

DIPLOMARBEIT

Untersuchung der Zusammenarbeit von Menschen und Robotern als Grundlage für einen effizienten Einsatz im Bauwesen

Specification of Human Robot Collaboration Scenarios in the Construction Sector

eingereicht von cand. ing. Nicolas Mitsch
geb. am 15.10.1992 in Heidelberg

Betreuer:

- Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel
- Dipl.-Ing. Adrian Schubert

Dresden, den 17. Februar 2020

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Name: cand. ing. Nicolas Mitsch

Vertiefung: Baubetrieb

Thema: Untersuchung der Zusammenarbeit von Menschen und Robotern als Grundlage für einen effizienten Einsatz im Bauwesen.

(Specification of Human Robot Collaboration Scenarios in the Construction Sector)

Zielsetzung:

Die Automatisierung im Bauwesen, einschließlich des zukünftig vermehrt zu erwartenden Einsatzes von Robotern, ist ein Mittel um auf den zunehmenden Mangel an Fachkräften im Bausektor zu reagieren.

Neue Managementprinzipien, wie Lean Construction oder Just in Sequence Fertigung stellen Bauunternehmen vor weitere Herausforderungen bei der Arbeitsorganisation.

Da eine vollständige Automatisierung von Prozessketten beim aktuellen Stand der Technik nicht möglich ist, müssen Szenarien für die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter spezifiziert werden. Die Formen und Randbedingungen dieser Zusammenarbeit sind, insbesondere im Bauwesen, noch nicht vollständig erforscht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, welche Rahmenbedingungen erfüllt werden müssen, um eine Zusammenarbeit von Menschen und Robotern im Bauwesen zu ermöglichen. Des Weiteren sollen ausgehend von einer Untersuchung der Rahmenbedingungen die relevanten Spezifikationen zum Robotereinsatz erarbeitet werden. Dabei ist sowohl auf technische als auch wirtschaftliche Aspekte einzugehen. Ziel der Arbeit ist es, den gemeinsamen Einsatz von Menschen und Robotern besser zu verstehen und formal beschreiben zu können.

Die erarbeiteten Rahmenbedingungen und Spezifikationen sollen anhand eines komplexen oder mehrerer einfacher Beispielszenarien dargestellt werden.

Arbeitsumfang:

Im Rahmen der Ausarbeitung sollen die folgenden Punkte bearbeitet werden:

1. Bestandsanalyse hinsichtlich des Robotereinsatzes im Bauwesen.
2. Erarbeiten der rechtlichen, technischen und sozialen Rahmenbedingungen für eine Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern.
3. Zusammenstellung von Spezifikationen für einen effizienten Einsatz von Mensch und Roboter im Bauwesen.
4. Demonstration der Anwendbarkeit der erarbeiteten Spezifikationen in ausgewählten Beispielszenarien.

Wissenschaftlicher Betreuer:

Dipl.-Ing. Adrian Schubert

Institut für Bauinformatik

Technische Universität Dresden

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel

Institut für Bauinformatik

Technische Universität Dresden

Ausgehändigt am:

Einzureichen am:

Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel

Verantwortlicher Hochschullehrer

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsinstitution vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Dresden, den

.....

(Unterschrift)

