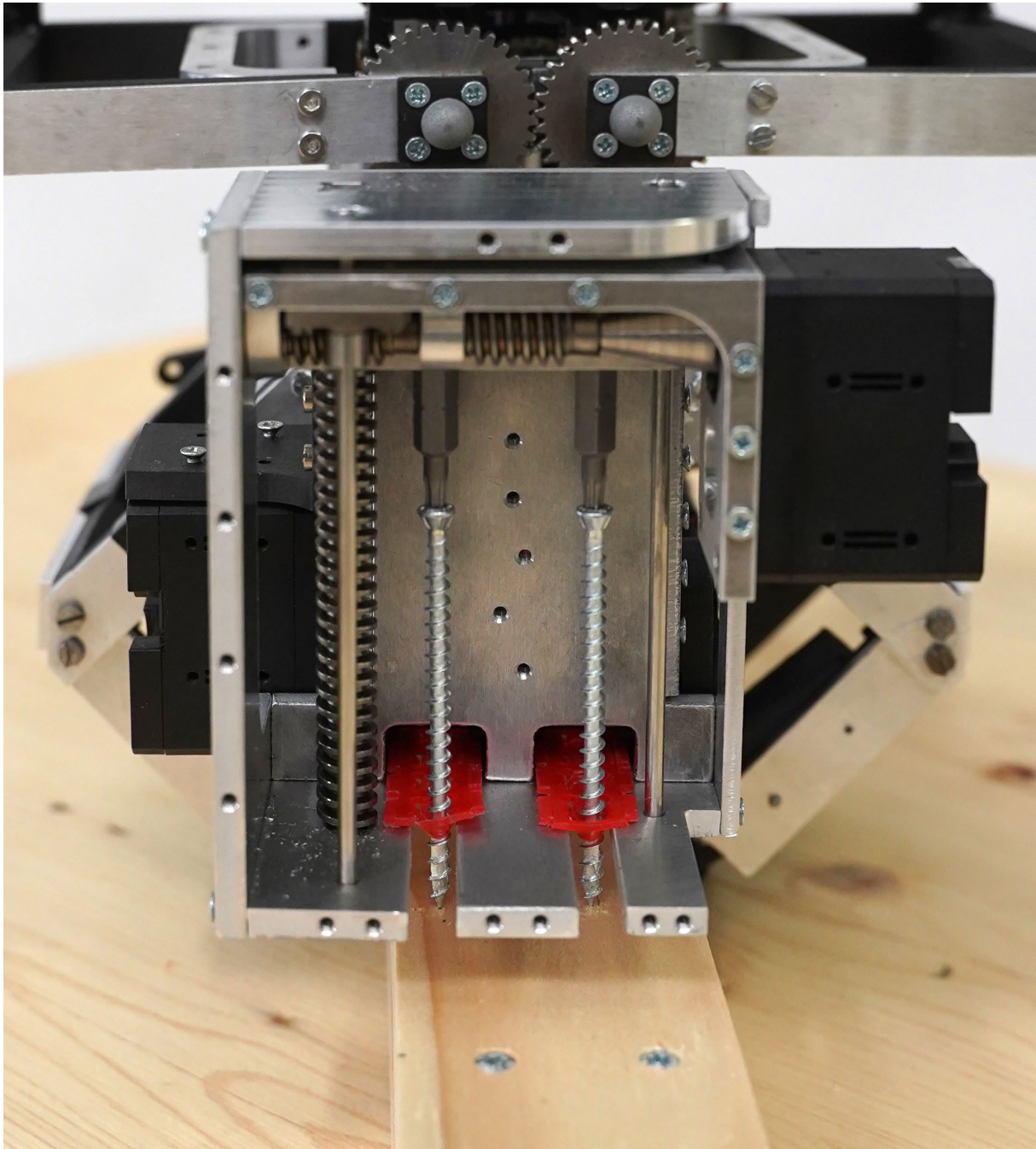
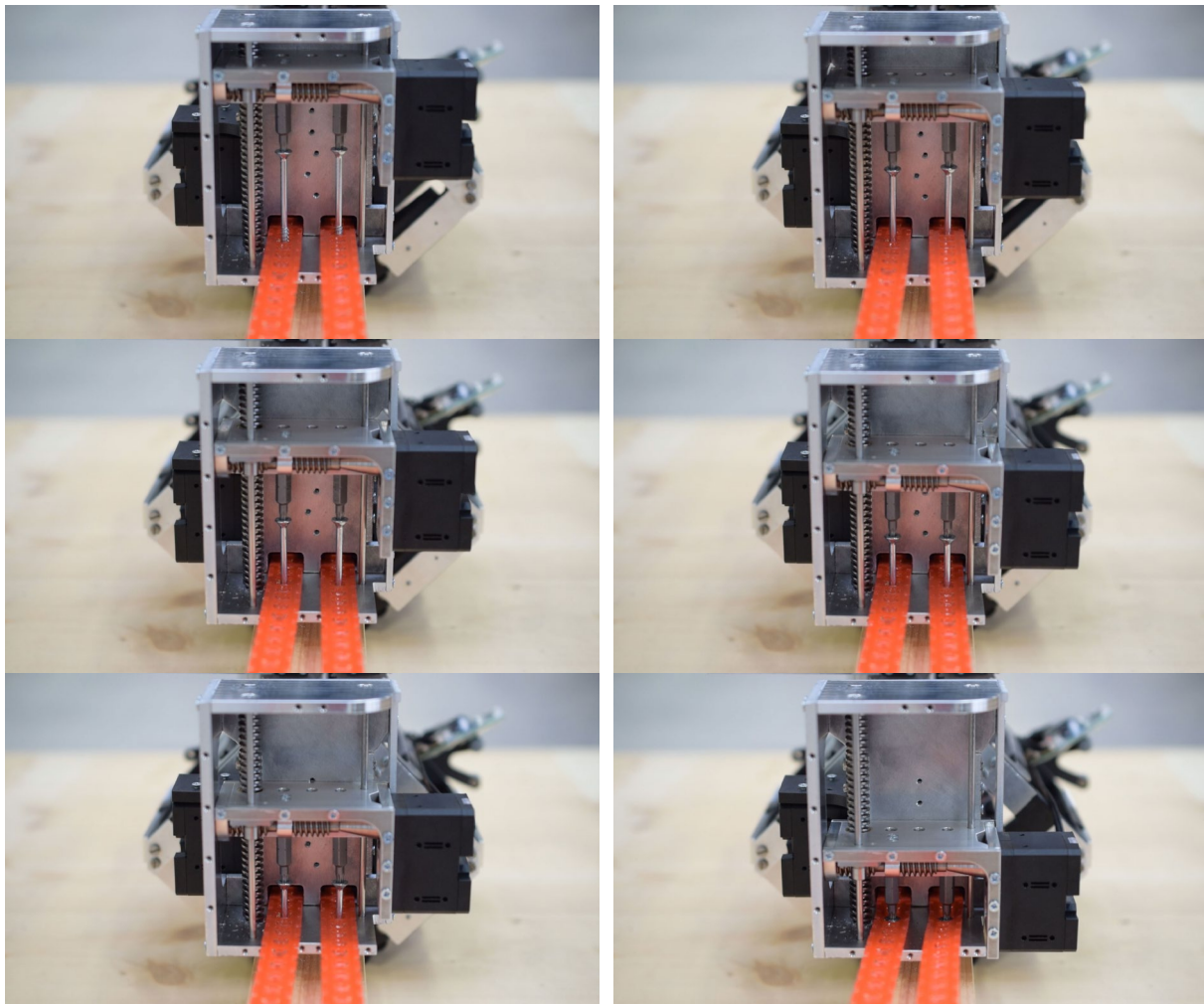


Abbildung 59: Fotoserie aus Versuchen mit dem entwickelten Schraubeneffektor. Innerhalb der Serie werden zwei Schrauben gleichzeitig in die darunter liegende Strebe gebohrt.



Diskussion und Meilensteindiskussion (MS 4)

Es konnte gezeigt werden, dass ein Team von verteilten Robotern in der Lage ist, ein größeres Gebäudebauteil aus Holz zusammenzusetzen. Dabei handelt es sich um die Montage einer Hohlkastendecke, die ursprünglich für ein anderes Robotersystem konzipiert wurde. Um den Erfolg der Montage durch das verteilte Robotersystem zu belegen, wird ein Vergleich mit der Montage desselben Gebäudesystems durch Industrieroboter durchgeführt. Petersen et al. stellen eine Reihe von Metriken zur Verfügung, die zur Bewertung von kollektiven Baumontageprozessen verwendet werden können (2020). Machbare Strukturen, Kosten und Systeminfrastruktur, Zeit, Genauigkeit, Robustheit und schließlich Effizienz und Leistungsfähigkeit sind die Kriterien, die in diesem Vergleich analysiert wurden.

