

Kompetenzzentrum für Baurobotik im Hochbau (CONSAS)

Förderkennzeichen 16SV8637

Alexander Kuhn¹, Jan Niklas Franzius¹, Dennis Möller¹, Norbert Pralle¹, Franziska Reich¹, René Hellmuth², Anne-Sophie Tombeil², Günter Wenzel², Thomas Linner³, Marc Schmailzl³, Rongbo Hu³, Thomas Bock³, Christophe Maufroy⁴, Verena Kopp⁴, Nico Bölke⁴ und Urban Daub⁴



¹Ed. Züblin AG

Albstadtweg 3
70567 Stuttgart

²Fraunhofer IAO

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

³Lehrstuhl für Baurealisierung und Baurobotik
der Technischen Universität München

Universitätsstraße 25
33615 Bielefeld

⁴Fraunhofer IPA

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

4.1 Ziele des Kompetenzzentrums

4.1.1 Hintergründe und Problemstellung

Die Bauindustrie hat eine Schlüsselfunktion im Hinblick auf zentrale gesellschaftliche Themen und Innovationsbereiche in Deutschland. Sie stellt die Basis dar für: smarte und resiliente Städte, effiziente Renovierung im Hinblick auf nachhaltige Gebäude, Lösung der Wohnraum- und Mietpreisproblematik, qualitativ hochwertige Krankenhäuser, Schulen, und Altenheime sowie dazu notwendige Maßnahmen im COVID-19-Kontext, etc. Die Digitalisierung und Automatisierung in der deutschen Bauindustrie verspricht sowohl für die mittelständischen Unternehmen dieser Industrie als auch für die vielfältige Landschaft an deutschen Technologieunternehmen enorme Chancen und Wettbewerbsvorteile im internationalen Kontext. Insbesondere die Assistenzrobotik für das Bauwesen bietet die Möglichkeit Deutschland zu einem Vorreiter zu machen und neue Berufsfelder und Arbeitsplätze zu erschließen. Assistenzrobotik für das Bauwesen erlaubt es über dringend notwendige Produktivitätssteigerungen hinaus Aspekte wie Qualität, Gesundheit am Arbeitsplatz, Nachhaltigkeit und Zirkularität integrativ zu adressieren. CONSAS wird diese Potenziale erschließen und die Grundlage für die Entwicklung der ersten, funktionierenden Wertschöpfungskette in diesem Bereich bilden.¹

Die Bauindustrie und insbesondere die deutsche Bauindustrie stellt aufgrund der mit ihr in Verbindung stehenden Arbeitsplätze, Wertschöpfungsketten und weiterer an der Bauwertschöpfungskette beteiligter Akteure eine der wichtigsten Industrien Europas dar. Dennoch gibt es kaum eine andere Industrie, in der noch ähnlich viel schwere, körperliche aber auch gleichzeitig gefährliche Arbeiten verrichtet werden, wie in der Bauindustrie. Hinzu kommen Schadstoffbelastungen durch giftige Dämpfe oder Feinstaubbelastung durch „Baustellenstaub“. Wenngleich sich die Arbeitssicherheitsvorkehrungen auf sehr hohem Niveau befinden, werden in kaum einer anderen Industrie noch ähnlich viele Tätigkeiten manuell verrichtet. Gleichzeitig steigen die Anforderungen durch einen höheren Montageanteil aufgrund größerer und komplexer

¹<https://www.rolandberger.com/en/Media/\Digitization-in-the-construction-sector.html>; FIEC, Construction Industry in Europe, 2019 Report <https://www.fiec.eu/library/publications/blabla>

Bauteile kontinuierlich. Die Folge ist ein früheres Ausscheiden aus dem Arbeitsleben durch die Schwere der körperlichen Arbeit – häufig mit negativen Gesundheitsfolgen. Ebenso wie andere physisch beanspruchende Branchen, beispielsweise die Pflegebranche, kämpft die Baubranche aktuell mit einem akuten Personal- und Fachkräftemangel, der sich durch den demographischen Wandel zukünftig noch verschärfen wird. Die hohe physische Belastung in Verbindung mit dem geringen Einsatz von Technologie zur Verbesserung von Faktoren wie Arbeitsumfeld, Arbeitsorganisation und Ergonomie ist einer der Hauptgründe für die mangelnde Attraktivität der vielfältigen Berufsbilder in der Bauindustrie bei jungen Leuten. Insofern ist der Bedarf und gleichzeitig auch das Potenzial für den Einsatz von Assistenzrobotik im Bausektor außerordentlich hoch.

Damit einher geht die Tatsache, dass die Bauindustrie eine der am wenigsten automatisierten Industrien ist². Bock (2007) konstatiert ein nur mäßiges Interesse an Baurobotik, einem forschungs- und entwicklungsintensiven Teil des zukünftigen Baugeschehens, und fürchtet sogar, dass langfristig der Markt an ausländische Konkurrenten verloren gehen wird.³ Zum einen fehlen in Deutschland für die Schaffung grundlegend neu konzipierter, flexibel automatisierter oder robotisierter Systeme und Prozesse bisher noch die wesentlichen Voraussetzungen. Zum anderen ist verglichen mit anderen Branchen eine ausgeprägte FuE-Tätigkeit bzw. eine wissenschaftliche Herangehensweise an Probleme historisch wenig bis gar nicht entwickelt. Herausforderungen werden *ad hoc* und im Einzelfall durch Bauleiter auf der Baustelle gelöst. Systematische und nachhaltige Problemlösungsansätze werden in der Regel nicht verfolgt. Jedes Bauwerk wird als Unikat gesehen: dieses „Projektdenken“ bremst die automatisierungsgerechte Strukturierung und Standardisierung von Bauprozessen, die für einen konsequenten Einsatz von Robotern auf der Baustelle notwendig wäre. Die gewerkeweise Vergabe von Bauleistungen an Nachunternehmer (NU) stellt ein weiteres Hemmnis für die Einführung von Baurobotik durch den Generalunternehmer (GU) dar: nicht nur Prozesse müssen neu entworfen auch die klassischen Geschäftsmodelle müssen in diesem Zusammenhang überdacht werden.

Neben den technischen und baukulturellen Faktoren stehen die wirtschaftlichen Belan-

²Gründe für die mangelnde Automatisierung am Bau wurden u. a. von Delgado et al. (2019) und Yahya et al. (2019) herausgearbeitet, ausführlicher bei Mahbub (2008).

³Bock (2007), S. 29.

ge. Auf Seiten der Bauunternehmer sind die hohen anfänglichen Investitionskosten und die nicht zwingende Notwendigkeit, die Produktivität zu verbessern, als wichtigste Hemmnisse zu nennen. Das Bauwesen ist eine Industrie mit geringen Gewinnmargen und hohem Risiko, deshalb ist die Einführung von innovativen und kostspieligen Technologien in der Praxis selten umsetzbar. Der unklare Nutzen, den ein Bauunternehmen aus der Robotisierung seiner Prozesse ziehen kann, ist ein weiterer bremsender Faktor. Aktuell stehen keine belastbaren Daten zur Verfügung, die belegen, dass der Einsatz von Robotern eine signifikante Kostenreduktion herbeiführt. Auf Seiten der Auftraggeber spielt die öffentliche Hand als größter Bauherr in den meisten industrialisierten Ländern eine entscheidende Rolle bei der Einführung neuer Technologien. Die derzeitige Ausschreibungspraxis, die den „niedrigsten Preis“ als wichtigstes Kriterium für die Vergabe von Projekten vorschreibt, stellt eine große Einschränkung für Innovationen dar. In einem hart umkämpften Markt neigen Bauunternehmen dazu, ihre Gewinnspannen aggressiv zu reduzieren, und die Möglichkeit neue Technologien einzuführen bleibt begrenzt. Erst mit den Instrumenten der digitalen Informationsverarbeitung hat in den letzten Jahren auch im Bauwesen ein Umdenken eingesetzt. Durch den zunehmenden Einsatz digitaler Tools und Methoden und v. a. durch die Möglichkeit Bauabläufe digital zu planen, reift das Bewusstsein, dass Prozesse automatisiert und standardisiert, und sich wiederholende Tätigkeiten auch von Robotern unterstützt werden können.

4.1.2 Gesamtziel des Kompetenzzentrums

Gesamtziel des Vorhabens ist die Erarbeitung eines systematischen, integrativen Ansatzes für den Einsatz von Assistenzrobotik auf Hochbaubaustellen unter Einbindung aller Akteure der Baurobotik. Durch systematisches Testen von bauspezifischen Roboterlösungen sollen strukturierte Erfahrungen mit der Anwendung von mobilen Roboterassistenten (Cobots) und bewegungsunterstützenden Robotern (Exoskelette) *in situ* auf der Baustelle gesammelt und grundlegende Vorbereitungen für deren flächendeckenden Einsatz geschaffen werden. Das Kompetenzzentrum CONSAS adressiert folgende Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte:

- Auswertung und Bewertung von Assistenzrobotern auf physische Entlastung, Ergonomie und Vermeidung gesundheitlicher Schäden bei den BaustellenmitarbeiterInnen,
- Integration von Assistenzrobotern in bestehende Bauprozesse bzw. Anpassung der Bauprozesse an neukonzipierte modellbasierte Roboterprozesse,
- Entwicklung von Use-Cases, Test-Szenarien, Metriken und Benchmarks für die qualitative Bewertung von Mensch-Roboter-Interaktionen (MRI) mit besonderem Fokus auf die Usability und User Experience der Nutzergruppen, die Funktionsfähigkeit und Aufgabenerfüllung im Baustellen-Kontext, sowie die ethischen, rechtlichen und sozialen Implikationen,
- Erhebung einer konsistenten Datenbasis zum Langzeiteinsatz von Assistenzrobotern auf Baustellen, sowie Auswertung aller erhobenen Daten und Bewertung von Assistenzrobotern auf deren Potenzial für Sicherheit, Gesundheitsschutz, Effizienz- und Qualitätssteigerung,
- Stakeholder-gerechte Aufbereitung der Ergebnisse, insbesondere detailliertes Feedback an Bauroboterhersteller in Bezug auf die erhobenen Anforderungen von Nutzern und Anwendungsgebiet, sowie auf identifiziertes Optimierungspotenzial,
- Entwicklung von Geschäftsmodellen und Dienstleistungen für Robotik-Einsätze im Hochbau,
- Entwicklung eines industrieorientierten Konzepts für die Integration von Baurobotik in Ausbildung, Weiterbildung und Lehre,
- Kontinuierlicher und praxisorientierter Transfer der Projektergebnisse zu Unternehmen der Bauindustrie inkl. Beratung bzgl. robotisierter Tätigkeiten am Bau, Demonstration, Aus- und Weiterbildungsangebote, zu den industriellen Entwicklern (branchenübergreifend) und Entscheidungsträgern,
- Kontinuierliche Weiterentwicklung und Nachjustierung der Leistungen des Kompetenzzentrums CONSAS als Ansprechpartner für alle Akteure der Baurobotik.

4.2 Stand der Wissenschaft und Technik

4.2.1 Automatisierung und Robotik im Bauwesen

Die ersten speziell für das Bauwesen bestimmten Roboter wurden in den 1970er Jahren in Japan entwickelt mit dem Ziel Qualität und Standardisierung zu erhöhen und dem damals schon vorherrschenden Arbeitskräftemangel entgegen zu wirken. Die Entwicklung der Automatisierung und Robotisierung in der Vorfertigung kann in direktem Zusammenhang mit dem erfolgreichen Einsatz von Robotern in anderen Fertigungsbranchen gesetzt werden. Erst die Einführung der großanlagentechnischen und vermarktungsorientierten Fertigungsverfahren, der Qualitätssteuerung und die Erkenntnis, dass die industrielle Produktion der Nachfrage entsprechende kundenindividuelle Produkte liefern muss, gewährleisten seit den achtziger Jahren eine konstante und auf den Kunden zugeschnittene Produktqualität.⁴ Automatisierte Off-Site-Vorfertigungssysteme umfassen *Building Component Manufacturing* (BCM)-Ansätze die Materialien (Beton, Ziegel, Holz, Stahl, etc.) und Low-Level-Komponenten in hochwertige Gebäudekomponenten umwandeln, bspw. können heute komplexe Betonfertigteile, Stahlträger, Holzbauteile, Wand-, Boden- oder Dachelemente weitestgehend automatisiert in Produktionshallen gefertigt werden. Dabei kommen vorwiegend sogenannte Roboterzellen zum Einsatz: diese industriellen Robotersysteme bleiben vom menschlichen Arbeitsraum getrennt und werden durch hochautomatisierte Prozessketten und Informationsflüsse gesteuert. Kollaborative Systeme (MRK) sind noch selten, weisen aber bspw. als Power Tool bei repetitiven Tätigkeiten ein großes Entlastungspotenzial für den Menschen auf.⁵ In *Large-Scale-Prefabrication* (LSP)-Ansätzen werden z. B. Gebäudemodule (vorgefertigte Bad- oder Küchenmodule) oder ganze Gebäudeeinhei-

⁴Die wissenschaftlichen Arbeiten von T. Bock und T. Linner 2012, 2015, 2015, 2016a, 2016b, 2019 (Institut für Baurealisierung und Baurobotik, TU München) bilden die Grundlage für das heutige Verständnis der Entwicklung von Automatisierung und Robotisierung im Bauwesen. Zukunftsweisende theoretische Arbeiten sowie systematische Auswertungen von Roboterapplikationen bereits in den 1970-1980er Jahren in Japan, sowie die Mitarbeit an Produktionssystemen in Europa, USA und Asien zeichnen die Forschungsarbeit des Institutes aus und fließen in diese Darstellung mit ein. Die Serie "Cambridge Handbooks in Construction Robotics" (2015-2019) bietet einen nahezu vollständigen Überblick zur Thematik. Eine Auswahl weiterer einschlägiger Publikationen ist im Literaturverzeichnis zu finden.