Abstract

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, wie die Zusammenarbeit von Menschen und Robotern auf der Baustelle stattfinden kann. Als Grundlage für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit im Bauwesen wurde zunächst ermittelt, welche Roboter bereits für einen Einsatz auf der Baustelle existieren und inwieweit diese geeignet sind, mit Menschen zusammenzuarbeiten. Die rechtlichen, technischen und sozialen Rahmenbedingungen für eine Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern wurden erarbeitet. Aufbauend auf diesen Rahmenbedingungen wurden Spezifikationen zusammengestellt, die einen effizienten Einsatz von Menschen und Robotern im Bauwesen ermöglichen. Die Anwendbarkeit dieser Spezifikationen wurde in einem Beispielszenario demonstriert. Zu diesem Zweck wurde der Bau eines Gebäudes beschrieben, bei dessen Planung die Spezifikationen für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit berücksichtigt wurden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1. Einleitung.....	1
2. Robotik im Bauwesen.....	4
2.1 Überblick über ausgewählte Robotertypen.....	7
2.2 Stand der Technik.....	10
2.2.1 Roboterarme.....	11
2.2.2 Mobile autonome Roboter	13
2.2.3 Tragbare Roboter	20
2.2.4 Automatisierte Baustellen	24
2.3 Tabellarische Übersicht der betrachteten Roboter.....	29
2.4 Produktivität von Robotern auf Baustellen	30
3. Aktuelle Rahmenbedingungen für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit im Bauwesen	36
3.1 Technische Rahmenbedingungen	36
3.1.1 Planung von Gebäuden und Baustellen.....	36
3.1.2 Einsatzgebiete von Robotern.....	40
3.1.3 Forschung und Entwicklung	41
3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	43
3.2.1 Sicherheitsbestimmungen.....	43
3.2.2 Datenschutz	47
3.2.3 Verantwortung und Haftung	48
3.3 Soziale Rahmenbedingungen	50
3.3.1 Weiterbildung	50

3.3.2	Soziale Absicherungen	51
3.4	Fazit.....	52
4.	Verbesserte Mensch-Roboter-Zusammenarbeit.....	53
4.1	Technische Spezifikationen.....	53
4.1.1	Planung.....	53
4.1.2	Einsatzgebiete von Robotern.....	54
4.1.3	Mensch-Roboter-Schnittstellen.....	59
4.1.4	Energieversorgung	61
4.1.5	Informationsverarbeitung	62
4.1.6	Navigation auf der Baustelle	64
4.2	Wirtschaftliche Aspekte des Robotereinsatzes	67
5.	Beispielszenario.....	70
5.1	Anwendung der technischen Spezifikationen	71
5.1.1	Planung und Einsatzgebiete	71
5.1.2	Mensch-Roboter-Schnittstellen.....	79
5.1.3	Informationsverarbeitung	85
5.1.4	Energieversorgung	86
5.1.5	Navigation auf der Baustelle	89
5.2	Wirtschaftliche Kenngrößen	92
5.3	Auswertung des Beispielszenarios	93
6.	Schlussbetrachtung und Ausblick.....	96
7.	Literaturverzeichnis.....	99
8.	Anhang.....	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 HRP-5P mit Sperrholzplatte	13
Abbildung 2 Hadrian X mit LKW-Unterbau	16
Abbildung 3 Fortis Exoskelett.....	21
Abbildung 4 Daewoo Exoskelett	23
Abbildung 5 Shimizu SMART-System.....	24
Abbildung 6 Schraubroboter auf Schienen.....	27
Abbildung 7 Beeinflussbarkeit der Kosten.....	38
Abbildung 8 Sicherheitszonen für Roboter adaptiert aus Mitka et al., 2012	45
Abbildung 9 Baustelleneinrichtung	74
Abbildung 10 Mauern EG.....	77
Abbildung 11 Position des Hadrian X und Austauschzone in den OG	78
Abbildung 12 Austauschzone Lager	79
Abbildung 13 Graph 1.OG	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Roboterübersicht	29
Tabelle 2 Arbeitszeitrichtwerte nach Plümecke – Preisermittlung für Bauarbeiten 27. Auflage.....	67
Tabelle 3 Kostenrichtwerte nach Plümecke – Preisermittlung für Bauarbeiten 27. Auflage	68
Tabelle 4 Maximale Roboterkosten über den Lebenszyklus.....	69

Abkürzungsverzeichnis

MRZ	Mensch-Roboter-Zusammenarbeit
CF	Construction-Factory
KI	Künstliche Intelligenz
AI	Artificial intelligence
XAI	Explainable artificial intelligence
IFC	Industry Foundation Classes
BIM	Building Information Modeling
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau Unternehmen
JARA	Japan Robot Association
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
RIA	Robotics Institute of America
IF	In Situ Fabricator
SMART	Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology
RCA	Robotics & Crane based Automated Construction System
WLAN	Wireless Local Area Network
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge