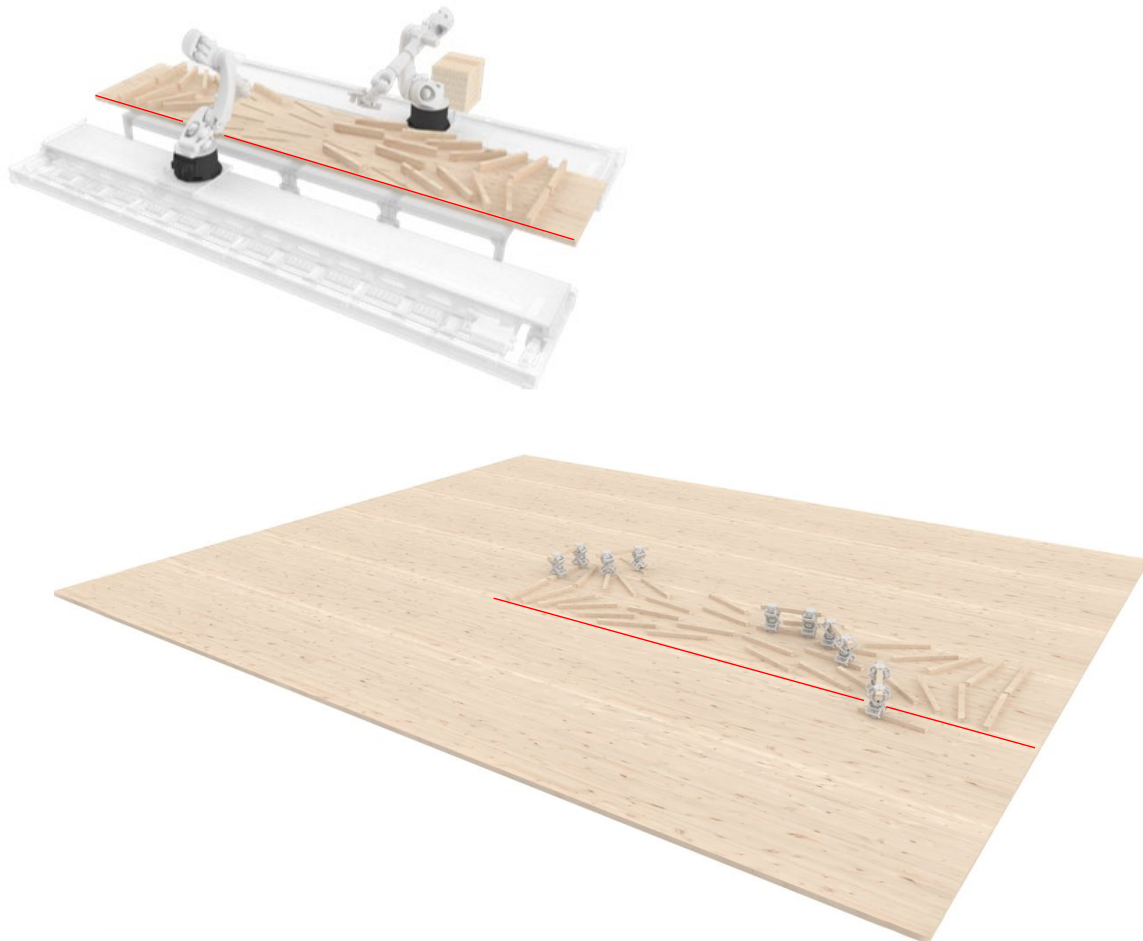
Die folgende Diskussion bewertet den im Projekt gebauten Demonstrator, wie in Meilenstein 4 (**MS 4**) spezifiziert. Weitere Diskussionen des Demonstrators im Vergleich zur spezifischen Automatisierung in Holzbausystemen sowie zu verteilten Robotersystemen finden sich in Leder et al. (2024).

Durchführbare Strukturen

Einer der größten Vorteile verteilter Robotersysteme ist, dass ihr Arbeitsbereich viel größer ist als der von Industrierobotern. Mit anderen Worten: Verteilte Robotersysteme sind in Bezug auf die Bandbreite der Strukturen, die sie bauen können, viel uneingeschränkter (**Abbildung 60**). Obwohl Industrieroboter mit

externen Achsen ausgestattet werden können, um ihren Arbeitsbereich zu erweitern, sind sie im Allgemeinen viel stärker eingeschränkt als kleine mobile Maschinen.

Abbildung 60: Vergleich des Arbeitsbereichs verschiedener Roboter-Automatisierungssysteme bei der Montage desselben Holzelementes



Quelle: Auf Basis von Research Project 3 (RP3): Computational Design, Engineering And Development Of Digitally Fabricated Multi-storey Wood Building System, IntCDC, Universität Stuttgart

Werden jedoch die einzelnen Elemente betrachtet, mit denen die Maschinen arbeiten können, können Industrieroboter aufgrund ihrer Gesamtstärke viel größere Elemente tragen. Verteilte Robotersysteme sind daher bei der Montage von großen Elementen unterlegen. Sie haben jedoch die Möglichkeit, große Konstruktionen aus kleineren Elementen zusammenzusetzen, wie die beiden im vorigen Abschnitt behandelten Bausysteme zeigen.

Kosten und Systeminfrastruktur

Was die Kosten der Systeme betrifft, so ist der Betrieb verteilter Robotersysteme in der Regel wesentlich günstiger als der Betrieb von Industrierobotern. Dafür gibt es zwei Hauptgründe. Der erste ist, dass die Roboter selbst viel günstiger in der Anschaffung sind. So kostet ein KUKA KR210 R3100-2 Industrieroboter etwa 75.000

Euro, während einer der bei der Ausführung der Hohlkastendecke verwendeten Roboter etwa 2.500 Euro kostet.

Der zweite Grund, warum die Industrierobotik teurer ist, liegt in der Systeminfrastruktur, die für die Arbeit mit ihnen erforderlich ist. Industrieroboter erfordern einen wesentlich höheren Aufwand auf der Baustelle, da sie im Boden verankert werden müssen. Ihre Integration erfordert auch mehr Platz für die Steuerungshardware und einen höheren Bedarf an Energieversorgung. Zum Vergleich: Barnett et al. (2017) schätzen, dass die durchschnittlichen Roboter für den Einsatz in Industrie und Fertigung jährlich über 21.000 [kWh] verbrauchen. In dem verwendeten verteilten Robotersystem verbraucht ein Roboter in einer Stunde 0,4 [Wh] bei 3,3 [V]. Bei einem 8-Stunden-Arbeitstag und etwa 260 Arbeitstagen im Jahr beträgt der Energieverbrauch für einen einzelnen Roboter 0,8 [kWh] pro Jahr.

Obwohl verteilte Robotersysteme im Allgemeinen mit externen Verfolgungssystemen arbeiten, ist es möglich, die Kameras solcher Verfolgungssysteme auf mobile Stative zu setzen oder sie an bestehenden Einrichtungen in der Bauumgebung zu befestigen. Die Systeminfrastruktur führt dann zu weiteren Kosten für die Arbeit mit Industrierobotern, die über die reinen Kosten für den Roboter hinausgehen.

Zeit

In Bezug auf die Zeit sind Industrieroboter sehr schnell, wenn es um die Platzierung von Holz geht. Um einen Steg zu verlegen, benötigen die Industrieroboter nur wenige Sekunden. In dem mit vier verteilten Robotern realisierten Konstruktionsszenario dauerte es etwa 3 Minuten und 30 Sekunden, um die 12 Streben zu setzen (Skoury et al. 2023). Die Arbeit mit Industrierobotern bietet also einen klaren Zeitvorteil, wenn es um die Fertigstellung von Baugruppen geht, die im Arbeitsbereich der Roboter liegen. Sobald jedoch menschliche Arbeitskraft erforderlich ist, um den Arbeitsbereich zu erweitern, erhöht sich die Zeit ebenfalls erheblich (Skoury et al. 2023).

Eine weitere Überlegung bei verteilten Robotersystemen ist, dass sich die Montagezeit verkürzen kann, wenn mehr Roboter in das System integriert werden. Dies muss in Bezug auf Kosten und Aufwand bei der Planung der Montage in Einklang gebracht werden.

Genauigkeit

Industrieroboter haben eine hohe Genauigkeit. KUKA gibt ihre Genauigkeit mit 0,04 Millimetern an.²¹ Bei verteilten Robotersystemen sind jedoch im Allgemeinen höhere Toleranzen bekannt, die durch die gewählten Verfolgungs- und Abtaststrategien stark beeinflusst werden können. Bei der Holzbauweise wird die Genauigkeit auch durch die Heterogenität des Materials beeinflusst. Dies wird von einigen verteilten Robotersystemen vermieden, indem das zu montierende Material auf eine bestimmte Art und Weise gestaltet wird (Jennett et al. 2019). Jennett et al. haben ein Bauteil mit Magneten im Inneren entwickelt, so dass das Material zusammenschnappt, wenn es platziert wird. Dadurch benötigen die Roboter keine hohe Präzision beim Platzieren der Bauteile. Die Bauteile finden von selbst ihren Platz, wenn sie nahe genug an ihrem endgültigen Standort liegen. Im realen Bauwesen hat ein solches maßgeschneidertes Material jedoch kaum eine Bedeutung.