⁵Der Anteil kollaborativer Roboter im Verhältnis zur Gesamtmenge aller installierten Industrieroboter betrug im Jahr 2018 laut World Robotics Report der IFR (2019) lediglich 3,24 %. Das entspricht knapp 14.000 Einheiten weltweit. Siehe Brandstötter and Komenda (2020), S. 2-3.

ten in der Fabrik gefertigt und auf der Baustelle montiert. Auch in diesem Bereich gelten frühe japanische Entwicklungen als Impulsgeber.⁶ Der Erfolg der automatisierten Vorfertigung im Bauwesen kann zum einen auf die Gewährleistung hoher Qualitätsstandards in einer Produktion unter kontrollierten Bedingungen zurückgeführt werden; zum anderen birgt das Bauen mit vorgefertigten Gebäudekomponenten großes Optimierungspotenzial im Bauprozess: Planungssicherheit, schnelle Montagezeiten, genau kalkulierbare Zeit- und Ablaufpläne führen zu kürzeren Bauzeiten und somit zu wirtschaftlich interessanten Projekten. Momentan rückt die Digitale Fabrikation immer weiter in den Vordergrund: dieser Ansatz möchte die Lücke zwischen digitalen Technologien in der Planung und physischem Bauprozess schließen.⁷

Nachdem die ersten Versuche zur großindustriellen, automatisierten und robotisierten Vorfertigung von Systemhäusern in Japan erfolgreich durchgeführt wurden und sich die ersten Produkte auf dem Markt durchsetzen konnten, richtete der GU Shimizu 1975 in Tokio eine Forschungsgruppe für Baurobotik ein.⁸ Ziel war nicht mehr die bloße Verlagerung der komplexen Montage in eine Fabrik, sondern auch die Entwicklung von Systemen, welche vor Ort auf der Baustelle eingesetzt werden können. Der Fokus lag zunächst auf einfachen Systemen, sogenannte *single-task construction robots* (STCRs) die eine einzelne Tätigkeit in repetitiver Weise ausführen. Die Tatsache, dass STCRs aufgabenspezifisch arbeiten, machte sie zunächst sehr flexibel (sie konnten zusammen mit konventionellen Arbeitsprozessen eingesetzt werden und erforderten nicht, dass die gesamte Baustelle automatisiert werden muss), stellte aber auch ihre große Schwäche dar.⁹ Da sie in den meisten Fällen nicht in die vor- und nachgelagerten Bauprozesse integriert waren, was zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen erfordert und die parallele Ausführung von Arbeitsaufgaben von Menschen im gleichen Raum behindert, konnte keine maßgeblichen Produktionssteigerungen erreicht werden.

⁶z. B. Sekisui Heim (M1) kam in den 1970er auf den Markt. Abbildungen verfügbar unter: https://www.researchgate.net/figure/Sekisui-Heims-legendary-M1-was-the-first-prefabricated-housing-model-which-reached-an_fig1_235271549

⁷Einen Überblick zum internationalen Stand der Technik des 3D-Drucks in Bauwesen bieten Perkins and Skitmore (2015) sowie Tay et al. (2017). Zusammenfassend Melenbrink et al. (2020), S. 12-14.

⁸Neben den Arbeiten von Bock & Kinner gibt Yoshida (2006) einen guten Überblick zu den Entwicklungen von Baurobotern in japanischen Unternehmen.

⁹Bock and Linner (2015), S. 115-116.

Die Auswertung dieser ersten Generationen von Baustellenrobotern führte zu teilweise gegensätzlichen Ansätzen und Entwicklungen. Um die oben genannten Herausforderungen anzugehen, wurden Konzepte für durchgängig automatisierte Hochbaustellen entworfen, deren Hauptziel die Integration von STCRs in eine fabrikähnliche Baustellenumgebung war. Anfang der 1990er Jahre wurden bereits zwei Prototypen in Japan erfolgreich umgesetzt.¹⁰ Einige Unternehmen konnten in den letzten Jahren integrierte, automatisierte Hochbausysteme auf Experimentalbaustellen realisieren. Die meisten Systeme basieren auf einer Stahlskelettbau-Konstruktion, an der sich ein automatisiertes Arbeitsgeschoss als vertikal bewegende Fabrik gleichsam nach oben arbeitet.¹¹ In diesem Zusammenhang können auch verschiedene Entwicklungen im Bereich der Montage von tragenden Bauelementen erwähnt werden. Im automatisierten Mauerwerksbau leistete das australische Unternehmen *Fastbrick Robotics* mit dem autonomen Hadrian X Pionierarbeit.¹² Andere Hersteller setzen auf kollaborierende Systeme: der MULE 135 vom US-Unternehmen *Construction Robotics* ist als Allzweck- und Präzisionsverlängerungsarm so konzipiert, dass er mit dem menschlichen Maurer zusammenarbeitet.¹³ Jüngste Forschungsansätze entwickeln vollautonome, kommunizierende Robotergruppen, die ohne jegliche zentrale Steuerung in der Lage sind, Bauelemente zu transportieren und zu montieren. Basierend auf Prinzipien der Schwarmintelligenz bauen im Projekt TERMES von Termiten inspirierte Kletterroboter selbstständig Strukturen auf Schaumstoffsteinen auf.¹⁴ Auch autonome Fahrzeuge und Drohnen werden zunehmend relevant im Bauwesen vorwiegend in den Bereichen (Baustellen)-Logistik, schwere Baumaschinen, Zustandserfassung und Überwachung.¹⁵ Parallel wurde die Entwicklung von Service- und Assistenzrobotern vorangetrieben, die im letzten Jahrzehnt von Fortschritten in den Kommunikation- und Informationstechnologien, insbesondere in den Bereichen der Datenhaltung und

¹⁰SMART-System (Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology) von Shimizu. Siehe Yamazaki and Maeda (1998).

¹¹Melenbrink et al. (2020), S. 7-9.

¹²Melenbrink et al. (2020), S. 9-10. <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x>

¹³<https://www.construction-robotics.com/mule/>

¹⁴<https://www.seas.harvard.edu/news/2014/02/robotic-construction-crew-needs-no-foreman>. Weitere Ansätze bei Petersen et al. 2019.

¹⁵Melenbrink et al. (2020), S. 2-7; Delgado et al. (2019), S. 2-3. Markreife Systeme werden bspw. von Volvo (<https://www.volvoce.com/united-states/en-us/about-us/news/2017/volvo-ce-unveils-the-next-generation-of-its-electric-load-carrier-concept/>) oder BuiltRobotics (<https://www.builtrobotics.com/>) angeboten.

-verarbeitung, der Interaktions- und der Autonomiefähigkeit profitieren konnte. In Zusammenarbeit mit dem norwegischen Startup nLink hat Hilti im Jahr 2020 den Jaibot auf den Markt gebracht. Seit 2018 sorgt das israelische Start Up Okibo mit seinem Mal- bzw. Putzroboter für Aufsehen.¹⁶

Neben mobilen Roboterassistenten werden im letzten Jahrzehnt zunehmend körpergetragene Assistenzsysteme, auch industrielle Exoskelette genannt, für die Unterstützung von Bauarbeitern bei schweren körperlichen Arbeiten eingesetzt. Dabei gibt es *passive* Exoskelette, bei denen die inhärente Spannung des Materials bzw. der Konstruktion (Feder) bionisch unterstützt und *aktive* Exoskelette, bei denen Elektromotoren die körperlichen Fähigkeiten des Menschen erweitern.¹⁷ Bis auf wenige Ausnahmen, wie das Guardian XO der US-Firma Sarcos¹⁸, sind industrielle Exoskelette für die Unterstützung von bestimmten Körperpartien (wie der Hüft- und Rückenbereich, der Schulter- und Armbereich und der Handbereich) konzipiert und damit auch für die Unterstützung von spezifischen Tätigkeiten bestimmt. In den letzten Jahren konnte das Potenzial von Systemen zur Reduktion körperlicher Belastungen, die den Träger bei Tätigkeiten wie Überkopfarbeiten oder beim Heben von Lasten unterstützen, in zahlreichen Studien bewiesen werden.¹⁹ Obwohl die meisten kommerziellen Exoskelett-Systeme noch passiv sind,²⁰ treten vermehrt Firmen mit aktiven Exoskelett-Systemen auf dem Markt auf, insb. für die Unterstützung des Hüft- und Rückenbereiches (das Cray X der deutschen Firma German Bionic Systems²¹ und das Exoback der französischen Firma RB3D²² sind dabei zwei prominente Beispiele). Die Entwicklung von aktiven Exoskeletten für die Unterstützung des Schulter- und Armbereiches, für die noch keine kommerzielle Lösung existiert, ist Gegenstand zahlreicher aktueller und vor kurzem abgeschlossener Forschungsprojekte, davon einige in Deutschland.²³ Obwohl die meisten

¹⁶<https://www.hilti.de/content/hilti/E3/DE/de/engineering/news-and-reference/s/semi-autonomer-baustellenroboter-jaibot.html>; <https://okibo.com/>; Siehe ab S. 17 eine ausführliche Darstellung dieser Roboter.

¹⁷Nussbaum et al. 2019.

¹⁸<https://www.sarcos.com/products/guardian-xo-powered-exoskeleton/>

¹⁹siehe z.B. Theurel & Desbrosses, 2019.

²⁰<https://exoskeletonreport.com/>

²¹<https://www.germanbionic.com/en/cray-x-solution/>

²²<https://www.rb3d.com/en/exosquelettes/exoback>

²³<https://www.interaktive-technologien.de/projekte/powergrasp>; <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/exopflege>; <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/leviaktor>.

Exoskelett-Systeme in verschiedenen Anwendungen und Branchen eingesetzt werden können, sind einige besonders für die Baubranche bestimmt, wie das Fraco Exoskelett²⁴ für Mauerarbeiten von der kanadischen Firma Mawashi und das Exopush von RB3D²⁵ für das Nivellement von den Bodenflächen mit einem Rechen. Mit sehr hohen Prävalenzraten muskuloskelettaler Symptome²⁶ besteht in der Baubranche ein hohes Potenzial für den Einsatz von Exoskeletten neben herkömmlichen Robotikansätzen, was beispielsweise die vor kurzem angekündigte Partnerschaft zwischen den Firmen Hilti und Ottobock zur Entwicklung von Exoskelett-Systemen für Bau-Anwendungen bestätigt.²⁷

4.2.2 Begriffsbestimmung

„Roboter für Assistenzfunktionen“²⁸ umfassen ein weites Feld an robotischen Systemen, deren Gestalt, Anwendungsbereiche und Interaktionsformen vielfältig sind. Trotz einiger bekannter Klassifikationsansätze gibt es bisher keine allgemeingültige Taxonomie. Ein vielgenutzter Ansatz ist die Interaktionsklassifikation, wobei die Interaktionsform Mensch-Roboter deutlich aussagekräftiger ist als die vom Menschen eingenommene Interaktionsrolle²⁹. Unterschieden wird zwischen Kollaboration, Kooperation und Koexistenz³⁰. Bei der Koexistenz treffen Mensch und Roboter episodisch aufeinander, verfolgen jedoch kein gemeinsames Arbeitsziel. Die Interaktion beschränkt sich auf die Vermeidung von Kollisionen. Im Gegensatz zur Koexistenz beschreiben Kooperation und Kollaboration echte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. Bei der Kooperation wird auf ein übergeordnetes gemeinsames Ziel hingearbeitet, die Handlungen sind aber nicht direkt voneinander abhängig. Die Kollaboration beschreibt die engste Interaktionsform: im gleichen Arbeitsraum verfolgen Mensch und Kollaborationsroboter (*Cobot*) eine gemeinsame Zielstellung und verrichten Teilaufgaben gemeinsam. Je nach

²⁴<https://www.fraco.com/en/exoskeleton>

²⁵<https://www.rb3d.com/en/exosquelettes/exopush>

²⁶Umer et al. 2018.