1. Einleitung

Die Bauindustrie ist einer der größten Arbeitgeber in Deutschland und für rund 10 % des Bruttoinlandsprodukts verantwortlich (Bauindustrie, 2019a). Der wachsende Bedarf an innerstädtischem Wohnraum und umfangreiche Investitionsmaßnahmen im Bereich der Infrastrukturbauten bescheren den deutschen Bauunternehmen eine gute Auftragslage (Bauletter, 2020; BMWi, 2019; Statistisches Bundesamt, 2018). Allein für den Ersatz oder die Erneuerung baufälliger Brücken sind bis 2030 Investitionen von fast 10 Mrd. € nötig. Bei weiterhin steigender Auftragslage könnte es Bauunternehmen in Zukunft schwerfallen, den wachsenden Bedarf an Bauleistung zu decken. Trotz steigender Löhne verzeichnet die Bauindustrie verglichen mit anderen Industriezweigen einen deutlich höheren Fachkräftemangel, der zumindest teilweise als Konsequenz der wenig attraktiven, körperlich anstrengenden und zudem gefährlichen Arbeit auf der Baustelle zu begreifen ist (Bauindustrie, 2019b; Weitz, 2019). Dieser Fachkräftemangel wird durch die alternde Gesellschaft in Deutschland noch verstärkt (Statistisches Bundesamt, 2019a).

Mit vergleichbaren Problemen sieht sich Japan bereits seit den 1990er Jahren konfrontiert: Eine alternde Gesellschaft, sinkende Geburtenraten und der steigende Bedarf an Immobilien führten dort gerade auch in der Bauwirtschaft zu einem Fachkräftemangel (Institut für Modernes Japan, 2015). Zur Deckung des Bedarfs an Immobilien wurden Systeme entwickelt, die ein nahezu vollständig automatisches Errichten von Gebäuden erlauben. Die in Japan entwickelten Lösungen eignen sich primär als Vorbild für teilautomatisierte Baustellen, wie sie auch in Deutschland realisierbar wären.

Um dem wachsenden Bedarf an Immobilien und Infrastrukturbauten in Deutschland gerecht zu werden, müssen Wege gefunden werden, die Produktivität der Bauindustrie bei stagnierenden Beschäftigungszahlen zu erhöhen. Eine denkbare Lösung des Problems stellt der vermehrte Einsatz von Robotern auf

Baustellen dar. Der in der verarbeitenden Industrie seit den 1970er Jahren konsequent vorangetriebene und sich kontinuierlich erweiternde Einsatz geeigneter Roboter führte in diesem Bereich zwischen 1995 und heute zu einem jährlichen Produktivitätszuwachs von durchschnittlich 3,6 %. Demgegenüber konnte die Baubranche im selben Zeitraum ihre Produktivität lediglich um durchschnittlich 0,26 % pro Jahr steigern (McKinsey, 2017). Anders als in einer Fertigungshalle der stationären Industrie handelt es sich bei der Arbeitsumgebung auf der Baustelle nicht um ein vollständig kontrolliertes Umfeld, was den Einsatz von Robotern beträchtlich erschwert. Bei der Errichtung von Bauwerken ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Arbeitsschritten notwendig, was die Komplexität eines Roboters für den Baustelleneinsatz erhöht. Allein für die Herstellung einer Stahlbetonwand muss zuerst die Verschalung gebaut, die Bewehrung eingelegt und die Wand betoniert und verdichtet werden. Die notwendige Flexibilität der Roboter, um möglichst viele Arbeiten auf der Baustelle durchzuführen, ist beim aktuellen Stand der Technik nicht in allen Fällen gegeben. Mit einem Einsatz von Robotern auf der Baustelle befassen sich bereits Forschungsprojekte von Hochschulen und deren Industriepartnern weltweit (DFAB, n.d.; Handwerk Digital, 2019).