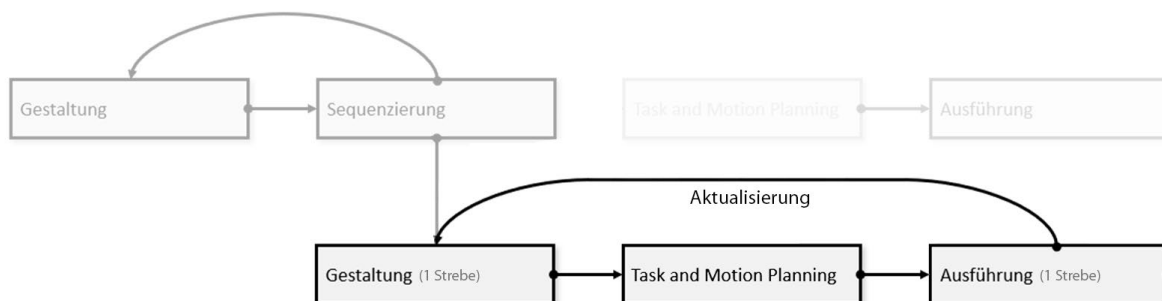
Beim Vergleich der digitalen und physischen Positionierung der Streben wurden bei der Konstruktion der Kastenplatte Toleranzen von 0 bis 7 [cm] festgestellt. Die Toleranzen nahmen zu, wenn die Streben am Ende des Aufbaus der Struktur platziert wurden. Dieser Toleranzbereich ist auf das im Rahmen der Untersuchung verwendete externe Nachführsystem zurückzuführen. Obwohl das Optitrack-System eine Genauigkeit von bis zu einem Millimeter aufweist, häufen sich die Toleranzen, wenn der Roboter eine neue Strebe aufnimmt, um sie in der Struktur zu platzieren (nach **Abbildung 51 A**). Jedes Mal, wenn die Strebe zwischen verschiedenen

²¹ https://www.kuka.com/en-se/company/press/news/2021/03/cybertech_maximised-for-accuracy-and-demanding-environments

Robotern weitergereicht wird, nehmen die Toleranzen zu. Gegen Ende des Bauwerks müssen die Roboter die Strebe noch öfter untereinander austauschen, wodurch sich die Toleranzen erhöhen.

Trotz dieser Toleranzen wurde der allgemeine Arbeitsablauf für die Erstellung des Bauwerks von **Abbildung 31** auf **Abbildung 61** aktualisiert, um keine Einbußen bei der Gesamtleistung des endgültigen Bauwerks hinnehmen zu müssen. Nach der anfänglichen *Gestaltung* und der *Sequenzierung* wird der Arbeitsablauf so aktualisiert, dass er eine Schleife für den Zusammenbau der Kastenplattenwerke in iterativer Abfolge von *Gestaltung*, *TAMP* und *Ausführung* darstellt. Die *Gestaltung* ist der Akt der Ausarbeitung der Platzierung der Streben. *TAMP* ist die Berechnung der Roboterbahnpläne für den Zusammenbau der Struktur, und die *Ausführung* ist die physische Montage mit den Robotern. Nachdem jede Strebe platziert wurde, beginnt der Arbeitsablauf von neuem. Nachdem eine Strebe platziert wurde, wird die *Gestaltung* also auf der Grundlage des Status der gebauten Struktur aktualisiert. Bei der durchgeführten Demonstration werden Gestaltungsentscheidungen ausschließlich auf der Grundlage der Präferenzen des Konstrukteurs getroffen; in Zukunft kann die *Gestaltung* jedoch durch strukturelles Feedback im Gestaltungsschritt weiter optimiert werden. Entsprechende Methoden wurden von Orozco et al. vorgestellt (2022).

Abbildung 61: Arbeitsablauf bei der Montage der Hohlkastendecke



In der zukünftigen Forschung gibt es zwei große Pläne zur Reduzierung der Abweichungen des verteilten Robotersystems. Das erste ist die Optimierung des TAMP der Struktur. Derzeit versucht der TAMP, die Montage zu lösen. Dabei wird oft nicht die optimale Lösung in Bezug auf die Anzahl der Aktionen erreicht, die die Roboteraktoren ausführen müssen. Bei der weiteren Untersuchung von KI-Methoden für die Roboterbahnplanung wird untersucht, wie oft die Strebe zwischen den Robotern hin- und herbewegt werden muss, was wiederum zu einer Verringerung der Toleranzen führt. Der zweite Ansatz zur Verringerung der Toleranzen wäre die Einführung lokaler Erfassungsmethoden, insbesondere an Bord des Roboters selbst. Dies könnte eine weitere Anpassung zwischen den Robotern ermöglichen, bevor die Strebe zwischen ihnen weitergegeben wird. Wenn die Roboter in der Lage sind, den richtigen Abstand zueinander zu berechnen und einzuhalten, wenn eine Strebe zwischen ihnen hindurchgeführt wird, können die Toleranzen erheblich verringert werden.

Robustheit

Industrieroboter gibt es seit den 1960er-Jahren in verschiedenen Formen. Im Laufe der Jahre ihrer Entwicklung sind sie robuster geworden, da große Unternehmen eine stabile Hardware- und Softwareintegration versprechen. Im Vergleich dazu werden verteilte Robotersysteme in der Regel individuell angefertigt. Sowohl die Software als auch die Hardware werden für jedes System weitgehend neu entwickelt. Dadurch sind sie fehleranfälliger als andere Systeme.

Der Vorteil verteilter Robotersysteme liegt jedoch in ihrer Multiplizierbarkeit, denn wenn eine Maschine einen Fehler macht oder ausfällt, kann eine andere Maschine ihren Platz einnehmen. Bei der Betrachtung des Kollektivs ergibt sich daher der Vorteil, dass das gesamte System weiterlaufen kann, wenn eine einzelne Maschine ausfällt.

Effizienz und Leistungsfähigkeit

Schließlich wird im Zusammenhang mit verteilten Robotersystemen häufig die Frage der Leistung diskutiert. In der Tat ist dies ein wichtiger Faktor bei der Montage von Gebäudekonstruktionen mit Teams aus kleinen Robotern. Dies war jedoch nicht der Schwerpunkt dieses Projekts und wäre vielmehr ein wichtiger Punkt, der in den nächsten Phasen der Arbeit berücksichtigt werden sollte.

Ein wichtiger Faktor, der ebenfalls in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden sollte, wäre die Zeit und damit die Energie, die für den Bau einer bestimmten Gebäudekonstruktion benötigt wird. In Anbetracht solcher Details kann die Planung der Gebäudekonstruktionen geändert werden, um das Aufladen der Roboter zu strategischen Zeitpunkten zu ermöglichen. Ein anderer Ansatz wäre, dass durch die Planung der Bewegungen des Roboters dieser während seines Einsatzes intelligent verkabelt werden könnte. Auf diese Weise würden die Roboter konstant mit Energie versorgt und müssten sich nicht um das Aufladen kümmern. Wenn keiner dieser Ansätze ausreicht, ist es auch möglich, die Gebäudekonstruktionen in kleinere Teile zu zerlegen, um der Energieproblematik Rechnung zu tragen.

Obwohl die für die Demonstration in diesem Projekt verwendeten Roboter über ein Kabel mit Strom versorgt wurden, wie auf einigen Fotos zu sehen ist, enthalten sie ein Akkupaket, das es ihnen ermöglicht, mit einer einzigen Akkuladung 18,5-21,8 Stunden bei kontinuierlicher Rotation zu laufen. Dies ist auf ein intelligentes mechanisches Design zurückzuführen, bei dem die Motoren des Roboters nicht ständig betätigt werden müssen, sodass die Roboter Energie speichern können. Obwohl ihr Betrieb durch die Batterie zeitlich begrenzt ist, können die Batterien wieder aufgeladen werden, damit sie weiterlaufen können.

Wie bereits im Hinblick auf die Kosten erläutert, ist der Gesamtenergiebedarf verteilter Robotersysteme im Vergleich zu Industrierobotern viel geringer. Sie arbeiten in niedrigeren Spannungsbereichen und benötigen im Allgemeinen weniger Strom für den Betrieb. Dies ist ein weiterer Vorteil verteilter Robotersysteme, insbesondere im Hinblick auf Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit.

Schlusswort

Verteilte Robotersysteme für den Bau würden eine radikale Veränderung in der Architekturpraxis erfordern. Das Ziel dieses Projekts bestand darin, zur Grundlagenforschung beizutragen, wie reale Architekturstrukturen mithilfe von Teams kleiner mobiler Roboter zusammengebaut werden könnten. Der Schwerpunkt lag insbesondere auf der Vorstellung potenzieller Holzbausysteme, die mit solchen Systemen errichtet werden könnten, sowie auf der Entwicklung von Methoden, die die zukünftige Integration verteilter Roboterbausysteme in die Industrie unterstützen würden. Im Folgenden werden die zu Beginn des Projekts festgelegten Erfolgsindikatoren zur Erreichung dieser Projektziele besprochen:

- *Das verteilte Robotersystem kann zielführend und in-situ zur Erstellung von Bauteilen und Baugruppen im Bereich des Holzbaus eingesetzt werden.*

Obwohl die meisten Forschungsarbeiten zu verteilten Robotersystemen unkonventionelle Materialien für den Gebäudebau verwenden, zeigt dieses Projekt, wie verteilte Robotersysteme reale Baumaterialien nutzen können, um tatsächlich Gebäude zu errichten. Konkret wird durch die Montage des endgültigen Demonstratorgebäudes veranschaulicht, wie kleine Roboter in Teams zusammenarbeiten können, um Holzkonstruktionen zu montieren, die wesentlich größer sind als die Roboter selbst.