²⁷https://www.hilti.group/content/hilti/CP/XX/en/company/media-relations/media-releases/HILTI_OTTOBOCK.html

²⁸Entsprechend der Bekanntmachung Banz AT 27.01.2020 B4, S. 1.

²⁹Rollenbeschreibung nach Scholtz 2002: der Mensch kann Supervisor, Operateur, Kollaborateur, Kooperator oder Nicht-Beteiligter sein. Diese Rollen spiegeln sich jedoch in den Interaktionsformen wider und hängen auch vom Level der Autonomie des Roboters ab (siehe unten S. 4)

³⁰Onnasch et al. (2016). Siehe auch: Yanco and Drury (2002).

Anwendungsszenario sind sowohl kooperierende als auch kollaborierende robotische Assistenzsysteme auf der Baustelle denkbar. Der Autonomiegrad (LoA: Level of Autonomy) eines robotischen Systems trägt ebenfalls zu dessen Charakterisierung bei. Der LoA bestimmt den Grad der Intervention durch den Menschen³¹: vier Stufen von „gering“ bis „hoch“ beschreiben die Fähigkeit der Informationsaufnahme, der Informationsanalyse, der Entscheidungsauswahl und der Handlungsführung.³² Die Mobilität ist ein weiteres, entscheidendes Merkmal für den Einsatz von Assistenzrobotern auf der Baustelle, welches durch den laufenden Baufortschritt sich ständig verändert und daher für stationäre Systeme ungeeignet scheint. Von Vorteil sind im Baustellenkontext auch eine gewisse Robustheit bei der Navigation und Manipulation, der Lokalisierung, der Umgebungs- und Objekterkennung sowie der Bahnplanung. In Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 13482:2014³³ soll daher in diesem Projekt für Assistenzroboter folgende zusammenfassende Definition angewandt werden: „Mobile Roboterassistenten (Cobots) oder bewegungsunterstützende Roboter (Exoskelette) sind teilautonome Systeme, welche in Kooperation bzw. Kollaboration den Menschen bei Tätigkeiten auf der Baustelle unterstützen.“

4.2.3 Innovationshöhe und Innovationseffekt

Ein Kompetenzzentrum für Assistenzrobotik im Hochbau gibt es nach aktuellem Wissensstand in Deutschland noch nicht und auch im internationalen Vergleich ist es mit ähnlichen Randbedingungen bzgl. des Vorhandenseins technologie- und produktionsnaher Akteure nur an ganz wenigen Orten weltweit realisierbar. Das Kompetenzzentrum wäre somit ein Pilot für den gesamten Bausektor. Alleinstellungsmerkmal des Projektes ist die Erprobung von robotischen Assistenzsystemen, deren grundlegende Entwicklung abgeschlossen ist, in der Bauproduktion auf realen Baustellen. In diesem Punkt unterscheidet sich CONSAS grundlegend vom Center Construction Robotics (CCR) der RWTH³⁴ Aachen, das die Entwicklung neuer Systeme und deren erste Einsätze im Reallabor erprobt. Der Fokus des CCR liegt zurzeit auf der Schließung der digitalen Kette im Bauwesen, von Planung bis zur Realisierung, und kann somit nicht mit den

³¹Onnasch et al. (2016), S. 7.

³²Melenbrink et al. (2020), S. 14.

³³DIN EN ISO 13482:2014, S. 7.

³⁴<https://construction-robotics.de/>

Forschungsschwerpunkten von CONSAS gleichgestellt werden. Um von Beginn an gewährleisten zu können, dass das Vorhaben eine nachhaltige und tragfähige Initiative darstellt, soll das Vorhaben von Anfang an so konzipiert sein, dass es jederzeit bundesweit skalierbar ist und alle relevanten Stakeholder mit einbezieht. Ausgangspunkt für die Konzeptionierung des Kompetenzzentrums ist also der Gedanke eines langfristigen, über eine mögliche Förderdauer hinausgehenden Konzepts, um Baurobotik für den Industriestandort Deutschland attraktiv zu gestalten. Aus Literaturrecherchen und basierend auf den eigenen Erkenntnissen von Baustellen im europäischen Raum sind uns keine anderen Ergebnisse bekannt, die über den aufgezeigten Forschungsstand hinausgehen. Es sind gleichzeitig keine Unternehmen im europäischen Raum bekannt, die flächendeckend und systematisch Roboter zur Unterstützung des Baustellenpersonals einsetzen. Ebenso wurde bisher in den existierenden wissenschaftlichen Ansätzen kaum auf vermeintliche Randfaktoren eingegangen wie u. a. Akzeptanz und User Experience oder Arbeitsabläufe und -Prozesse.

4.2.4 Technische und wirtschaftliche Risiken

Bei der Anwendung von Assistenzrobotik im Hochbau bestehen technische und wirtschaftliche Risiken auf ganz unterschiedlichen Ebenen. Zunächst ist die technische Funktionsfähigkeit, die Aufgabenerfüllung und die Qualität der Mensch-Roboter-Interaktionen bei bauspezifischen Roboterlösungen aufgrund des in der Vergangenheit seltenen Einsatzes auf Baustellen wenig erprobt und daher mit einem großen Risiko behaftet. Diese von der Maschine ausgehenden technischen Risiken haben einen direkten Einfluss auf die Bewertung der MitarbeiterInnen von Qualität und Produktivität des Robotereinsatzes, was sich in der Nutzerakzeptanz widerspiegelt. Der systematische Einsatz von Assistenzsystemen auf Baustellen setzt auch eine Anpassung bzw. eine Umgestaltung der Bauprozesse voraus. Eine große Herausforderung besteht in der Anpassung der neu konzipierten Roboterprozesse an das komplexe Baustellenumfeld (u. a. wechselnder Untergrund, Unter- und Obergeschosse, Hindernisse durch Materiallagerung oder Abfälle, Staub, Feuchtigkeit, große Temperaturunterschiede), an die hohe Interdisziplinarität der Gewerke, an Abläufe und Taktung und natürlich an die Anforderungen der MitarbeiterInnen. Auch die Anbindung an die Bauplanung, welche eminent wichtig für die Automatisierung der Bauprozesse ist, birgt technische Risiken

bspw. in Bezug auf die Schnittstellen zum BIM³⁵-Modell in der Planung. Je nach Ausprägung der robotisierten Unterstützung kann sich ein erhöhter Planungsaufwand ergeben. Defizitäre Planungen hätten eine noch größere Auswirkung auf den ganzen Bauprozess als bisher, da durch die neu geschaffenen Verknüpfungen der Prozesse auch neue Abhängigkeiten entstehen. Hier sind große Ansprüche an den Entwurf eines effizienten und praxisnahen Bauprozesses gesetzt.

Durch die Einbindung aller Akteure in die Definition Robotisierungs-relevanter Gewerke und Tätigkeiten, den Entwurf von Anwendungsszenarien sowie eine umfassende Erhebung der Nutzerbedarfe möchte CONSAS diesen technischen Risiken vorbeugen und die Akzeptanz der Nutzergruppe fördern. Die Schaffung allgemeiner Bewertungskriterien, die iterativ durch die Auswertung zahlreicher Baustelleneinsätze verbessert werden, soll das technische aber auch das wirtschaftliche Risiko für den Einsatz von Assistenzrobotik weiter minimiert werden. Wirtschaftliche Risiken bestehen durch die hohen anfänglichen Investitionskosten für den Erwerb von Assistenzrobotern und der Gefahr keine eindeutige Qualitäts- und Effizienzsteigerung zu erreichen. Die unter wachsendem Termin- und Kostendruck stehenden Verantwortlichen auf den Baustellen, lassen nur Lösungen zu, die eine sehr klare Kosten/Nutzen-Gesamtbilanz haben und welche die Anforderungen der BaumarbeiterInnen vollständig erfüllen. Die Roboterprozesse müssen einen spürbaren Mehrwert gegenüber „manuellen“ Tätigkeiten aufweisen und sich unter den harten Bedingungen auf der Baustelle bewähren. Ein weiteres erhebliches Risiko für den systematischen Einsatz von Assistenzrobotern auf Baustellen sowie für den Erfolg des Kompetenzzentrums CONSAS als Ganzes ist die Adaptierung bzw. die Neuentwicklung von Geschäftsmodellen, die das heute übliche Zusammenspiel von GU und NUs miteinbeziehen, ohne das Interesse handwerklicher Betriebe und KMUs für Baurobotik zu beeinträchtigen. Auch die Skalierbarkeit der Ergebnisse und der Transfer sind von dieser Problematik direkt betroffen. Durch einen starken Fokus auf Geschäftsmodellentwicklung, einem innovationsorientierten Stakeholdermanagement und kontinuierlicher Kommunikation- und Transferleistungen soll diesen Hemmnissen entgegengewirkt werden.

³⁵Building Information Modelling (BIM) ist keine Software, sondern eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und ausgetauscht werden. BIM ist das zentrale Bindeglied zwischen Planung, Bauausführung und Betrieb eines Gebäudes.

4.3 Ergebnisse der Machbarkeitsstudie, wissenschaftliche und technische Methoden des Forschungsvorhabens

Die zwischen März und Juli 2021 durchgeführte Machbarkeitsstudie verfolgte das Ziel das Konzept eines Kompetenzzentrums für Assistenzrobotik am Bau wissenschaftlich zu überprüfen, die methodischen Herangehensweisen zu validieren und die Arbeitsziele der Umsetzungsphase qualitativ und quantitativ abzustecken. Grundlage der Studie war eine Analyse der im Hochbau aufkommenden Gewerke und Tätigkeiten zum einen auf deren gesundheitliche und körperliche Belastung, zum anderen auf das technische und wirtschaftliche Einsatzpotenzial von Assistenzrobotern auf der Baustelle. Anhand von Belastungsanalysen einzelner Tätigkeiten konnten Profile erstellt werden, die Aufschluss über den Grad der physischen Belastung der MitarbeiterInnen geben und den Bedarf nach ergonomischen oder assistierenden Lösungen verdeutlichen (4.3.1). Für Assistenzrobotik prädestinierte Gewerke und Tätigkeiten konnten in einer Matrix zusammengetragen (4.3.2.1 und Abb. 4.5) werden, die als Übersicht und Rahmen für die langfristig angelegten Erprobungsstudien in der Umsetzungsphase dienen. Die Integration der Assistenzroboter in die Bauprozesse ist eine wichtige Voraussetzung für deren Einsatz auf der Baustelle: die methodische Grundlage hierfür bilden die Prozessdarstellung und der modellbasierte Roboterprozess (4.3.2.2); erste Einsätze auf der Baustelle konnten erfolgen (4.3.2.3). Methodische Überlegungen zu ethischen, rechtlichen und sozialen Implikationen des Einsatzes von Assistenzroboter basieren auf Ergebnisse erster Umfragen von Anwendern auf den Pilotbaustellen (4.3.3). Schließlich beschreibt 4.3.4 mit dem in der Machbarkeitsstudie entwickelten Onion-Modell das geplante Business-Ecosystem rund um Assistenzrobotik am Bau.

4.3.1 Belastungsanalysen

In die Analyse der Belastung auf den Bewegungsapparat wurden zwei Großbaustellen im Raum Stuttgart einbezogen, bei denen vielseitige Tätigkeiten verschiedener Gewerke untersucht werden konnten. Jeweils zwei Ergonomie-Experten des Fraunhofer IPA statteten die BaustellenmitarbeiterInnen mit einem Inertialsensor basierten körpergetragenen Motion Capture System (Xsens AWINDA) aus, um die Bewegungsabläufe unter realen Bedingungen auf der Baustelle zu erfassen. Anschließend wurden diese

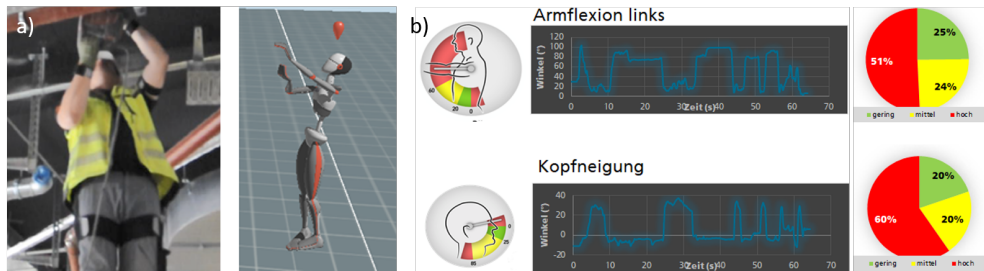


Abbildung 4.1: a) Baustellenmitarbeiter beim Vorbereiten der Elektrik (links). b) Darstellung des Avatars aus Xsens MVN (rechts). Über eine typische Bewegungssequenz von ca. 65 Sek. zeigt sich eine auffällige Überstreckung des Nackens (unten) über knapp 80 % der Zeit (60 % der Zeit im roten Bereich). Ebenfalls auffällig das Anheben der Arme über 75 % des gelben bzw. roten Grenzbereichs (oben) (Darstellung aus Industrial Athlete by scalefit UG).