Roboter, die einzelne Aufgaben auf der Baustelle ausführen, wurden prototypisch bereits im Rahmen diverser Forschungsprojekte untersucht, wie zum Beispiel im Projekt Robonet 4.0, in dem ein Bohrroboter für die Baustelle entwickelt und gebaut wurde. Durch den Einsatz dieser Roboter können besonders hohe Arbeitsleistungen erzielt werden (Handwerk Digital, 2019).

Sollen alle Arbeiten auf der Baustelle automatisiert werden, führt dies zu hohen Investitionskosten, die nur von den größten Bauunternehmen getragen werden können. Kleinere Bauunternehmen können auf diese Weise nicht von den Entwicklungen auf dem Gebiet der Robotik profitieren. Damit der Einsatz von Robotern auch außerhalb der großen Bauunternehmen zu einer Steigerung der Produktivität führt, müssen Wege gefunden werden, um möglichst viele Arbeiten

auf der Baustelle zu automatisieren und die Zahl der insgesamt eingesetzten Roboter zu minimieren.

Beim derzeitigen Stand der Technik erscheint eine weitgehende oder gar vollständige Automatisierung des Bauprozesses wenig realistisch, jedoch können Roboter auf der Baustelle besonders repetitive oder körperlich anspruchsvolle Tätigkeiten, wie das Mauern, ausüben, um den Menschen zu entlasten und die Produktivität zu erhöhen.

In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit die Zusammenarbeit von Robotern und Menschen auf der Baustelle realisierbar ist, wenn dafür Roboter verwendet werden, die nicht speziell für einen gemeinsamen Einsatz mit Menschen konzipiert sind. Zum Zweck der Zusammenarbeit werden neben technischen auch rechtliche und soziale Rahmenbedingungen in den Blick genommen, die den gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen auf der Baustelle erlauben bzw. bestimmen. Anhand dieser Rahmenbedingungen wird untersucht, wie Roboter und Menschen gemeinsam eingesetzt werden können, um die Bauzeit zu verkürzen und Baukosten zu reduzieren. Die erarbeiteten Spezifikationen für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit (MRZ) werden anhand eines Beispielszenarios auf ihre Praxistauglichkeit überprüft. Zu diesem Zweck wird der Bau eines Gebäudes geplant, bei dessen Erstellung eine enge Zusammenarbeit von Menschen und Robotern vorgesehen ist. Auf Grundlage der Planung wird die Bauphase beschrieben und untersucht, inwieweit der Robotereinsatz eine merkliche Reduzierung der Bauzeit und -kosten im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise in Aussicht stellt.

2. Robotik im Bauwesen

Die Auseinandersetzung mit wesentlichen Aspekten der Robotik im Bauwesen verlangt zunächst eine Klärung des Terminus „Roboter“, da eine allgemeinverbindliche Definition des Begriffs bislang nicht gefunden ist. Die Definition eines Roboters hat sich nicht nur im Verlauf der Zeit stark verändert, sondern variiert zudem von Land zu Land. Wichtig für die Auseinandersetzung mit Robotern ist vor allem eine Abgrenzung von dem allgemeineren Begriff „Maschine“. Lange wurden als Roboter nur solche Geräte angesehen, die, wie in Science-Fiction Romanen, eine humanoide Form haben. Der Begriff wird jedoch mehr und mehr allgemein für komplexe Maschinen verwendet.

So handelt es sich laut der VDI-Richtlinie 2860 bei einem Industrieroboter um einen universell einsetzbaren Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Die Ausrüstbarkeit mit verschiedenen Werkzeugen ist ein zentraler Punkt in der Definition gemäß VDI (Weller, n.d.).