Über die physische Demonstration hinaus gewährt das Projekt auch Einblicke in die Entwicklung verteilter Robotersysteme für den Holzbau. Es legt die grundlegenden Zusammenhänge dar, die bei der Entwicklung eines völlig neuen Automatisierungssystems für das Bauwesen entstehen. Durch die Darstellung dieser inhärenten Zusammenhänge wird ein Überblick über die zukünftige Forschung gegeben, um die erfolgreiche Implementierung verteilter Robotersysteme für den Holzbau voranzutreiben.

Es ist jedoch zu beachten, dass das im Rahmen dieses Projekts errichtete Demonstrationsgebäude in einer Fabrikumgebung zur Vorfertigung fertiggestellt wurde. Um eine solche Holzmontage auf der Baustelle umzusetzen, müssten das Robotersystem und die dazugehörigen Steuerungsalgorithmen weiterentwickelt werden, um den damit verbundenen größeren Unsicherheiten gerecht zu werden. Ein möglicher Ansatz zur Bauautomatisierung besteht darin, Fabriken vor Ort zu implementieren (Bock/Linner 2016). Wenn die Baustelle wie eine Fabrik aufgebaut ist, könnten die hier vorgestellten Forschungsergebnisse bereits für den Bau vor Ort genutzt werden.

- *Computermethoden für die Implementierung von verteilten Robotersystemen für Holzkonstruktionen wurden erfolgreich entwickelt.*

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Berechnungsmethoden entwickelt, um die Implementierung verteilter Robotersysteme für Holzkonstruktionen zu untersuchen. Die Methoden konzentrierten sich hauptsächlich auf die Entwicklung von Bautechniken sowie auf die Weiterentwicklung verteilter Robotersysteme im Bauwesen. Die wichtigsten vorgestellten Methoden umfassen die Erweiterung eines Code-Frameworks für den Datenaustausch zwischen Software, die mit verteilten Robotern arbeitet, eine Berechnungsmethode zur Analyse der Schraubenplatzierung zwischen zwei Holzelementen sowie allen Holzelementen in einer Holzkonstruktion, ein generatives Designwerkzeug für schichtbasierte Holzrahmenbinder und eine Berechnungspipeline zur Umwandlung architektonischer Entwürfe in robotergestützte Montageaufgaben, einschließlich der Methoden zur Zerlegung des Entwurfs in eine Sequenz von zu montierenden Holzelementen.

Ein weiterer wichtiger Beitrag im Rahmen dieser Forschung ist die Entwicklung eines Schraubeffektors, der es kleinen Maschinen ermöglicht, Holzstreben zu montieren. Obwohl dies keine Berechnungsmethode an sich ist, stellt es ein entscheidendes Werkzeug für die

Implementierung verteilter Robotersysteme im autonomem Holzbau dar. Ohne die Fähigkeit, Holzelemente autonom zu verbinden, wären die Einsatzmöglichkeiten verteilter Robotersysteme im Holzbau stark eingeschränkt. Daher ist die erfolgreiche Entwicklung des Schraubeffektors ein wichtiger Erfolg des Projekts.

■ *Das System erweist sich als lösbar, wiederverwendbar, sortenrein und funktionsangepasst.*

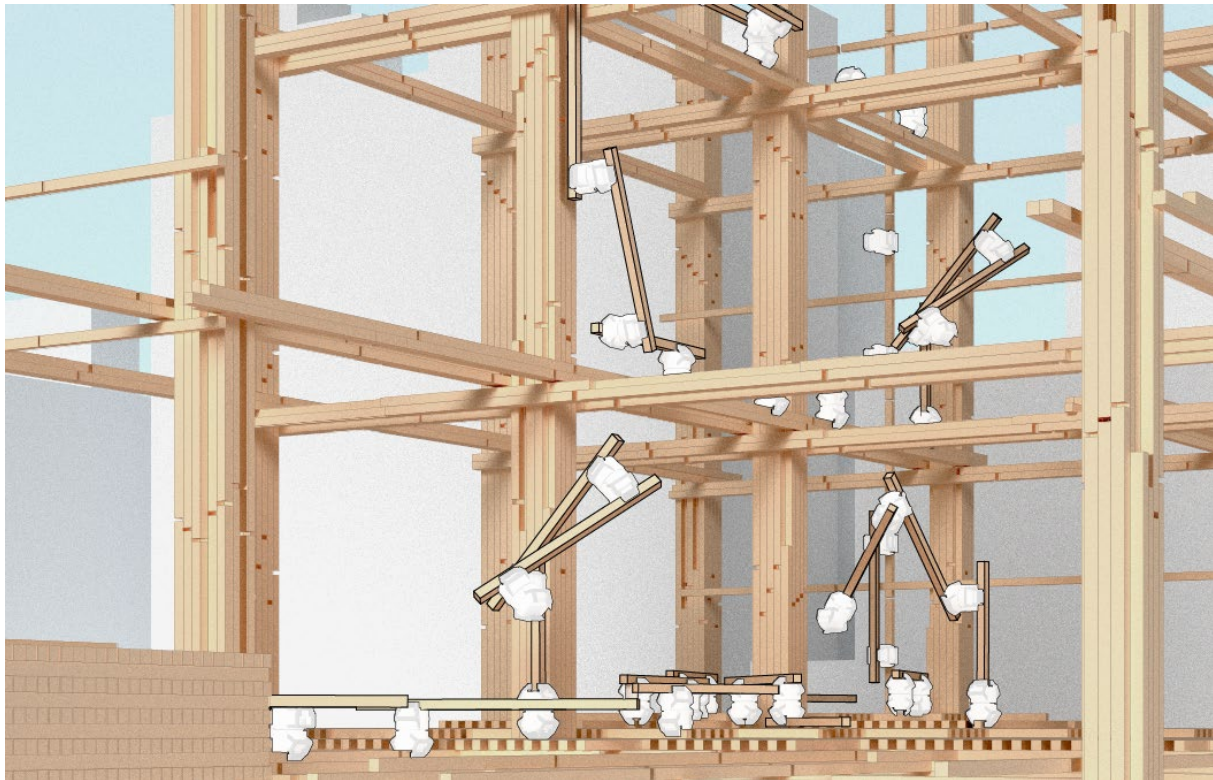
Die entwickelten Bauteile und Bauteilgruppen erfüllen die vorgegebenen Bewertungskriterien in unterschiedlichem Maße. Die Bauelemente sind vollständig abnehmbar, da sie durch Schraubverbindungen miteinander verbunden sind, was es ermöglicht, jedes Holzelement in eine Baugruppe einzufügen oder daraus zu lösen. Die Reihenfolge, in der dies geschieht, kann mithilfe der vorgestellten Methoden zur Sequenzierung einer Gebäudekonstruktion berücksichtigt werden.

Obwohl bisher nicht direkt angesprochen, sind die Holzelemente auch wiederverwendbar. Die für die Schraubenplatzierung entwickelten Methoden haben gezeigt, dass zwischen den Verbindungsbereichen zwischen Holzelementen eine große Anzahl von Schrauben verwendet werden kann. Untersuchungen anderer Institutionen haben gezeigt, dass Holzelemente wiederverwendet werden können, indem neue Anordnungen zwischen den Holzelementen bei ihrer Wiederverwendung geplant werden (Sandin et al. 2022). Um dieses Problem weiter anzugehen, sollten die Anzahl der in der vorgestellten Methode berechneten Schrauben schrittweise für die Wiederverwendung optimiert werden, wobei versucht wird, die Wiederverwendung jedes Elements möglichst gering zu halten. Dies sollte auch durch weitere Materialtests bestätigt werden, um zu zeigen, dass das Material nicht an Festigkeit verliert, wenn die Holzelemente wiederverwendet werden.

Auch die vorgestellten Baugruppen erfüllen die Bewertungskriterien, dass sie nur aus einem einzigen Material bestehen. Sie sind vollständig aus Holz gefertigt. Bei den Rahmenkonstruktionen kommt nur ein einziges Bauelement, nämlich Holzstreben, zum Einsatz und ist somit vollständig "sortenrein".

Durch die iterative und sequenzielle Zusammensetzbarkeit der Bauteilgruppen können diese funktional angepasst werden, während sie entstehen. Im Demonstrator wurde dies ausschließlich aus ästhetischen Gründen umgesetzt, wobei die Platzierung der Schubstege während des Zusammenbaus von einem Konstrukteur angepasst wurde. Um andere funktionale Anforderungen zu erfüllen, müssten weitere Analysen der Bauteilgruppen durchgeführt werden. Durch eine Strukturanalyse könnten beispielsweise Abweichungen von der geplanten Struktur im Montageprozess in späteren Montageschritten berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Rahmen der Forschung jedes dieser Kriterien angesprochen wird. Allerdings wären weitere Untersuchungen erforderlich, um einige davon vollständig zu beweisen.