Bewegungsdaten, mit separater Betrachtung aller großen Gelenke, nach arbeitswissenschaftlichen, orthopädischen und sportwissenschaftlichen Prinzipien ergonomisch bewertet. Als Grenzwerte für die Bewegungsausmaße wurden die Grenzbereiche und Farbkodierung der DGUV zur Erfassung und Bewertung manueller Arbeitsprozesse angewendet³⁶ (vgl. Abb. ?? Kreisdarstellungen). Bei der Analyse wurden mit dem Messsystem die Tätigkeiten (1) Vorbereitung der Elektrik und (2) Legen von Kabeltrassen, (3) Kabel ziehen und befestigen, (4) Abtrennen von Überständen der Hängestiele, (5) Umsetzen und Bewegen von Kabeltrommeln sowie in einem separaten Gewerk (6) Estrich verlegen erfasst und anschließend untersucht. Beispielhaft sollen nun Auszüge aus der ergonomischen Betrachtung des ersten Anwendungsfalls dargestellt werden: (1) Vorbereitung der Elektrik. Die Tätigkeiten umfassen Bohren, Hämmern und das Montieren durch Einsetzen in Klemmen, vorwiegend im Überkopfniveau, über langanhaltende Sequenzen von teilweise mehreren Minuten (nach DGUV gelten Haltungen ab einer Dauer >4 Sekunden als statisch).

³⁶IFA: Bewertung physischer Belastungen gemäß DGUV-Information 208-033 (bisher: BGI/GUV-I 7011) (Anhang 3). Internet: http://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/ergonomie/pdf/bewertung_physischer_belastungen.pdf

Die statische Beanspruchung ist für die Schulter-, Arm-, und Nacken-Muskulatur sehr belastend. Eine besondere Herausforderung ergibt sich auch dadurch, dass in dieser für die Muskulatur auf Dauer nur schwer kompensierbaren Haltung, feinmotorische Arbeiten zur erfolgreichen Durchführung der Tätigkeit erforderlich sind. Die Haltung lässt auf die Kompression von Wirbelsegmenten, insbesondere im Nacken und Lendenbereich schließen. Im darauffolgenden Arbeitsschritt, dem Verlegen von Kabeltrassen (2) und Kabelziehen (3) zeigt sich ein ähnliches Bild der haltungsbedingt belasteten Bereiche. Darüber hinaus müssen die Arbeitenden zum Befestigen die Gewichte der Kabel, der Kabeltrassen (ca. 15 kg) und deren Aufnehmer (bis zu 10 kg) aufnehmen und über Kopf montieren. Auch beim (4) Trennschleifen von Überständen muss das Zusatzgewicht des Trennschleifers mit angehoben und gehalten werden. Diese Tätigkeiten verbindet eine statisch ungünstige Körperhaltung, bei der eine durchaus feinmotorische Aufgabe, teilweise mit einem Zusatzgewicht durchgeführt werden muss. Die Kombination ist als ergonomisch höchst anspruchsvoll und stark belastend einzustufen. Beim Estrich Verlegen zeigen sich andere ergonomische Auffälligkeiten. Hier ist es vielmehr die dauerhaft gekniete Haltung mit vorgeneigtem, häufig nur teilweise abgestütztem Oberkörper, was zu einer gesteigerten Belastung der Bandscheiben der Lendenwirbelsäule führt.³⁷ Neben der Betrachtung der Grenzwerte der DGUV muss hier insbesondere auch die permanente Druckbelastung auf die Kniegelenke beachtet werden, welche ein erhöhtes Arthrosiserisiko darstellt.³⁸ Weitere Tätigkeiten, wie das Umsetzen von Kabeltrommeln, beinhalten hohe Gewichte, die täglich bewegt werden müssen und zu Überbeanspruchungen führen.

Die daraus resultierenden Muskel-Skelett-Erkrankungen treten besonders häufig auf.³⁹ Hervorzuheben sind hier die Rückenschmerzen unter Bauarbeitern.^{40, 41, 42} Sowohl die

³⁷Merkblatt zu der Berufskrankheit Nr. 2108 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung (BKV) „Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch langjähriges Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch langjährige Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung, die zur Unterlassung aller Tätigkeiten gezwungen haben, die für die Entstehung, die Verschlimmerung oder das Wiederaufleben der Krankheit ursächlich waren oder sein können“.

³⁸Merkblatt zur Berufskrankheit Nummer 2112 „Gonarthrose durch eine Tätigkeit im Knien oder vergleichbare Kniebelastung mit einer kumulativen Einwirkungsdauer während des Arbeitslebens von mindestens 13.000 Stunden und einer Mindesteinwirkungsdauer von insgesamt einer Stunde pro Schicht“ Bek. des BMAS vom 30.12. 2009 – IVa 4-45222-2112 - GMBI 5/6/2010, S. 98 ff.

³⁹Di Wang et al. 2015, p. 4015008.

⁴⁰Boschman et al. 2012, p. 196.

⁴¹Rothenbacher et al. 1997, p. 1481-1486.

⁴²Ulmer et al. 2018, p. 125-144.



Abbildung 4.2: a) Baustellenmitarbeiter beim Verlegen von Estrich (links), Darstellung des Avatars aus Xsens MVN (rechts). b) In einer aufgezeichneten, beispielhaften Bewegungssequenz von ca. 130 Sek. ist der Rumpf 85 % der Zeit in einer vorgeneigten Haltung. Die Kniegelenke sind in der meisten Zeit mehr als 90° angewinkelt. Darüber hinaus besteht ein hoher Druck auf die Kniegelenke (Darstellung aus Industrial Athlete by scalefit UG). c) Baustellenmitarbeiter beim Umsetzen einer Kabeltrommel. Im Beispiel ist kein Kabel mehr aufgerollt

überstreckte Haltung bei Überkopfarbeiten als auch die Haltung beim Estrichlegen oder die hohen Gewichte bei Nebentätigkeiten sind hierfür klar identifizierte Risikofaktoren. Aber auch die auffällig statische Belastung und die gehäuften Überkopf-Tätigkeiten, mit hohen Gewichten, sind deutliche Belastungsmerkmale und klare Indizien für die vielfältigen Ursachen der hohen Krankheitszahlen in der Baubranche. Die dargestellte, mit Messtechnik unterstützte Methode der ergonomischen Untersuchung, konnte somit relevante Merkmale identifizieren und liefert quantitative Bewertungskriterien für die

Ergonomie. Sie kann im Projekt eingesetzt werden, um besonders kritische Tätigkeiten zu priorisieren. Zur Bewertung und dem Benchmarking des ergonomischen Effektes der Roboter für Assistenzfunktionen werden weitere biomechanische Messtechnologien eingesetzt.

4.3.2 Grundlagen für die Integration in die Bauprozesse

4.3.2.1 Bauproduktion und Gewerke-Tätigkeiten-Matrix

Die Anwendung von robotischen Assistenzsystemen auf der Baustelle hängt stark von deren Integration in die komplexen Bauprozesse ab. Faktisch ist der Roboter nur während der Bauproduktion (Abb. 4.3), der eigentlichen, ortgebundenen Herstellung des Gebäudes, im Einsatz.

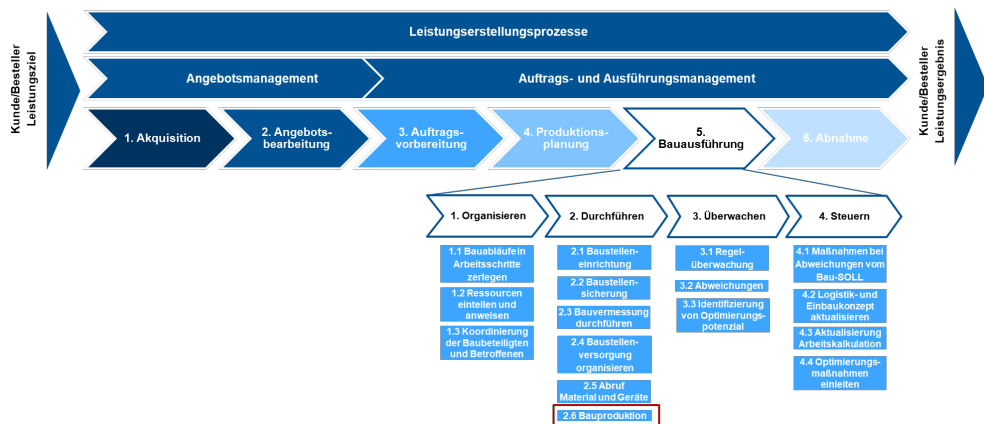


Abbildung 4.3: Darstellung des IST-Prozesses

Doch auch sämtliche vor- und nachgelagerte Organisations- (1.) Durchführungs- (2.1.-2.5.), Überwachungs- (3.) und Steuerungsabläufe (4.), die für die Bauausführung (5.) notwendig sind, sind direkt oder indirekt betroffen. Auch die digitalen Planungsprozesse (4.) müssen auf den Robotereinsatz abgestimmt werden. Die Bauproduktion ist konventionell in Gewerke aufgeteilt, die eine spezifische Bauleistung oder Teilaufgaben einer Bauleistung beschreiben, z. B. Trockenbau, Malerarbeiten. Ein Gewerk ist meist geschäftsfeldbezogen und erfordert eine berufliche Spezialisierung (Elektriker, Sanitär besser Sanitärtechniker oder Heizungsmonteur oder Klempner, Trockenbauer, etc.).

Entsprechend dem Bauablauf sind die Gewerke und die ausführenden NUs eingetaktet. Um Robotik auf der Baustelle erfolgreich einsetzen zu können, müssen die Gewerke auf die Tätigkeiten, d. h. auf spezifische Aktionen (z. B. Bohren, Streichen etc.), welche der Roboter ausführen bzw. unterstützen kann, heruntergebrochen werden. Um einen Bezug zu Tätigkeiten herzustellen, ist eine Gewerke-Tätigkeiten-Matrix (siehe Abb. 4.5) in Zusammenarbeit mit Bauleitern erarbeitet worden. In dieser Darstellung wird deutlich, dass die meisten Gewerke ähnliche oder sogar deckungsgleiche Tätigkeiten, wie bohren, schneiden/fräsen, vermessen, etc. aufweisen und das Einsatzpotenzial für Assistenzrobotik im Hochbau entsprechend hoch ist.

4.3.2.2 Prozessdarstellung und modellbasierte Roboterprozesse

Die Prozessdarstellung bietet die Möglichkeit eine chronologische Abfolge von Tätigkeiten in einem übergeordneten Geschäftsprozess zu beschreiben. Die Darstellung hilft Abläufe anschaulich und eindeutig zu dokumentieren, sodass ein tieferes Verständnis von Tätigkeiten, Funktionen, Rollen, aber auch Schnittstellen geschaffen werden kann. Die Prozessdarstellung kann Schwachstellen aufdecken, Optimierungspotenziale aufzeigen, zu einem hohen Qualitätsniveau beitragen, Zertifizierungen für Normen unterstützen und letztendlich im Prozess Kosteneinsparungen transparent darstellen. Basierend auf der Prozessdarstellung kann dann die Auswirkung von Veränderungen etwaiger Prozessparameter analysiert, getestet und evaluiert werden. Ausgangspunkt der Prozessdarstellung in CONSAS ist ein definierter Anwendungsfall (bestehend aus einem Gewerk und einer Tätigkeit). Die Prozessdarstellung folgt einem linearen Schema und gliedert sich in Prozesskisten. Sie beginnt mit der Aufstellung der Prozessebenen in der Ist-Prozess Hierarchie – ein integrativer Ansatz, der bestehende Strukturen aufnimmt und Umbrüche zunächst vermeidet. Anschließend folgt die Darstellung der Ist-Prozesse ohne und mit Roboter, um den heutigen Stand als Ausgangslage zu beschreiben. Danach kommt die Prozessanalyse der Ist-Prozesse, welche der Identifikation struktureller Erfordernisse und bestehender Innovationshemmnisse (z. B. Gemeinsamkeiten in den Prozessebenen wie gleiche Endeffektoren oder Kinematiken) dient. Durch diese Informationssynthese kann eine Bewertung der Ist-Prozesse und des Innovations- und Effizienzpotenzials erfolgen. Anschließend wird der Soll-Prozess für die Anwendung eines Roboters auf der Baustelle abgeleitet und damit Wissenslücken

identifiziert und zielgerichtet adressiert.