Abbildung 62: Rendering eines Beispielgebäudes, das möglicherweise von einem verteilten Robotersystem montiert werden könnte

Weitere Forschungsrichtungen

Über die bereits erwähnten nächsten Schritte hinaus würden sich weitere Schritte aus diesem Projekt in zwei Bereiche gliedern. Der Erste besteht darin, weitere Strukturanalysen durchzuführen, um die vom Robotersystem erstellten Konstruktionen zu optimieren. Gegenwärtig sind die entworfenen Strukturen übermäßig redundant, um die Stabilität während des Zusammenbaus aufrechtzuerhalten und mit der Schwäche vieler Verbindungen umzugehen. Darüber hinaus ist diese Redundanz auch in den aktuellen Schraubenberechnungen enthalten, die darauf abzielen, die Anzahl der Schrauben in einer Verbindungszone zu maximieren, anstatt die Anzahl zu optimieren. Um materialeffizientere Strukturen zu entwickeln, wäre daher eine Analyse der Dauerhaftigkeit der Struktur in verschiedenen Stadien ihrer Montage erforderlich.

Ein weiterer direkter nächster Schritt aus dieser Forschung wäre die Weiterführung der Pipeline für den Entwurf einer Struktur bis hin zur Sequenzierung. Dies würde die Lösung der Kinematik und der Bewegungspfade erfordern, die für die Durchführung der verschiedenen Aktionen beim Zusammenbau erforderlich sind. Obwohl dies derzeit von verschiedenen Institutionen erforscht wird, besteht die Schwierigkeit darin, Aufgaben- und Bewegungsplaner für das Robotersystem zu erstellen, die für verschiedene Arten von Robotersystemen geeignet sind. Daher muss die Forschung in die Entwicklung von Planungstools investiert werden, die eine Anpassung an die Fortbewegungsfähigkeiten des Robotersystems ermöglichen.

Zusätzlich zu diesen beiden weiteren Forschungsrichtungen muss die Forschungsgemeinschaft, die solche Systeme erforscht und entwickelt, weiter wachsen, um verteilte robotische Bausysteme auf realen Baustellen zu sehen. Wie bereits erwähnt, gibt es noch viele andere Herausforderungen, einschließlich Hardware und Sensorik, um nur zwei Beispiele zu nennen, die nur in interdisziplinären Teams gelöst werden können. Durch die Darstellung der verschiedenen Beziehungen, die zwischen der Robotik- und der Bausystemseite bei der Entwicklung solcher Systeme bestehen, soll dieses Projekt als Ausgangspunkt für diese weitere Entwicklung dienen.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Leder, Samuel (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Kubail Kalousdian, Nicolas (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Menges, Achim (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Weitere Mitwirkende

Projektbegleiter

Schwinn, Tobias (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Teilnehmende wissenschaftliche Forscher

Bucklin, Oliver (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Kim, Hyun Gyu (Max Planck Institute for Intelligent Systems, Department of Physical Intelligence)

Kiesewetter, Laura (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Treml, Simon (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte

Durmaz, Eyse-Esin (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Lesch, Thomas (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Hildebrandt, Harrison (Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart)

Fachliche Betreuung

Dr. Jan Weckendorf

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

EXC 2120: Cluster of Excellence IntCDC – Integrative Computational Design and Construction for Architecture,
Keplerstraße 7, 70174 Stuttgart, Deutschland

Kurzbiographien



Samuel Leder

Samuel Leder ist Doktorand am Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) der Universität Stuttgart. Er ist ein Mitglied des EXC 2120: Exzellenzcluster IntCDC, wo sich seine Forschung auf maßgeschneiderte verteilte Robotersysteme für das Bauwesen konzentriert.



Nicolas Kubail Kalousdian

Nicolas Kubail Kalousdian ist Doktorand am Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) an der Universität Stuttgart. Er ist ein Mitglied des EXC 2120: Exzellenzcluster IntCDC, wo sich seine Forschung auf maschinelles Lernen und Robotik für autonome Bausysteme konzentriert.



Professor Achim Menges

Achim Menges ist eingetragener Architekt in Frankfurt und ordentlicher Professor an der Universität Stuttgart, wo er Gründungsdirektor des Instituts für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) und Leiter des Exzellenzclusters Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC) ist. Darüber hinaus war er Gastprofessor für Architektur an der Graduate School of Design der Harvard University und hatte mehrere andere Gastprofessuren in Europa und den Vereinigten Staaten inne. Er schloss sein Studium an der Architectural Association, AA School of Architecture in London mit Auszeichnung ab, wo er anschließend als Studio Master und Unit Master an der AA Graduate School und der AA Diploma School unterrichtete.

Der Schwerpunkt von Achim Menges' Praxis und Forschung liegt auf der Entwicklung von integrativem Design an der Schnittstelle von computergestützten Entwurfsmethoden, robotergestützter Fertigung und Konstruktion sowie modernen Material- und Bausystemen. Seine Arbeit basiert auf einem interdisziplinären Ansatz in Zusammenarbeit mit Bauingenieurwesen, Systemtechnik, Produktionstechnik, Informatik, Materialwissenschaften, Naturwissenschaften sowie Sozial- und Geisteswissenschaften. Er ist der Leiter des interdisziplinären Exzellenzclusters Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC). Ein Exzellenzcluster ist mit einer Förderdauer von zunächst sieben Jahren die bedeutendste und umfangreichste Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Zum ersten Mal wurde ein Exzellenzcluster für den Bereich Architektur vergeben.

Achim Menges hat mehrere Bücher über diese Arbeit und verwandte Bereiche der Designforschung veröffentlicht und ist Autor/Mitautor zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten und Artikel. Seine Projekte und Designforschungen wurden mit vielen internationalen Preisen ausgezeichnet, weltweit veröffentlicht und ausgestellt und sind Teil mehrerer renommierter Museumssammlungen, unter anderem der ständigen Sammlung des Centre Pompidou in Paris und des Victoria and Albert Museum in London.

Achim Menges ist Mitglied mehrerer internationaler Forschungsgremien (z. B. SNF Swiss National Fonds, ISF Israel Science Foundation, AVNUR Italienisches Ministerium für Bildung und Forschung, FCT Portugiesische Stiftung für Wissenschaft und Technologie) und Mitglied zahlreicher wissenschaftlicher Ausschüsse führender internationaler Fachzeitschriften und Konferenzen (z. B. z. B. TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment, IJAC International Journal of Architectural Computing, Architectural Design Journal, CAD Journal, ACADIA Association for Computer Aided Design in Architecture, AAG Advances in Architectural Geometry, ALGODE Algorithmic Design, FABRICATE Digital Fabrication in Architecture).

Literaturverzeichnis

Andreen, D., Jennings, P., Napp, N., & Petersen, K. (2016). Emergent structures assembled by large swarms of simple robots. *Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 54–61.

Anwar, N., Izhar, M. A., & Najam, F. A. (2018). Construction monitoring and reporting using drones and unmanned aerial vehicles (UAVs). In *The Tenth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-10)* (pp. 2-4).

Apolinarska, Aleksandra Anna, Bärtschi, Ralph, & Furrer, Reto. (2016). Mastering the “Sequential Roof” Computational Methods for Integrating Design, Structural Analysis, and Robotic Fabrication. *5th Advances in Architectural Geometry Symposium (AAG 2016)*, 240–258. https://doi.org/10.3218/3778-4_17

Augugliaro, F., Lupashin, S., Hamer, M., Male, C., Hehn, M., Mueller, M. W., Willmann, J. S., Gramazio, F., Kohler, M., & D’Andrea, R. (2014). The Flight Assembled Architecture installation: Cooperative construction with flying machines. *IEEE Control Systems Magazine*, 34(4), 46–64. <https://doi.org/10.1109/MCS.2014.2320359>

Augugliaro, F., Mirjan, A., Gramazio, F., Kohler, M., & D’Andrea, R. (2013). Building tensile structures with flying machines. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3487–3492. <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696853>

Barnett, N., Costenaro, D., & Rohmund, I. (2017). Direct and Indirect Impacts of Robots on Future Electricity Load. In *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*.

BHoMBot (2022). *Grasshopper_UI* [Source code]. https://github.com/BHoM/Grasshopper_UI

Bissig, D., & Frangi, A. (2022). Variantenstudium zur Entwicklung einer zweiachsig tragenden Hohlkastendecke aus Holz. *Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung+ Praxis*. Stuttgart, Germany: KE University of Stuttgart, 2022, pp. 1–9.

Bock T. , & Linner T. (2016). *Site Automation: Automated/Robotic On-site Factories*. Cambridge University Press.