Der Roboterprozess (siehe Beispiel Abb. 4.6) beschreibt den Ablauf (mehrere Vorgänge in einer geplanten Reihenfolge), den ein Roboter auf der Baustelle erfährt und veranschaulicht den Maschinenablauf, d. h. die kinematische Kette des Roboters, um eine bestimmte Tätigkeit auszuführen. Der Informationsprozess beschreibt den Informationstransfer zwischen den verschiedenen Aktionen des Roboters. Gibt es Veränderungen im Informationsprozess, ändert sich der Ablauf und die Roboterkonfiguration, und umgekehrt. Dieser Prozess bildet die unterste Prozessebene und ist integraler Bestandteil jeder Roboterhandlung: der Roboter muss für jede auszuführende Tätigkeit eine explizite Information bekommen, wohingegen der Baustellenarbeiter implizit handelt und mehrere Tätigkeiten ohne zusätzliche Informationen ausführt. Der Prozessdarstellung folgt eine modellbasierte Vorvalidierung des jeweiligen Roboters auf seinen Anwendungsfall hin. Mit den Parametern des Assistenzrobotersystems und den vorhandenen Planungsdaten (z. B. BIM-Gebäudedaten) können die Arbeitsprozesse erprobt und validiert werden. Hierbei werden sowohl die Systemgeometrie und die kinematischen Eigenschaften als auch die Versorgungsinfrastruktur berücksichtigt. Idealerweise sollen die Produktionsdaten der Robotersysteme direkt mit den BIM-Modellen verknüpft und abgeglichen werden. Diese Methodik soll während der Umsetzungsphase für jedes System angewandt und iterativ nach jeder Testphase optimiert werden.

4.3.2.3 Einsatzfähige Robotersysteme und erste Baustellentests

Das Potenzial, Tätigkeiten der Bauproduktion zu automatisieren bzw. den Menschen durch robotische Systeme zu unterstützen, ist im letzten Jahrzehnt weltweit von Entwicklern und Herstellern erkannt und entsprechend umgesetzt worden. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie CONSAS ist von der TU München eine ausführliche Recherche zu marktreifen Assistenzrobotern bzw. vielversprechenden Prototypen durchgeführt worden. Aufschlussreiche Ergebnisse von zwei Robotereinsätzen auf Baustellen sollen hier exemplarisch skizziert werden.

Bereits 2019 ist der Bohrroboter „Jaibot“, der in Zusammenarbeit zwischen Hilti und dem norwegischen Startup nLink entwickelt wurde, als Prototyp am Bauvorhaben

„Office V“ in Stuttgart-Vaihingen zum Einsatz gekommen (siehe Abb. 4.6). Der mobile und semi-autonome Roboter ist speziell für Deckenbohrungen und Überkopfarbeiten konzipiert. Mit Hilfe der mitgelieferten Totalstation werden die Vermessungspunkte genau bestimmt und dienen gleichzeitig dem Jaibot zur Orientierung im Objekt. Idealerweise werden die entsprechenden Daten durch das BIM-Modell bereitgestellt – dieser Schritt konnte bei den 2019 durchgeführten Tests nicht durchgeführt werden. Als positiv wurde die Zeiteinsparung beim Messen und Bohren sowie die hohe Präzision bei der Ausführung und dem Setzen von Dübeln bewertet. Die Entlastung und Vorbeugung gesundheitlicher Schäden und Unfällen bei Überkopfarbeiten waren den MitarbeiterInnen des NU offenkundig. Die zusätzliche Vermeidung der Belastung durch Bohrstaub wurde als sehr vorteilhaft angesehen. Logistische Herausforderungen entstehen wiederum durch die Größe und das Gewicht des Jaibot: nicht alle Bauabschnitte sind zugänglich, Hohlraumböden sind bspw. nicht befahrbar und das Vorhandensein von Aufzügen ist eine Voraussetzung. Bei einem Kostenvergleich zwischen konventionellem Bohren mit Totalstation und dem Bohren mit Roboter erweist sich der Einsatz des Jaibots nur unter bestimmten Bedingungen als wirtschaftlich.⁴³ Im April/Mai 2021 wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Okibo Ltd ein Malerroboter zwei Wochen lang intensiv am Projekt „EWB Alleenstraße“ in Esslingen getestet (siehe Abb. 4.4), indem in Kellerräumen sowie auf Tiefgaragenwände, -decken und -stützen Farbe aufgetragen wurde. Mittels Fernsteuerung wird der Roboter vor der zu bearbeitenden Wand platziert. Eine Reinigung und Befeuchtung des Bodenbereichs vor den Wänden wird empfohlen, um Staubaufwirbelungen während des Sprühvorgangs zu vermeiden. Dann beginnt der Roboter mit dem Scannen und Erstellen eines Raummodells und berechnet seine eigenen Produktionsdaten. Der anschließende Farbauftrag und das Verfahren im Raum erfolgen vollautomatisiert. Dabei erkennt der Roboter auch Aussparungen für Fenster und Türen und sprüht in diesen Bereichen keine Farbe. Der Testeinsatz hat gezeigt, dass der Roboter sich insbesondere auf größeren Flächen (lange Wände einer Tiefgarage, große und einfach geschnittene Räume) bewährt.

Hierbei werden gleichwertige Aufwandswerte wie bei einer manuellen Bearbeitung

⁴³3,58 EUR pro Loch (Bohren mit Totalstation); 4,94 EUR pro Loch (Bohren mit Roboter, Tagesmiete, 1-Schichtbetrieb); 3,96 EUR (Bohren mit Roboter, Flottenmanagement 36 Mo., 1-Schichtbetrieb); 3,77 EUR (Bohren mit Roboter, Tagesmiete, 2-Schichtbetrieb); 3,02 EUR (Bohren mit Roboter, Flottenmanagement 36 Mo., 2-Schichtbetrieb).



Abbildung 4.4: Einsatz des Bohrroboters Jaibot, BVH „Office V“, Stuttgart-Vaihingen (links) und des Malerroboters von Okibo, BVH „EWB Alleenstraße“, Esslingen (Mitte); Produktionsdaten des Malerroboters Okibo (rechts): Fotos: Ed. Züblin AG

mit einem Farbsprühgerät erzielt. Schwierigkeiten hat der Roboter dagegen bei kleineren Flächen und Nischen, da hierbei das Wenden aus platztechnischen Gründen schwierig ist und viel Zeit in Anspruch nimmt. Außerdem ist der Transport des Roboters zwischen einzelnen Etagen ohne Kran und Aufzug aufgrund des Gewichts schwierig. Die Qualität des Farbauftrags ist hingegen sehr gut. Dies bestätigten auch Vertreter des Farbherstellers sowie Maler-NUs vor Ort. Die vom Hersteller angestrebte Funktionserweiterung Auftragen und Bearbeiten von Putz und weitere Tests der Malertätigkeiten könnten in der Umsetzungsphase von CONSAS vertieften Studien unterzogen werden.

Gewerke	Rohbau					Ausbau			TGA		Fassade		Bauwerkserhaltung (Hochbau)										
	Beton/ Schalung	Bewehrung	Mauerwerk	Abbruch	Grund- leistungen	Trocken- bau	Türen/ Estrich	Doppel- boden	Putz	Maler- arbeiten	Beschich- tung	Trassen	Großgeräte	Element- fassade	PR- Fassade	Fenster	Aufheben/ Abbruch	Stützen	Beschich- tung	Spritzbeton	Bewehrung	Trassen	
1. Ausheben																							
2. Verputzen																							
3. Kleben																							
4. Einbau																							
5. Halten/Fixieren																							
6. Strömen																							
7. Fräsen																							
8. Lamellen kleben																							
9. Bohren																							
10. Hochdruckwasser- strahlen																							
11. Schweißen																							
12. Schweissen																							
13. Transport																							
14. Streichen																							
15. Vermessen																							
16. Gießen																							
17. Trennen/Sägen																							

robotische Anwendung grundsätzlich möglich mit Potenzial für mehr Sicherheit und Gesundheitsschutz

BIM

robotische Anwendung mit Verknüpfung an die Planung mit BIM möglich

Ef

Potenzial für Effizienzsteigerung

Q

Potenzial für Qualitätssteigerung

Abbildung 4.5: Gewerke-Tätigkeiten-Matrix mit Legende

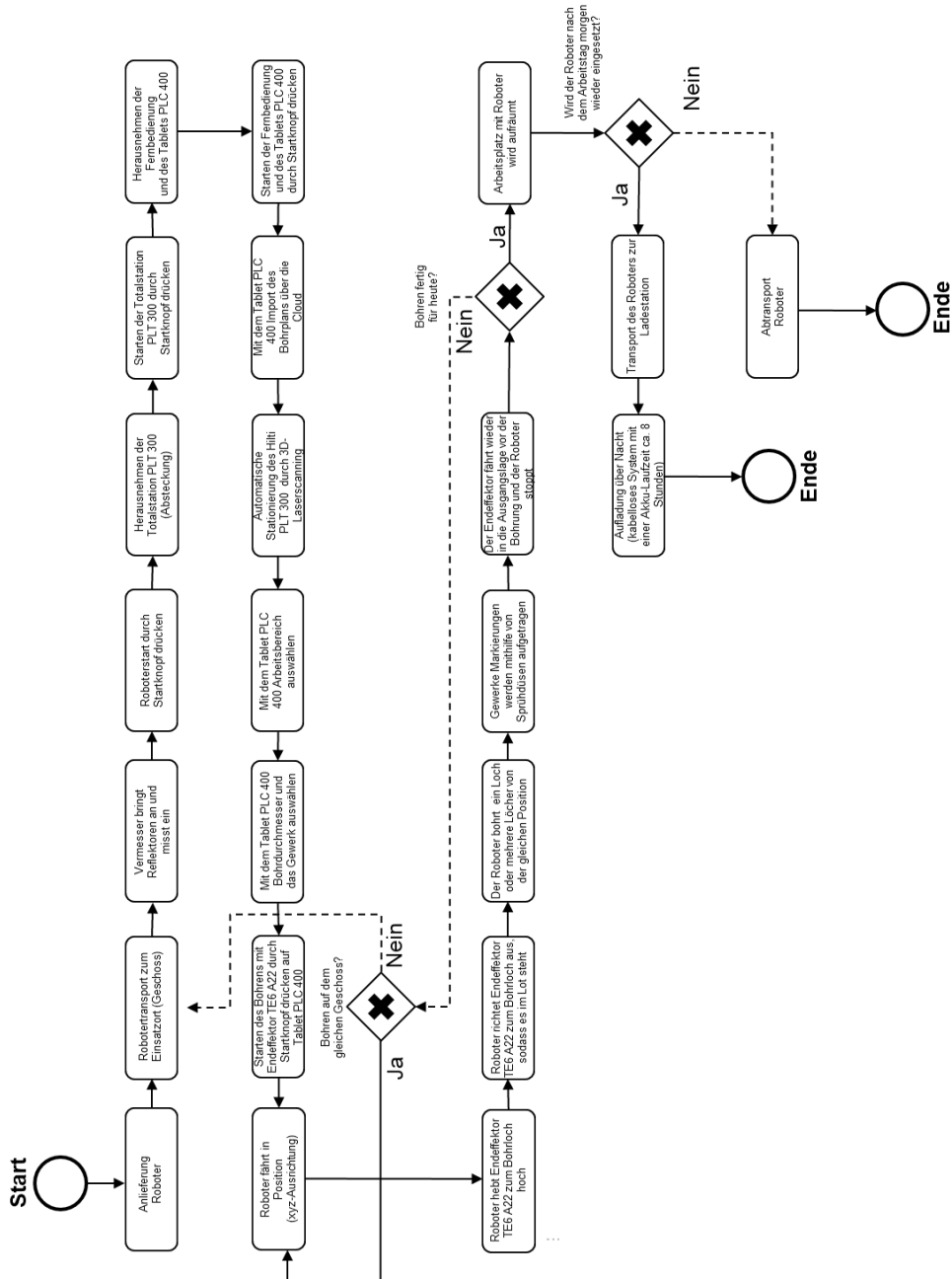


Abbildung 4.6: Prozessdarstellung am Beispiel des Jaibot Hilti AG/nLink – Gewerk: Rohbau, TGA; Tätigkeit: Bohren

4.3.3 Evaluierung des sozial-ethischen Impacts

Ergebnisse einer Umfrage während der Machbarkeitsstudie von Anwendern, die bereits in Pilotprojekten mit Assistenzrobotern auf der Baustelle zusammengearbeitet haben, ordnen den Einsatz in die vom MEESTAR Modell⁴⁴ vorgeschlagene Stufe II ein: Die Anwendung von Assistenzrobotern auf der Baustelle weist ethische Sensibilität auf, was aber in der Praxis entsprechend berücksichtigt werden kann. Konkret wurden von den Umfrageteilnehmern in Hinblick auf die ethische Einschätzung die Aufklärung und Einbeziehung des Bauherrn als wesentlich eingestuft. Dies wurde mit den neuartigen Bauprozessen, die mit dem Einsatz von Assistenzrobotern auf der Baustelle einhergehen, begründet. Eine Erlaubnis des Bauherrn, Assistenzroboter auf der Baustelle einsetzen zu dürfen, wurde auf bisherigen Pilot-Baustellen immer vor dem Einsatz eingeholt, um Konflikte beispielsweise hinsichtlich Datenschutz und Arbeitssicherheit im Vorfeld auszuschließen. Im Kompetenzzentrum CONSAS sollen die konkreten ethischen Bedenken klar identifiziert und Lösungen erarbeitet werden, um diese nachhaltig zu berücksichtigen. Ziel ist es an Beispielen demonstrierbare Lösungen zu entwickeln, die in der gesamten Baubranche aufgegriffen und umgesetzt werden können.

Der Einsatz von Assistenzsystemen auf der Baustelle wirft auch Fragen hinsichtlich der Selbstbestimmung des Arbeitsprozesses oder der Privatheit auf, die durch Ton- oder Videoaufnahmen von Assistenzrobotern beeinträchtigt werden könnte. Ob und in welchem Maße die Unterstützung in technischer Form auf Baustellen geleistet wird, ist nicht nur eine Frage der moralischen und politischen Verpflichtungen, die in einer alternden Gesellschaft notwendig wird, sondern auch eine Frage der technischen Umsetzung der Unterstützung. Das Kompetenzzentrum CONSAS stellt die Frage, wie die eingesetzte Technik das gesellschaftliche Gefüge auf der Baustelle verändert, wie Anwender informiert werden können, um dazu beizutragen, dass notwendige Fragen konstruktiv bearbeitet werden. Bei der Evaluation der ethischen Auswirkungen beim Einsatz von Assistenzrobotern auf der Baustelle kommen die unterschiedlichen Perspektiven (Anwender, Hersteller usw.) zum Tragen, und werden berücksichtigt. Sind problematische Effekte identifiziert, werden durch die konsequente Anwendung des MEESTAR-Modells Lösungsansätze entwickelt. Aufgrund der bisher seltenen

⁴⁴K. Weber, 2015, S. 252. Das MEESTAR Modell ist ein Modell zur ethischen Evaluierung soziotechnischer Arrangements.

Einsätze von Assistenzrobotern auf der Baustelle sollen bei der verstärkten Nutzung der Systeme während der Erprobungsstudien neue und unerwartete ethische Problempunkte identifiziert und gelöst werden. Als Ergebnis können Aspekte und Funktionalitäten von Assistenzrobotern auf der Baustelle genannt und adressiert werden, die aus ethischer Sicht besonders beachtet werden müssen.

Als Abschluss der Machbarkeitsstudie wurden Experteninterviews durchgeführt, um die Ergebnisse und das daraus resultierende Gesamtkonzept des Kompetenzzentrums zu überprüfen. Durchgeführt wurden die Interviews mit 5 Teilnehmern. Dabei handelt es sich um 3 Mitarbeiter der Ed. Züblin AG, die erste Erfahrungen in der Anwendung mit Assistenzrobotern auf der Baustelle in Pilotprojekten gesammelt haben. Außerdem konnte Feedback von zwei Herstellern von Assistenzrobotern eingeholt werden. Die Ist-Situation zur Häufigkeit des Einsatzes von Assistenzrobotern auf der Baustelle wurde von allen Interviewteilnehmern als selten eingestuft, was auf den ausschließlichen Einsatz in Pilotprojekten zurückzuführen ist. In Bezug auf die bisherigen Einsätze von Assistenzrobotern auf der Baustelle wurde abgefragt, ob bereits eine Netzwerkstruktur besteht, um Erfahrungen an die Hersteller zurückzuführen. Es wurde berichtet, dass bisher nur ein sehr schwacher und unregelmäßiger Informationsaustausch stattfindet. Dieser Informationsaustausch soll im Kompetenzzentrum CONSAS systematisch aufgebaut werden. Alle Interviewteilnehmer schätzen den technologischen Reifegrad der bisher am Markt verfügbaren Assistenzroboter als niedrig ein. Durch strukturiertes Feedback innerhalb des Kompetenzzentrums insbesondere mit den Herstellern kann der technologische Reifegrad von Assistenzrobotern auf der Baustelle in Deutschland kontinuierlich gesteigert werden. In den Interviews wurde das entwickelte Business-Ecosystem (4.3.4) vorgestellt und von allen Interviewteilnehmern bestätigt. Ebenfalls bestätigt wurden die für die Erprobungsstudien geplanten Gewerke und Tätigkeiten (4.3.2.1), für die Assistenzroboter auf der Baustelle eingesetzt werden sollen. Abschließend wurde die Einschätzung der Interviewteilnehmer bzgl. des Zeitpunktes der Befragung, die Dauer der Befragung und die Anzahl der Befragungen während der Erprobungsstudien eingeholt. Daraus ergeben sich am Nachmittag 20-30-minütige Befragungen während der Erprobungsstudien, die je nach Dauer der Erprobungsstudien zyklisch wiederholt werden. Alle Ergebnisse und Anregungen aus den Interviews der Machbarkeitsstudie sind in das Gesamtkonzept des Kompetenzzentrums CONSAS eingeflossen.

4.3.4 Business-Ecosystem zum Kompetenzzentrum CONSAS

Zum Aufbau eines Kompetenzzentrums für Assistenzrobotik wurden während der Machbarkeitsstudie zunächst alle relevanten Stakeholdergruppen identifiziert. Daraus leitet sich als Ergebnis das Business-Ecosystem von CONSAS ab (Abb. 4.7). Um die verschiedenen Stakeholdergruppen hinsichtlich ihres unterschiedlich starken Einflusses zu kategorisieren und diese in die damit verbundenen Hierarchien im Ecosystem einordnen zu können, wurde ein Onion Modell (Zwiebelmodell) als Repräsentationsmedium gewählt. Dieses besteht aus drei Layern, je weiter der Layer vom Zentrum entfernt ist, desto geringer ist die relative Beziehung und der Einfluss auf das Zentrum. Die Stakeholder werden neben den Verbundpartnern in drei Kategorien gegliedert. Das Modell dient als Ausgangspunkt für die Stakeholder-Analyse, welche sich für spezifische Anwendungsgefälle (abhängig von Gewerk und Tätigkeit) ändert. Das Modell reagiert je nach Anwendungsfall unterschiedlich in Relation zum Informationsfluss, wie auch Geldfluss. Im Zentrum der Betrachtung steht das Kompetenzzentrum CONSAS, das aus den Verbundpartnern besteht. Der erste Layer (Geschäftssystem) beinhaltet alle Stakeholder, die direkt vom Kompetenzzentrum adressiert werden. Dazu gehören beispielsweise Firmen, welche Wertschöpfung auf der Baustelle betreiben und Hersteller von Robotersystemen. Aus diesem Layer rekrutieren sich u. a. die assoziierten Partner (siehe 4.5.2). Im zweiten Layer sind Stakeholder angesiedelt, die indirekt betroffen sind. Dieser Layer kann als eine Serviceebene angesehen werden, der Stakeholder mit Aufgaben zu Wartungsarbeiten oder Logistik beinhaltet. Der dritte Layer stellt die Umgebung des Business-Ecosystems von CONSAS dar und beinhaltet Stakeholder, welche indirekt in Beziehung zur Assistenzrobotik auf der Baustelle stehen. Hierzu zählen beispielsweise Behörden und Investoren. Die Beziehungen zwischen den Stakeholdern sollen sich im geplanten Ecosystem in Form von Informations- und Geldflüssen ausdrücken. Beispielsweise können Informationsflüsse Erfahrungen aus den Erprobungsstudien auf der Baustelle an die Hersteller der Assistenzrobotersysteme weiterleiten.

Der Einsatz von Assistenzrobotik am Bau, so zeigt die Machbarkeitsstudie, steht vor der Herausforderung, komplexe, hybride (aus physischem Produkt und Dienstleistungen bestehende) Leistungsangebote zu schaffen. Im Fall der Baurobotik kommt noch hinzu, dass die unterstützenden Systeme tief in die Gestaltung menschlicher Arbeit

eingreifen und daher ein hohes Maß an Akzeptanz und Kompetenzentwicklung in der Handhabung und Wartung erfordern. Es ist davonauszugehen, dass die notwendigen Leistungen nicht mehr von einem Anbieter konzipiert und erbracht werden können. Zukunftsfähige Geschäftsmodelle müssen in der Lage sein, Wertschöpfungskonstellationen zu gestalten, in denen gemeinschaftliche Ressourcennutzung verlässlich organisiert, heterogene materielle und immaterielle Kosten und Werte, die durch die übergreifende Ressourcennutzung entstehen, fair verteilt werden. Hinzu kommt, dass es sich bei Business-Ecosystemen um ein System von Systemen handelt. Das bedeutet, dass jeder beteiligte Akteur zunächst den Zielen, Werten und Handlungslogiken der jeweiligen Ursprungsorganisation verpflichtet ist. Es stellt sich die Frage der Elastizität dieser Ursprungsgeschäftsmodelle und der Gestaltung von Anschlussfähigkeit an neue, kollaborative Geschäftsmodelle. Eine besondere Herausforderung liegt dabei in der Formulierung gemeinsamer Wertversprechen sowie der operativen Ressourcenintegration über Unternehmensgrenzen hinweg.

4.4 Nachhaltigkeit und Verwertungsplan

4.4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Durch die Schaffung eines bei der Industrie angesiedelten Kompetenzzentrums wird tiefgreifendes Wissen über Möglichkeiten des Einsatzes von Assistenzrobotik im Hochbau für die Praxis generiert. Die Ed. Züblin AG als federführendes Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft hat ein inhärentes Interesse die Ergebnisse des Projektes zu verwerten sowie das Kompetenzzentrum langfristig zu betreiben. Züblin ist als technologieaffiner Anwender und damit in Verbindung stehender Signalwirkung an die weiteren Akteure ausgezeichnet geeignet, um als Orchestrator eines Business-Ecosystems für Assistenzroboter im Bausektor zu agieren. Es ist aus zweierlei Gründen eine großflächige Verbreitung zu erwarten. Züblin verfügt in der DACH-Fläche über die notwendige Marktdurchdringung. Viele Gewerke werden von mittelständischen und kleinen NUs ausgeführt. Da auch bei NUs akuter Personalmangel herrscht, dort aber keine Ressourcen für ein eigenes Kompetenzzentrum vorhanden sind, sollen diese Unternehmen ebenfalls von den Erkenntnissen des Kompetenzzentrums profitieren. Ebenso können die Technologiehersteller profitieren, deren Absatz sich durch eine

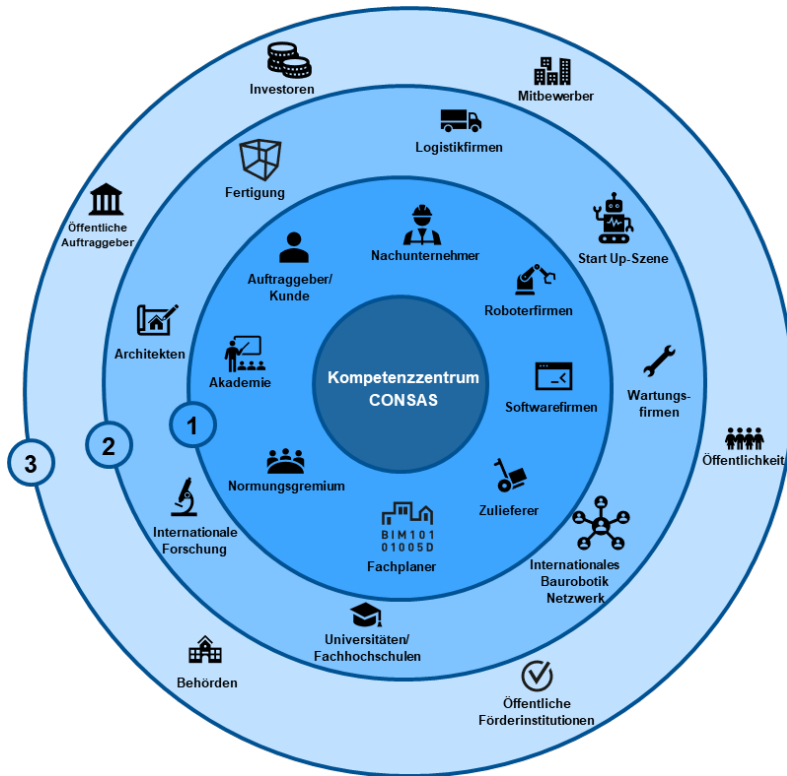


Abbildung 4.7: Business-Ecosystem CONSAS

zunehmende Anzahl von Einsatzbaustellen steigert und dadurch befähigt werden neue Lösungen zu entwickeln.