BOSCH GMA 55 PROFESSIONAL. (2022). Bosch. Retrieved December 31, 2022, from <https://www.bosch-professional.com/de/de/products/gtb-18v-45-06019K7000>

BOSCH GTB 18V-45 PROFESSIONAL. (2022). Bosch Professional. Retrieved December 31, 2022, from <https://www.bosch-professional.com/de/de/products/gtb-18v-45-06019K7000>

Boston Dynamics (2022). Spot®. <https://www.bostondynamics.com/products/spot>

Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM). *International journal of project management*, 31(7), 971-980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>

- Bundy, A., & Wallen, L. (1984). Breadth-First Search. In: Bundy, A., Wallen, L. (eds) Catalogue of Artificial Intelligence Tools. Symbolic Computation. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-96868-6_25
- Chai, H., Wagner, H. J., Guo, Z., Qi, Y., Menges, A., & Yuan, P. F. (2022). Computational design and on-site mobile robotic construction of an adaptive reinforcement beam network for cross-laminated timber slab panels. *Automation in Construction*, 142, 104536. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104536>
- Cumincad. (2022). [Bibliographic Databases]. Cumincad. <https://papers.cumincad.org>
- DIN 4074-1:2012-06, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit_ - Teil_1: Nadelschnittholz. (2012). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1887004>
- DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren_ - Begriffe, Einteilung. (2003). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/9500683>
- DIN 18203-3:2008-08, Toleranzen im Hochbau_ - Teil_3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen. (2008). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1439129>
- DIN 68364:2003-05, Kennwerte von Holzarten_ - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten. (2003). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/9479339>
- DIN EN 338:2016-07, Bauholz für tragende Zwecke_ - Festigkeitsklassen; Deutsche Fassung EN_338:2016. (2016). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2463437>
- DIN EN 13556:2003-10, Rund- und Schnittholz_ - Nomenklatur der in Europa verwendeten Handelshölzer; Dreisprachige Fassung EN_13556:2003. (2003). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/9444492>
- DIN EN ISO 10209:2012-11, Technische Produktdokumentation_ - Vokabular_ - Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation (ISO_10209:2012); Dreisprachige Fassung EN_ISO_10209:2012. (2012). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1868609>
- DIN EN ISO 10209:2012-11, Technische Produktdokumentation_ - Vokabular_ - Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation (ISO_10209:2012); Dreisprachige Fassung EN_ISO_10209:2012. (2012). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1868609>
- Doumbouya, L., Gao, G., & Guan, C. (2016). Adoption of the Building Information Modeling (BIM) for construction project effectiveness: The review of BIM benefits. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4(3), 74-79. doi: 10.12691/ajcea-4-3-1
- Dynamo. (2022). Autodesk. <https://dynamobim.org/>
- Elshani, D., Lombardi, A., Fisher, A., Stabb, S., Hernandez, D., & Wortmann, T. (2022). Knowledge Graphs for Multidisciplinary Co-Design: Introducing RDF to BHoM. CEUR Workshop Proceedings. LDAC2022 - 10th Linked Data in Architecture and Construction Workshop, Hersonissos, Greece.

Elshani, D., Wortmann, T., & Stabb, S. (2022). Towards Better Co-Design with Disciplinary Ontologies: Review and Evaluation of Data Interoperability in the AEC Industry. CEUR Workshop Proceedings. LDAC2022 - 10th Linked Data in Architecture and Construction Workshop, Hersonissos, Greece.

Gil Pérez, M., Zechmeister, C., Kannenberg, F., Mindermann, P., Balangé, L., Guo, Y., Hügler, S., Gienger, A., Forster, D., Bischoff, M., Tarín, C., Middendorf, P., Schwieger, V., Gresser, G. T., Menges, A., & Knippers, J. (2022). Computational co-design framework for coreless wound fibre–polymer composite structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 9(2), 310–329. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab081>

Google Scholar. (2022). [Bibliographic Databases]. Google Scholar. <https://scholar.google.com>

Hauser, S., Mutlu, M., Léziart, P.-A., Khodr, H., Bernardino, A., & Ijspeert, A. J. (2020). Roombots extended: Challenges in the next generation of self-reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture. *Robotics and Autonomous Systems*, 127, 103467. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103467>

IBM (2021). Pass by reference (C++ only). Retrieved December 31, 2022, <https://www.ibm.com/docs/en/zos/2.4.0?topic=calls-pass-by-reference-c-only>

IntCDC. (2022). Four new large-scale robots for future building construction. Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture. Retrieved December 31, 2022, <https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/news/Four-new-large-scale-robots-for-future-building-construction-00001/>

Irawan, J., De Kestelier, X., Argyros, N., Lewis, B., & Gregson, S. (2020). A Reconfigurable Modular Swarm Robotic System for ISRU (In-Situ Resource Utilisation) Autonomous 3D Printing in Extreme Environments. In C. Gengnagel, O. Baverel, J. Burry, M. Ramsgaard Thomsen, & S. Weinzierl (Eds.), *Impact: Design With All Senses* (pp. 685–698). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29829-6_53

ISO 8373:2021Robotics — Vocabulary. (2021). <https://www.iso.org/standard/75539.html>

Jenett, B., Abdel-Rahman, A., Cheung, K., & Gershenfeld, N. (2019). Material–robot system for assembly of discrete cellular structures. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), 4019–4026. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2930486>

Jin, S., Maggs, S., Sadan, D., Nan, C., Jokić, S., & Novikov, P. (2013). Minibuilders. IAAC. <https://iaac.net/project/minibuilders/>

Kalousdian, N. K., Łochnicki, G., Hartmann, V. N., Leder, S., Oguz, O. S., Menges, A., & Toussaint, M. (2022). Learning Robotic Manipulation of Natural Materials With Variable Properties for Construction Tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 5749–5756. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3159288>

Kayser, M., Cai, L., Falcone, S., Bader, C., Inglessis, N., Darweesh, B., & Oxman, N. (2018). FIBERBOTS: an autonomous swarm-based robotic system for digital fabrication of fiber-based composites. *Construction Robotics*, 2(1–4), 67–79. <https://doi.org/10.1007/s41693-018-0013-y>

Kolb, J. (2008). *Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers* (DGfH - German Society of Wood Research & Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, Eds.). DE GRUYTER.
<https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8690-0>

Krtschil, A., Orozco, L., Wagner, H. J., Menges, A., & Knippers, J. (2022). Conceptual development and comparison of two punctually supported timber slab systems. *Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung + Praxis*. Stuttgart, Germany: KE University of Stuttgart, 2022, pp. 1–8.

Lauritzen, S. L., & Richardson, T. S. (2002). Chain graph models and their causal interpretations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 64(3), 321-348. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00340>

Leder, S., Kim, H., Sitti, M., & Menges, A. (2024). Enhanced co-design and evaluation of a collective robotic construction system for the assembly of large-scale in-plane timber structures. *Automation in Construction*, 162, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105390>

Leder, S., & Menges, A. (2024). Merging architectural design and robotic planning using interactive agent-based modelling for collective robotic construction. *Journal of Computational Design and Engineering*, 11(2) pp. 253–268. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwae028>

Leder, S., Kim, H., Oguz, O. S., Kubail Kalousdian, N., Hartmann, V. N., Menges, A., Toussaint, M., & Sitti, M. (2022). Leveraging Building Material as Part of the In-Plane Robotic Kinematic System for Collective Construction. *Advanced Science*, 9(24), 2201524. <https://doi.org/10.1002/advs.202201524>

Leder, S., Weber, R., Bucklin, O., Wood, D., & Menges, A. (2019). Distributed Robotic Timber Construction: Designing of in-situ timber construction system with robot-material collaboration. *Proceedings of Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. ACADIA, Austin, Texas, USA.

Li, Y., & Liu, C. (2019). Applications of multirotor drone technologies in construction management. *International Journal of Construction Management*, 19(5), 401-412.
<https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452101>

Lindsey, Q., Mellinger, D., & Kumar, V. (2012). Construction with quadrotor teams. *Autonomous Robots*, 33(3), 323–336. <https://doi.org/10.1007/s10514-012-9305-0>

Lugt, P. van der, & Harsta, A. (2020). *Tomorrow's timber: towards the next building revolution*. MaterialDistrict.

Luis, O., Krtschil, A., Wagner, H.-J., Simon, B., Amtsberg, F., Skoury, L., Knippers, J., & Menges, A. (2021). Design Methods for Variable Density, Multi-Directional Composite Timber Slab Systems for Multi-Storey Construction. 303–312. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.1.303>

Mark TwoTM. (2022). Markforged. Retrieved December 31, 2022, from <https://markforged.com/3d-printers/mark-two>

Maximised for accuracy and demanding environments. (2021). KUKA. https://www.kuka.com/en-se/company/press/news/2021/03/cybertech_maximised-for-accuracy-and-demanding-environments

Melenbrink, N., Werfel, J., & Menges, A. (2017). Towards Force-aware Robot Collectives for On-site Construction. ACADIA 2017: DISCIPLINES & DISRUPTION [Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2017.382>

Melenbrink, N., & Werfel, J. (2018). Local force cues for strength and stability in a distributed robotic construction system. *Swarm Intelligence*, 12, 129-153. <https://doi.org/10.1007/s11721-017-0149-2>

Melenbrink, N., Werfel, J., & Menges, A. (2020). On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. *Automation in construction*, 119, 103312. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103312>

Melenbrink, N., Rinderspacher, K., Menges, A., & Werfel, J. (2020). Autonomous anchoring for robotic construction. *Automation in Construction*, 120, 103391. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103391>

Menges, A., Schwinn, T., & Krieg, O. D. (Eds.). (2017). *Advancing wood architecture: a computational approach*. Routledge, Taylor & Francis Group.