Allgemein sind die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten einer zunehmenden Automatisierung und Robotisierung im Bauwesen groß: der vermehrte Einsatz von Assistenzrobotern könnte dem akuten Personalmangel entgegenwirken und die gesamte Branche für ArbeitnehmerInnen attraktiver machen. Durch die Senkung der Arbeitsunfälle, Arbeitsunfähigkeit und Arbeitsabwesenheit als Konsequenz der Unterstützung bei den schweren körperlichen Tätigkeiten könnten nicht nur massive Einsparungen bei den Bauunternehmen, sondern für die Gesellschaft als Ganze entstehen. Weitere Einsparungen würden durch Steigerung der Produktivität erlangt werden können.

4.4.2 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten

Neben der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten hält das Konsortium auch die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten und die Anschlussfähigkeit für hoch. Als eines der Kernergebnisse des Projekts entsteht eine neuartige multidimensionale Bewertungsmethodik, die alle wesentlichen Aspekte (wie die Mensch-Roboter-Interaktionsqualität, Usability, technische Funktionsfähigkeit, Aufgabenerfüllung, physische Entlastung der Nutzer, Roboter-Autonomie und Sicherheit sowie die soziale Effekte in der Interaktion), die relevant für den Einsatz der Roboter auf die Baustelle und die Kooperation bzw. Kollaboration mit deren menschlichen Nutzer sind, betrachtet. Dies wird von der im Konsortium vorhandenen optimalen Zusammensetzung von Expertise und tiefgreifender Erfahrung im Bereich der Robotik, der Bauprozesse, der Analyse von mensch-zentrierten Faktoren (wie Biomechanik, Ergonomie, User Experience) und der Arbeitsorganisation ermöglicht. Darüber hinaus wird die Generalisierung der methodischen Arbeiten zur Entwicklung einer übergreifenden branchenneutralen Bewertungsmethodik für Assistenzroboter im Projekt angestrebt. Die zu entwickelnden Metriken können für andere Branchen als Leitplanken zur Bewertung von Assistenzrobotern dienen. Die Verbreitung dieser neuen Ergebnisse ist durch die Mitwirkung der drei wissenschaftlichen Partner (TUM, IAO und IPA) in den wesentlichen Anwendungsfeldern der Assistenzrobotik sichergestellt.

Im Rahmen der geplanten Umfragen vor und während der Erprobungsstudien werden die biomechanischen Parameter während der Durchführung der Tätigkeiten mit und ohne Roboter systematisch und über die Dauer der gesamten Testphase regelmäßig erfasst. Diese Daten werden anschließend auf Basis von orthopädischen, sportwissenschaftlichen und arbeitsmedizinischen Grundlagen hinsichtlich der Entlastung und Ergonomie der Systeme analysiert. Dem Konsortium ist kein vergleichbares Projekt zur Evaluation der physischen Entlastung und Ergonomie von Assistenzrobotern auf deutschen Baustellen bekannt. Insbesondere im Kontext des Einsatzes von Exoskelett-Systemen, wo biomechanische Wirkungen und Langzeiteffekte der Nutzung immer wieder hinterfragt und diskutiert werden. Die entstehende Datenbasis und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse sind von großer Bedeutung und haben Einfluss auf den zukünftigen Einsatz von Assistenzrobotern sowohl in der Baubranche als auch in vielen weiteren Anwendungsbereichen wie der Produktion, der Logistik und der Landwirtschaft.

In Bezug auf die Entwicklung von Geschäftsmodellen und Dienstleistungen für den Einsatz von Assistenzrobotik im Hochbau steht mit dem Business Model Canvas und den erweiterten Methodiken zu dessen Anwendung auf Multi-Akteurs-Konstellationen ein robustes Instrumentarium zur Verfügung, um das hochgradig neue Feld der Realisierung von smarten, hybriden Leistungen in komplexen und hochsensiblen sozio-technischen Systemen zu erschließen. Von besonderem Interesse ist es dabei, belastbare und mit einem Multi-Akteurs-Setting Praxisfälle zu entwickeln, die es erleichtern, die bislang zu beklagende, große Spreizung im Niveau von Digitalisierung, Einsatz von KI und Transformation von Arbeit zwischen Branchen und Unternehmensgrößen zu verringern. Eine besondere Chance für die Generierung neuen Wissens stellt dabei die Bearbeitung der Geschäftsmodell-Thematik auf zwei Ebenen dar: erstens der operativen Anwendungs-/Nutzerebene mit Fachleuten am Bau als “Experts of their Experience” sowie zweitens der übergreifenden Ebene von flankierenden Mehrwertdienstleistungen eines Kompetenzzentrums für Assistenzrobotik. Die Bearbeitung der Fragen, wie gemeinschaftliche Leistungsangebote entstehen, welche Schlüsselprozesse der Ressourcenintegration zur operativen Umsetzung von neuartigen Wertversprechen zu gestalten sind und wie eine Roadmap der Geschäftsmodelltransformation aussehen kann, lassen wertvolle Beiträge für Forschung und Innovation rund um neue Konzepte vernetzter Wertschöpfung erwarten. Das Übertragungspotenzial der angestrebten Entwicklungsprozesse und Ergebnisse in andere Bereiche wird als hoch eingeschätzt.

4.4.3 Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

An diesen Gedanken anschließend wird die Schaffung eines zentralen Hub (um das sich das Ökosystem organisieren und entwickeln kann) für Baurobotikentwicklung im deutschen Raum angestrebt, was eben diese Lösungen für die Stakeholdergruppen beinhaltet. Durch die gezielte Kombination mit anderen Konzern-Programmen, wie z. B. dem Start-up-Programm, das gezielte, gemeinsame Entwicklungen mit Start-Ups vorsieht, können weitere passende Tech-Firmen eingebunden werden. Züblin würde im Anschluss an eine Förderung die notwendigen personellen und finanziellen Ressourcen zur Verfügung stellen, um das Kompetenzzentrum gemeinsam mit geeigneten Partnern aus Wissenschaft und/oder Intermediären zu betreiben und weitere wissenschaftliche Fragestellungen anzustoßen. Des Weiteren beinhaltet der Arbeitsplan

die Entwicklung von Geschäftsmodelloptionen für ein nachhaltig leistungsfähiges Kompetenzzentrum CONSAS. Hier geht es darum Mehrwertdienstleistungen, Schlüsselprozesse und Gegenwertoptionen zu formulieren, die es ermöglichen, ein nachhaltig wirksames Kompetenzzentrum zu etablieren. Damit wird zum Ziel „einer grundlegenden Vorbereitung für flächendeckenden Einsatz“ von Roboterlösungen beigetragen (vgl. Abschnitt 1.2). Der Baurobotik-Hub soll als langfristige Weiterentwicklung des Kompetenzzentrums CONSAS sowohl Industriepartnern als auch Wissenschafts- und Forschungseinrichtungen offenstehen und folgende Dienstleistungen anbieten:

- Möglichkeit der schnellen und kostengünstigen Evaluation robotischer Technologien unter Realbedingungen und dadurch erleichterter Marktzugang,
- Know-How im Bereich Baurobotik mit Fokus auf die baupraktische Anwendung,
- Nutzung der bereitgestellten Infrastruktur, Ort der Vernetzung zwischen Industrie, Start-ups und Wissenschaft,
- Aus- und Weiterbildungszentrum

Denkbar ist ebenso neben dem Use Case Hochbau zukünftig auch weitere Anwendungsfälle wie Verkehrswegebau oder Tunnelbau mit einzubeziehen, um langfristig die komplette Wertschöpfungskette Bau abzudecken. Ein mögliches Geschäftsmodell inkl. Leistungsportfolio für das Kompetenzzentrum soll im Projekt mit den potenziellen Partnern des Kompetenzzentrums erarbeitet werden.

4.5 Struktureller Aufbau des Verbundes

4.5.1 Vorstellung der Verbundpartner

4.5.1.1 Ed. Züblin AG

Die Ed. Züblin AG gegründet 1898 mit Hauptsitz in Stuttgart, beschäftigt rund 14.000 MitarbeiterInnen und besitzt eine jährliche Bauleistung von rund 4 Mrd. EUR. Somit gehört das Unternehmen zu den führenden deutschen Baukonzernen. Die Ed. Züblin AG gehört zum Unternehmensverbund der österreichischen STRABAG SE, einem der führenden Baukonzerne Europas. Als ausführende Baufirma verfügt Züblin über das notwendige Know-How zu Bauplanungs- und Ausführungsprozessen und treibt proaktiv die Entwicklung und Umsetzung neuer Technologien voran. Im Rahmen einer konzernweiten Robotik-Strategie soll das Thema Assistenzrobotik eine zentrale

Rolle spielen. In den letzten Jahren konnten Cobots für Handwerkerfunktionen sowie passive Exoskelette in mehreren Konzernunternehmen getestet und erste Erfahrungen gesammelt werden. Um den Einsatz von Assistenzrobotern auf Baustellen voranzutreiben ist eine starke Einbindung der Bauplanung notwendig. In der Zentralen Technik (ZT) sind die wichtigen planungstechnischen Kompetenzen des Konzerns gebündelt. Die Dienstleistungen für die konzernweite Unterstützung der operativen Einheiten umfassen den Schlüsselfertigbau, den Konstruktiven Ingenieurbau, den Tief- und Tunnelbau, das Bauprozess Management sowie Digitalisierung und Software Engineering. Dabei begleitet die ZT den gesamten Bauprozess: von der Akquisitionsphase über die Angebotsbearbeitung, die Ausführungsplanung bis hin zur Fachbauleitung. Um die technische Wettbewerbsfähigkeit des Konzerns für die Zukunft zu stärken, forciert die ZT sämtliche fachspezifischen sowie interdisziplinären Innovationen. So ist die ZT auch für das Thema BIM 5D® zentrale Know-how-Trägerin und treibt dieses für den Konzern voran. Mit rund 50 MitarbeiterInnen verfügt diese Abteilung über das notwendige Expertenwissen und über die Erfahrung, die für die Umsetzung des Projekts nötig sind. Die BIM (Content) Entwicklung ist Kernbestandteil der Digitalisierungsstrategie des Konzerns. Aktuelle BIM geplante Referenzprojekte sind z. B. die neue Hauptzentrale von Adidas „World of Sports“ oder der Axel Springer Neubau in Berlin. Teil der BIM-Entwicklungsabteilung, die mittlerweile weit über 50 Personen beschäftigt, ist auch ein Team, das sich mit digitaler Fabrikation befasst. Erste konkrete Erfahrungen in diesem Bereich konnten beim 3D-Druck gesammelt werden.

4.5.1.2 Technische Universität München - Baurealisierung und Baurobotik

Die Technische Universität München (TUM) wurde 1868 gegründet und zählt zu den besten Universitäten Europas mit Spitzenleistungen in Forschung und Lehre, Interdisziplinarität und Talentförderung. Der Lehrstuhl für Baurealisierung und Baurobotik der TUM versteht sich als Inkubator und Erweiterung der Kernkompetenzen des Planens und Bauens und zählt zur Fakultät für Architektur. Angesiedelt im bayrischen Hightech-Cluster ist der Lehrstuhl gut vernetzt und untersucht die Möglichkeiten der Baurobotik auf praktischer, wie auch theoretischer Basis und insbesondere in

Verbindung zu soziotechnisch integrierten und gebäudenähe Technologien seit vielen Jahren. Der Lehrstuhl definiert Architektur als Dienst an der Gesellschaft und Bauen als Produktionsprozess. Auch wenn Architektur und Bauwesen die Schwerpunkte des Lehrstuhls sind, verzahnt er sich erheblich mit anderen Disziplinen und Fakultäten (wie z. B. Wirtschaftsingenieurwesen, Elektrotechnik, Bauingenieurwesen, Wirtschaftswissenschaften, Innenarchitektur, Informatik, Maschinenbau) um die Wissensgenerierung durch gebündeltes Knowhow zielgerichtet zu fördern. Besondere Kompetenz hat der Lehrstuhl durch die Forschung in den Bereichen der Produktionstechnik, IKT, Mikrosystemtechnik, Mechatronik, Automatisierung, Robotik und Assistenztechnik gewonnen und wendet dieses Wissen zur Lösung von Zukunftsproblemen an (z. B. demografische Herausforderungen unserer Gesellschaft unter Berücksichtigung aller Phasen des Gebäudelebenszyklus). Viele Forschungsprojekte sind dabei Ausdruck der Expertise. Angefangen mit dem Projekt USA welches einen robotischen, minifabriktähnlichen Arbeitsplatz entwickelte, der neuartige Technologien aus den Bereichen Telepräsenz, kooperative Robotik, nahtlose Interaktion, 3D-Druck und Cloud Manufacturing integrierte. Ein weiteres Anwendungsbeispiel aus der Forschung in Relation zur Baurobotik ist das HEPHAESTUS-Projekt. Dieses untersucht den innovativen Einsatz von Robotern und autonomen Systemen im Bauwesen und zielt auf die erhöhte Marktreife und Akzeptanz bei der Anwendung von Seilrobotern für die Montage von Vorhangfassaden ab. Das Forschungsprojekt ENSARE hingegen fördert die Sanierung von Wohngebäuden in Europa mit dem Ziel Gebäudekomponenten und digitale Lösungen dafür zu entwickeln. All diese Projekte sind Ausdruck der roboterbasierten Anwendung/Verwertung von in der Forschung generierten Wissen und veranschaulicht das breite Spektrum des Lehrstuhls in den Bereichen Baurobotik und Baurealisierung.

4.5.1.3 Fraunhofer-Institute IAO und IPA

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist die führende Organisation für angewandte Forschung in Europa. Unter ihrem Dach arbeiten 74 Institute und Forschungseinrichtungen an Standorten in ganz Deutschland. Rund 28.000 MitarbeiterInnen überwiegend mit natur- oder ingenieur-wissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,8 Mrd. EUR.

Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Stuttgart ist seit

knapp 40 Jahren ein renommierter Anbieter von Dienstleistungen in den Bereichen Unternehmens- und Arbeitsorganisation, Technologiemanagement sowie Informations- und Kommunikationstechnik. Das Institut unterstützt Unternehmen dabei, die Potenziale innovativer Organisationsformen sowie zukunftsweisender Informations- und Kommunikationstechnologien zu erkennen, individuell auf ihre Belange anzupassen und konsequent einzusetzen. Das Team "Building Culture Innovation" setzt sich mit der Anwendung der digitalen Planungs-, Bau- und Betriebsprozesse in der Wertschöpfungskette Bau und Immobilien auseinander. Im Fokus stehen Studien und Projekte mit Planern, ausführenden Unternehmen und öffentlichen und privaten Bauherren in der Bau- und Immobilienbranche. Das Team ist aktiv in zahlreichen Netzwerken in den Bereichen Extended Reality XR, Building Information Modelling (BIM) tätig und prägt damit zukünftige Entwicklungen in diesen Bereichen. Das Team "Service Business Innovation" leistet Forschungs- und Innovationsarbeit zur Kreation und nachhaltigen Erbringung neuer, häufig smarter Dienstleistungen. Ein fachlicher Schwerpunkt liegt dabei auf der Gestaltung von Geschäftsmodellen für serviceorientierte, vernetzte Wertschöpfung die zunehmend in Multi-Akteurs-Konstellationen sich formierender Business-Ecosysteme stattfindet.

Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA – eines der größten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft – wurde 1959 gegründet und beschäftigt annähernd 1000 MitarbeiterInnen. Die 15 Fachabteilungen des Fraunhofer IPA decken den gesamten Bereich der Produktionstechnik ab und entwickeln stetig neue Lösungen für die Automatisierung in verschiedenen Bereichen, Branchen und Ebenen, von der Fabrikplanung bis hin zu der Laborautomatisierung. Die Abteilung "Biomechatronische Systeme" besteht aus einem Team von Experten aus den Bereichen Medizin, Medizintechnik, Physiotherapie und Sportwissenschaften sowie Ingenieurwesen und Informationstechnologie. Dies ermöglicht eine ganzheitliche, quantitative und qualitative Betrachtung von Exoskelett-gestützten Arbeitsprozessen. Die Gruppe Ängewandte Biomechanik"führt seit Jahren praxisorientierte Ergonomie-Analysen und Workshops bei Unternehmen durch und zeichnet sich durch interdisziplinäre Expertise im Bereich Arbeitsergonomie aus. Die Abteilung "Roboter- und Assistenzsysteme" entwickelt Schlüsseltechnologien für Roboter und Automatisierungslösungen, und setzt diese in innovative Industrieroboter, Serviceroboter und intelligente Maschinen um. In diesem

Kontext hat sie umfangreiche Kompetenzen und Erfahrungen im Bereich der sicheren Mensch-Roboter-Interaktion aufgebaut.

4.5.2 Assoziierte Partner

Das hier vorgestellte Konsortium wird von 18 assoziierten Partnern unterstützt. Zum einen sind industrielle Partner (IND), vorwiegend Entwickler und Hersteller von Assistenzrobotern und Exoskeletten, daran interessiert ihre für die Baustelle spezialisierten Systeme unter realen Einsatzbedingungen zu testen, um durch wissenschaftliche Erkenntnisse diese zu optimieren und an die Bauprozesse anzupassen. Zum anderen konnten industrielle Stakeholder, wissenschaftliche Einrichtungen und Verbände zur Teilnahme an einem Advisory Board (ADV) für die Umsetzung des Kompetenzzentrums einladen werden.

1	ABB AG / Österreich	Wiener Neudorf, Österreich	Unternehmen	IND	Entwickler und Hersteller von Industrierobotern, kollaborativen Robotern, Robotersteuerung und Software
2	Assisted Working and Automation	Darmstadt, DE	Hochschule	IND	Forschung und Entwicklung in den Bereichen des Bauwesens und des Handwerks
3	baua	Dortmund, DE	Bundesanstalt	ADV	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
4	Bauwirtschaft BW	Stuttgart, DE	Verband	ADV	Branchenverband Bauwirtschaft in Baden-Württemberg
5	BG Bau	Berlin, DE	Verband	ADV	Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft
6	Biersack Technologie GmbH & Co.KG	Beilngries, DE	Unternehmen	IND	Hersteller aktiver Exoskelette
7	BW-Handwerkstag e.V.	Stuttgart, DE	Verband	ADV	Zusammenschluss sämtlicher Handwerksorganisationen in Baden-Württemberg
8	Cobod	Kopenhagen, Dänemark	Unternehmen	ADV	Entwickler und Hersteller von 3D-Druck-Systemen, Steuerung und Software
9	CREDO Robotics GmbH	München, DE	KMU	IND	Kommunikation und Transfer für Baurobotik
10	DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.	Berlin, DE	Verband	ADV	Nationale Normungsorganisation
11	German Bionic Systems	Augsburg, DE	KMU	IND	Hersteller aktiver Exoskelette (z. B. Cray X), Marktführer bei Hüft-Unterstützenden-Systemen
12	Hilti DE AG	Kaufering, DE	Unternehmen	IND	Hersteller von Assistenzrobotern und intelligenten Werkzeugen
13	ISG GmbH	Stuttgart, DE	KMU	IND	Hersteller von Steuerungssoftware
14	Iturri	Sevilla, Spanien	Unternehmen	IND	Vertrieb von vielen passiven Exoskelett-Systemen in DE und Europa
15	Okibo Ltd	Petach Tikva, Israel	KMU	IND	Hersteller von Assistenzrobotern für die Bauwirtschaft
16	RB3D	Monéteau, FR	Unternehmen	IND	Hersteller aktiver Exoskelette
17	Robotics, University of Southern Denmark (SDU)	Odense, Dänemark	Hochschule	ADV	Forschung auf den Gebieten der kognitiven und angewandten Robotik mit Ziel an Forschungsproblemen aus realen Robotik-Anwendungen zu arbeiten
18	SoKo Fussboden GmbH	Elmenhorst, DE	KMU	IND	Hersteller von Zusatzmittel für Estrich und eines Estrichabzieherroboters

Tabelle 4.1: Partner

4.6 Zusammenarbeit mit Transferprojekt

Das Forschungsvorhaben CONSAS hat ein Arbeitspaketübergreifendes Kommunikations- und Transferkonzept aufgestellt, das die Ziele des wissenschaftlichen Trans-

ferprojektes adressiert und unterstützt. Kommunikation und Transfer der Ergebnisse finden auf unterschiedlichen Leveln statt:

1. Erkenntnisse aus der Auswertung der getesteten Assistenzrobotersysteme fließen zunächst zu den Herstellern und anderen beteiligten Stakeholdern,
2. Kommunikation der Ergebnisse innerhalb der Baubranche u. a. in Form von Aus- und Weiterbildung für den Mittelstand, Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Vorträgen,
3. Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Einbindung in die akademische Lehre,
4. Aufbau einer öffentlichen Datenbasis zur Baurobotik für Interessierte und Öffentlichkeit u.a. über eine Projekt-Webseite und Social-Media-Kanäle

Die Zielgruppengerechte Aufbereitung der Ergebnisse sowie die öffentliche Datenbasis spricht auch das Transferprojekt sowie die anderen geförderten Zentren an und soll Austausch bspw. zu Methoden und Herangehensweisen und den Transfer der Ergebnisse fördern.

Eine Zusammenarbeit mit dem wichtigsten deutschen Normungsinstitut, dem DIN, soll schon während der Projektlaufzeit die Potenziale einer Standardisierung der Projektergebnisse herausarbeiten – da methodische Ansätze in andere Anwendungsfelder übertragen werden können, wäre auch hier eine Zusammenarbeit mit dem Transferprojekt interessant.

Die Entwicklung eines Geschäftsmodells für das Kompetenzzentrum CONSAS wird ebenfalls in den Arbeitspaketen adressiert (AP 6.5). Des Weiteren soll CONSAS während der Projektlaufzeit iterativ verbessert werden (AP 6.6) und neue Erkenntnisse anderer Projekte stetig miteinfließen lassen. Die erlangten Ergebnisse können im Rahmen des Austausches mit dem Transferprojekt kommuniziert und diskutiert werden.

Literaturverzeichnis

- Thomas Bock. Construction robotics. *Autonomous Robots*, 22(3):201–209, 2007.
- Thomas Bock. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in construction*, 59:113–121, 2015.
- Thomas Bock and Thomas Linner. *Robotic industrialization*. Cambridge University Press, 2015.
- Thomas Bock and Thomas Linner. *Construction Robots: Volume 3: Elementary Technologies and Single-task Construction Robots*. Cambridge University Press, 2016a.
- Thomas Bock and Thomas Linner. *Site Automation: Automated/robotic On-site Factories*. Cambridge University Press, 2016b.
- Thomas Bock, Thomas Linner, and W Ikeda. Exoskeleton and humanoid robotic technology in construction and built environment. *The future of humanoid robots-research and applications*, pages 111–144, 2012.
- Thomas Bock, Thomas Linner, Jörg Güttler, and Kepa Iturralde. *Ambient Integrated Robotics: Automation and Robotic Technologies for Maintenance, Assistance, and Service*, volume 5. Cambridge University Press, 2019.
- Mathias Brandstötter and Titanilla Komenda. Gegenwart und Zukunft kollaborationsfähiger Robotersysteme. *Stellenwert menschlicher Arbeit im Zeitalter der digitalen Transformation*, 2020.
- Juan Manuel Davila Delgado, Lukumon Oyedele, Anuoluwapo Ajayi, Lukman Akanbi, Olugbenga Akinade, Muhammad Bilal, and Hakeem Owolabi. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*, 26:100868, 2019.
- International Federation of Robotics IFR. World robotics 2019 – industrial robots and service robots. Frankfurt: VDMA Services GmbH, 2019.

- Rohana Mahbub. *An investigation into the barriers to the implementation of automation and robotics technologies in the construction industry*. PhD thesis, Queensland University of Technology, 2008.
- Nathan Melenbrink, Justin Werfel, and Achim Menges. On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. *Automation in construction*, 119: 103312, 2020.
- Linda Onnasch, Xenia Maier, and Thomas Jürgensohn. *Mensch-Roboter – Interaktion – Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Dortmund, 2016.
- Isaac Perkins and Martin Skitmore. Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, 15(1):1–9, 2015.
- Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan, and Kah Fai Leong. 3d printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3):261–276, 2017.
- Mohd Yamani Bin Yahya, Yin Lee Hui, Azlina Binti Md Yassin, Roshartini Omar, Rolyseira Orbintang anak Robin, and Narimah Kasim. The challenges of the implementation of construction robotics technologies in the construction. In *MATEC Web of Conferences*, volume 266, page 05012. EDP Sciences, 2019.
- Yusuke Yamazaki and Junichiro Maeda. The smart system: an integrated application of automation and information technology in production process. *Computers in Industry*, 35(1):87–99, 1998.
- Holly A Yanco and Jill L Drury. A taxonomy for human-robot interaction. In *Proceedings of the AAAI fall symposium on human-robot interaction*, pages 111–119, 2002.
- T Yoshida. A short history of construction robots research & development in a japanese company. In *Proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction*, volume 188, page 193, 2006.