Microsoft HoloLens (Version 2). (2016). [Windows Mixed Reality]. Microsoft. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

Mollica, Z., & Self, M. (2016). Tree Fork Truss. *Advances in Architectural Geometry 2016*, 138–153. <https://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016.html>

Multi-Storey Wood Building System | Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC) | University of Stuttgart. (2019). Retrieved November 29, 2022, from <https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/research/research-projects/rp-3/>

Napp, N., & Nagpal, R. (2014). Distributed Amorphous Ramp Construction in Unstructured Environments. In M. Ani Hsieh & G. Chirikjian (Eds.), *Distributed Autonomous Robotic Systems* (Vol. 104, pp. 105–119). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55146-8_8

Nigl, F., Li, S., Blum, J. E., & Lipson, H. (2013). Structure-Reconfiguring Robots: Autonomous Truss Reconfiguration and Manipulation. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20(3), 60–71. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2201579>

Onyx™. (2022). Markforged. Retrieved December 31, 2022, from <https://markforged.com/materials/plastics/onyx>

OptiTrack: Motion Capture Systems. (2022). OptiTrack. <https://optitrack.com/>

Orozco, L., Krtschil, A., Skoury, L., Knippers, J., & Menges, A. (2022). Arrangement of reinforcement in variable density timber slab systems for multi-story construction. *International Journal of Architectural Computing*, 20(4), 707-727. <https://doi.org/10.1177/14780771221135003>

Parker, L. E. (2000). Current State of the Art in Distributed Autonomous Mobile Robotics. In L. E. Parker, G. Bekey, & J. Barhen (Eds.), *Distributed Autonomous Robotic Systems 4* (pp. 3–12). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-67919-6_1

Parker, C., & Zhang, H. (2002). Robot collective construction by blind bulldozing. In *IEEE Conference on Systems, Cybernetics and Man* (pp. 177-195). <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1173385>

Parker, C. A., Zhang, H., & Kube, C. R. (2003). Blind bulldozing: Multiple robot nest construction. In *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*(Cat. No. 03CH37453) (Vol. 2, pp. 2010-2015). <https://doi.org/10.1109/IROS.2003.1248950>

Parker, C. A., & Zhang, H. (2006). Collective robotic site preparation. *Adaptive Behavior*, 14(1), 5-19. <https://doi.org/10.1177/105971230601400101>

Petersen, K. H., Napp, N., Stuart-Smith, R., Rus, D., & Kovac, M. (2019). A review of collective robotic construction. *Science Robotics*, 4(28), eaau8479. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aau8479>

Petersen, K., Nagpal, R., & Werfel, J. (2011). TERMES: An Autonomous Robotic System for Three-Dimensional Collective Construction. *Robotics: Science and Systems VII. Robotics: Science and Systems 2011*. <https://doi.org/10.15607/RSS.2011.VII.035>

Petrš, J., Dahy, H., & Florián, M. (2019). From MoleMOD to MoleSTRING Design of self-assembly structures actuated by shareable soft robots. *Blucher Design Proceedings*, 179–188. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_467

Poinet, P., Stefanescu, D., & Papadonikolaki, E. (2021). Collaborative Workflows and Version Control Through Open-Source and Distributed Common Data Environment. In E. Toledo Santos & S. Scheer (Eds.), *Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (Vol. 98, pp. 228–247). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_18

Revit. (2000). Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/revit/overview/>

Rhinoceros 3D (Rhino 7). (2022). [Computer software]. Robert McNeel & Associates. <https://www.rhino3d.com/>

Robotic Kinematic System for Parallel Construction | Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC) | University of Stuttgart. (2019). Retrieved November 29, 2022, from <https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/research/research-projects/rp-19/>

ROBOTIS XL430-W250. (2022). [E-Maual]. ROBOTIS XL430-W250. Retrieved December 31, 2022, from <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl430-w250/>

- Rutten, D. (2022). Grasshopper3d. <https://www.grasshopper3d.com/>
- Sandin, Y., Shotton, E., Cramer, M., Sandberg, K., Walsh, S. J., Östling, J., et al. (2022). Design of Timber Buildings for Deconstruction and Reuse—Three methods and five case studies. RISE Rapport. 2022
- SIA 265:2003 Timber Structures 2003. (2003). Swiss Society of Engineers and Architects. <https://doi.org/10.31030/1868609>
- Skoury, L., Amtsberg, F., Yang, X., Wagner, H. J., Menges, A., & Wortmann, T. (2023). A Framework for Managing Data in Multi-actor Fabrication Processes. In C. Gengnagel, O. Baverel, G. Betti, M. Popescu, M. R. Thomsen, & J. Wurm (Eds.), *Towards Radical Regeneration* (pp. 601–615). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13249-0_47.
- Saboia, M., Thangavelu, V., & Napp, N. (2019). Autonomous multi-material construction with a heterogeneous robot team. *Robotics and Autonomous Systems*, 121, 103239.
- Sustarevas, J., Tan, K. B., Gerber, D., Stuart-Smith, R., & Pawar, V. M. (2019). YouWasps: towards autonomous multi-robot mobile deposition for construction. In 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 2320–2327). <https://doi.org/10.1109/IROS40897.2019.8967766>.
- Svatoš-Ražnjević, H., Orozco, L., & Menges, A. (2022). Advanced timber construction industry: a review of 350 multi-storey timber projects from 2000–2021. *Buildings*, 12(4), 404. <https://doi.org/10.3390/buildings12040404>
- Terada, Y., & Murata, S. (2008). Automatic Modular Assembly System and its Distributed Control. *The International Journal of Robotics Research*, 27(3–4), 445–462. <https://doi.org/10.1177/0278364907085562>
- The Buildings and Habitats object Model (Version 3). (2007). [Computer software]. <https://github.com/BHoM>
- Toussaint, M. (2014). Newton methods for k-order markov constrained motion problems. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1407.0414>
- Toussaint, M. (2022). Rai [Source code]. <https://github.com/MarcToussaint/rai>
- Web of Science. (2022). [Bibliographic Databases]. Web of Science. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>
- Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A. A., Gramazio, F., & Kohler, M. (2016). Robotic timber construction — Expanding additive fabrication to new dimensions. *Automation in Construction*, 61, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.09.011>
- Wood Building Systems for Distributed Robotics | Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC) | University of Stuttgart. (2020). Retrieved November 29, 2022, from <https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/research/associated-projects/ap-14/>

Wood, D., Yablonina, M., Aflalo, M., Chen, J., Tahanzadeh, B., & Menges, A. (2019). Cyber Physical Macro Material as a UAV [re]Configurable Architectural System. In J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne, & T. Schork (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* (pp. 320–335). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2_25

Yablonina, M., & Menges, A. (2019). Towards the Development of Fabrication Machine Species for Filament Materials. In J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne, & T. Schork (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* (pp. 152–166). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2_12

Yang, X., Amtsberg, F., Skoury, L., Wagner, H. J., & Menges, A. (2022). Vizer, Facilitating Cyber-physical Workflows in Prefabrication through Augmented Reality. 141–150. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.141>

Yoon, Y., & Rus, D. (2007). Shady3D: A Robot that Climbs 3D Trusses. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4071–4076. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2007.364104>

Zhang, K., Chermprayong, P., Xiao, F., Tzoumanikas, D., Dams, B., Kay, S., et al. (2022). Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots. *Nature*, 609(7928), 709–717. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04988-4>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 350 Holzbau-Projekte, die zwischen 2000 und 2021 gebaut werden	9
Abbildung 2: Zwei Holzbauprojekte der Universität Stuttgart, die innovative Technologien in die Herstellungs- und/oder Konstruktionsprozesse des Holzbaus integrieren: ICD Sewn Timber Shell 2017 (oben links) und, livMatS Biomimetic Shell (oben rechts).	10
Abbildung 3: Ein Beispiel für ein verteiltes Robotersystem von Scallog, das in Lagereinrichtungen eingesetzt wird	11
Abbildung 4: Eine Sammlung von CRC-Projekten, bei denen eine Reihe von kleinen Robotern und verschiedene Baumaterialien zum Einsatz kommen.	12
Abbildung 5: Ein verteiltes Roboter-Konstruktionssystem, bei dem ein einachsiger Roboter die Baumaterialien für die Konstruktion nutzt und gleichzeitig Teil des kinematischen Robotersystems ist. Die linke Seite zeigt eine digitale Darstellung des Systemkonzepts und die rechte Seite ein Foto des echten Roboters. Der Roboter ist 138 (Tiefe) × 179 (Breite) × 309,5 (Höhe) [mm] groß, wenn beide Greifer geschlossen sind.	13
Abbildung 6: Fotosequenzen von der physischen Demonstration der <i>dynamische kinematische Ketten</i>	13
Abbildung 7: Charakterisierung bestehender Holzbausysteme auf verschiedenen Hierarchieebenen	20
Abbildung 8: Schematische Darstellung von Holzbausystemen: Blockbau(links), Fachwerkbau (Mitte links), Balloon-Frame (Mitte rechts) und Plattform-Frame (rechts)	21
Abbildung 9: Beispiele für Holzverbindungen im Holzrahmenbau	21
Abbildung 10: Konstruktionsprinzip für die Rahmenbauweise	22
Abbildung 11: Schematische Darstellung von Holzbausystemen: Skelettbau (links) und Massivholzbau (rechts)	23
Abbildung 12: Beispiel einer Free-form Konstruktion: Holzschalenkonstruktion vom ICD und dem Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart	24
Abbildung 13: Charakterisierung der Automatisierung im Holzbau: Roboterplattform als Schnittstelle zum Bausystem durch Aufgaben- und Bewegungsplanung (TAMP)	25
Abbildung 14: Mobiler Roboter für den Bambusbau (links), Drohne für die Montage von Cyber Physical Macro Material (Mitte) und Custom Material für die Montage durch einen individuellen Roboter (rechts)	27
Abbildung 15: Normen und Vorschriften für den Holzbau	30
Abbildung 16: Charakterisierung verteilter robotergestützter Konstruktionssysteme	31
Abbildung 17: Charakterisierung der Roboterparameter	31
Abbildung 18: Charakterisierung verteilter robotergestützter Konstruktionssysteme	33
Abbildung 19: Beschreibung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den verschiedenen Robotern und Materialien	37
Abbildung 20: Beschreibung der ersten und zweiten Beziehung (B1 & B2)	38
Abbildung 21: Beschreibung der dritten und vierten Beziehung (B3 & B4)	39
Abbildung 22: Visualisierung der sequentiellen Schichtung von Holzkonstruktionen	40
Abbildung 23: Custom Effektor für ein verteiltes Robotersystem, mit dem ein Roboter Holzelemente zusammenschrauben kann (oben). Er enthält zwei Aktoren. Der erste dreht die Schrauben und gibt Kraft in die	

Schraubrichtung (unten links und unten Mitte). Der zweite Aktuator schiebt das Schraubenmagazin vor, sodass nach dem Setzen der Schrauben neue Schrauben nachgeschoben werden (Unten rechts). 43

Abbildung 24: Foto eines Custom Effektor für ein verteiltes Robotersystem 45

Abbildung 25: Algorithmus für die Schraubenplatzierung zwischen zwei Elementen 47

Abbildung 26: Visualisierung des Algorithmus zur Schraubenplatzierung zwischen zwei Elementen: (A) Überlappungsbereich berechnen (B) Überlappungsbereich in Überlappungsparallelogramm umwandeln (C) Berechnung des Überlappungsgitters (D) Überprüfen, ob Schnittpunkte innerhalb der Überlappingsregion liegen. Die Faserrichtung verläuft parallel zur längeren Kante der Rechtecke. Zwei Ellipsen, eine rote und eine blaue, zeigen den Einflussbereich einer einzelnen Schraube an. Die Ellipsen basieren auf der Faserrichtung der Strebe, die farblich dazu passt. Keine zwei Schrauben können innerhalb einer einzigen Ellipse liegen. 47

Abbildung 27: Visualisierung der maximalen Schraubenplatzierung zwischen zwei Streben in verschiedenen Winkeln und Querschnitten. Der Querschnitt ist am unteren Rand der Bilder dargestellt. Die blauen Ellipsen zeigen den Versatz zwischen den Schrauben relativ zur Faserrichtung der oberen Strebe (derjenigen, die sich nicht dreht) und die roten Ellipsen für die andere Strebe. 49

Abbildung 28: Untersuchung der Auswirkungen der Schraubenplatzierung auf das Design des Effektors. Die Ellipse zeigt die erforderlichen Abstände zwischen den Schrauben in Bezug auf die Faserrichtung an, die in Längsrichtung des Holzelements verläuft. 50

Abbildung 29: Grafischer Überblick über das mit BHoM entwickelte benutzerdefinierte Objektmodell, das die Beziehungen zwischen den Objekten und ihren Eigenschaften zeigt. Rosa Kästchen zeigen Berechnungen an, die Teile des Modells informieren. 51

Abbildung 30: Beispiel für die Erstellung von Code zur Darstellung der Bauelemente einer Holzkonstruktion 51

Abbildung 31: Untersucher Arbeitsablauf vom Entwurf bis zur Ausführung. In den jeweiligen Phasen des Arbeitsablaufs wurden zwei Typologien untersucht, die mit unterschiedlichen Arten von Fabrikation verbunden sind und sich auf unterschiedliche Gebäudegruppentypologien beziehen. 53

Abbildung 32: Pipeline zur Umsetzung von architektonischen Entwürfen in eine geordnete Abfolge von Stützen und den dazugehörigen Roboteraufgaben, die für die Umsetzung des Entwurfs erforderlich sind 53

Abbildung 33: Übliche Rahmenkonstruktionen im Holzbau lassen sich in Dreiecke oder Rechtecke mit verschiedenen Arten von Diagonalen zerlegen 54

Abbildung 34: Kurvendarstellung eines Rahmens (oben), der auf drei verschiedene Arten aus Holzelementen zusammengesetzt ist 55

Abbildung 35: Schritte für den Übergang von einer Kurve zu den Schichten der Holzelemente 55

Abbildung 36: Beispiele für Rahmengeometrien unter Verwendung des entwickelten generativen Entwurfstools 56

Abbildung 37: Algorithmus zur Anpassung der Verbindungszonen, um sicherzustellen, dass sich die Schrauben zwischen verschiedenen Schichten auf derselben Strebe nicht überschneiden 57

Abbildung 38: Schraubenplatzierung in den Verbindungszonen zwischen den Streben in verschiedenen Traversenkonstruktionen 57

Abbildung 39: Beispiel für eine Konstruktion, die mit den entwickelten Tools für die Rahmenstrukturen und Schraubenplatzierung entworfen wurde 58

Abbildung 40: GenerateScene-Funktion, die die BHoM-Informationen aus einer json-Datei analysiert und eine objektorientierte Szene erstellt 60

Abbildung 41: Details zur ReadJSON-Funktion 61

Abbildung 42: Zeitplanungsfunktion	61
Abbildung 43: Grafische Ausgabe des Sequenzierungsprozesses eines geradlinigen Rahmens	63
Abbildung 44: Grafische Ausgabe des Sequenzierungsprozesses einer großen Rahmenstruktur	64
Abbildung 45: Hohlkastendecke auf linearen Stützen	66
Abbildung 46: Vergleich des ursprünglich geplanten Roboter-Automationssystems mit einem verteilten Robotersystem für die Montage von einer Hohlkastendecke	66
Abbildung 47: Verschiedene verteilte Robotersysteme für unterschiedliche Aufgaben im Hochbau: Verankerung (oben) und Überbau (uten)	67
Abbildung 48: AR-Integration bei der Konstruktion von Holzkonstruktionen. AR-Visualisierung auf der HoloLens (links) und ein Handwerker, der die HoloLens trägt, um mit einem Industrieroboterarm zusammenzuarbeiten (rechts).	74
Abbildung 49: Mögliche Baustellen der Zukunft mit verschiedenen verteilten Robotersystemen, die unterschiedliche Aufgaben im Gebäudebau erfüllen	76
Abbildung 50: Entwurf des endgültigen Demonstrationsobjekts: Gebäudegruppe aus 25 Scherstegen, die über eine 2,5 x 4 [m] große Grundplatte gelegt werden	78
Abbildung 51: Abfolge der Roboter für die Montage einer Strebe	79
Abbildung 52: Foto von der Montage des endgültigen Demonstrators	80
Abbildung 53: Foto des Ergebnisses der Demonstration	80
Abbildung 54: Fotoserie von der Montage des Demonstrators	81
Abbildung 55: Fotoserie von der Montage des Demonstrators mit aktualisierter Roboterhardware, eine zusätzliche Achse wurde hinzugefügt, um Toleranzen auszugleichen	82
Abbildung 56: Foto einer Rahmenstruktur mit verteiltem Robotersystem als Maßstab	83
Abbildung 57: Foto einer Rahmenstruktur, die von einem verteilten Robotersystem montiert werden kann	84
Abbildung 58: Foto der Vorderansicht des Bohreffektors. Ein Teil des Aluminiumrahmens wurde entfernt, um den inneren Mechanismus des Effektors zu sehen	85
Abbildung 59: Fotoserie aus Versuchen mit dem entwickelten Schraubeneffektor. Innerhalb der Serie werden zwei Schrauben gleichzeitig in die darunter liegende Strebe gebohrt.	86
Abbildung 60: Vergleich des Arbeitsbereichs verschiedener Roboter-Automatisierungssysteme bei der Montage desselben Holzbauelements	87
Abbildung 61: Arbeitsablauf bei der Montage der Hohlkastendecke	89
Abbildung 62: Rendering eines Beispielgebäudes, das möglicherweise von einem verteilten Robotersystem montiert werden könnte	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der bestehenden Forschung zu verteilten Robotersystemen	27
Tabelle 2: Normen und Vorschriften für bestimmte Holzwerkstoffarten	34
Tabelle 3: Begründung für den Ausschluss bestimmter Verbindungsarten für diese Untersuchung	42
Tabelle 4: Begründung für den Ausschluss bestimmter Arten des An- und Einpressens	42
Tabelle 5: Teileliste für den Custom Effektor	46
Tabelle 6: Normen und Vorschriften für bestimmte Holzwerkstoffarten	68