Das Robotics Institute of America (RIA) hingegen legt fest, dass es sich bei einem Roboter um ein programmierbares Mehrzweck-Handhabungsgerät handelt, das für das Bewegen von Material, Werkstücken, Werkzeugen oder Spezialgeräten genutzt wird. Ein frei programmierbarer Bewegungsablauf macht den Roboter dabei für verschiedenste Aufgaben einsetzbar (Inc., n.d.).

Während die deutschen und amerikanischen Richtlinien einem enger gefassten Verständnis des Begriffs „Roboter“ verpflichtet sind, werden die Roboter in den Definitionen der Japan Robot Association (JARA) nach Funktionalität und Flexibilität kategorisiert.

Gemäß der JARA werden Roboter deutlich genauer in einzelne Kategorien unterteilt, um zu entscheiden, ob es sich bei einer Maschine um einen Roboter handelt und wenn ja, um welche Art. Auf Grundlage der JARA-Einteilung lassen sich

die folgenden Roboter kategorien unterscheiden, die festgelegt wurden um eine differenzierte Betrachtung der Roboter zu ermöglichen.

- Manueller Manipulator: Ein Arbeitsgerät mit mehreren Freiheitsgraden, das vom Bediener bewegt und nicht durch ein Programm gesteuert wird.
- Roboter mit festem Handlungsablauf: Ein Arbeitsgerät, das wiederholt ein gleichbleibendes Bewegungsmuster abarbeitet; die Änderung dieses Bewegungsablaufes ist aufwändig.
- Roboter mit variablem Handlungsablauf: Ein Arbeitsgerät, dessen Bewegungsmuster ohne großen Aufwand geändert werden kann.
- Playback Roboter: Der Bediener muss das Bewegungsmuster einmal vorgeben und dadurch in den Programmspeicher einspeichern. Daraufhin kann das Bewegungsmuster wiederholt werden.
- Numerisch gesteuerter Roboter: Ein Arbeitsgerät, dessen Bewegungsablauf im Voraus genau einprogrammiert wird.
- Intelligenter Roboter: Ein Arbeitsgerät, das mit verschiedenen Sensoren ausgestattet ist, um auf die Umwelt zu reagieren. Die Roboter verfügen also über ein gewisses Maß an Intelligenz; dadurch können Aufgaben in variablen Umgebungen gelöst werden.

Da eine vollständige Automatisierung von Baustellen nicht realistisch erscheint, könnten Roboter in Zukunft gemeinsam mit Menschen auf der Baustelle eingesetzt werden. Die Zusammenarbeit zwischen Robotern und Menschen führt dazu, dass die Anforderungen an Roboter steigen. Ein Roboter, der mit Menschen zusammenarbeiten soll, muss nicht nur in der Lage sein, seine eigene Aufgabe zu erfüllen, sondern auch im Stande sein, auf den Menschen im gemeinsamen Arbeitsbereich zu reagieren und für dessen Sicherheit zu sorgen. Je nachdem, wie Menschen und Roboter zusammenarbeiten, ändern sich die Anforderungen an den Roboter. Zur Bewertung der Zusammenarbeit werden die folgenden Level eingeführt, die in ihrer Komplexität ansteigen. Es liegen bereits Vorschläge zur

Kategorisierung der Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern vor, jedoch gehen diese mehr auf die Unterscheidung zwischen getrenntem und gemeinsamen Arbeitsraum ein (Weber, 2017). Als Arbeitsraum wird der Bereich bezeichnet, den Roboter oder Menschen nutzen, um ihre Arbeit auszuführen. Da eine räumliche Trennung von Robotern und Menschen auf der Baustelle nur selten möglich ist, werden die unterschiedlichen Formen der Zusammenarbeit angepasst.

- Level 0: Keinerlei Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern, die Arbeitsräume sind strikt voneinander getrennt.
- Level 1: Menschen und Roboter teilen sich einen Arbeitsraum, eine direkte Zusammenarbeit findet jedoch nicht statt.
- Level 2: Die Zusammenarbeit findet in Form von Austauschprozessen statt. Dies ist beispielsweise bei der Übergabe von Material oder eines Werkstücks der Fall.
- Level 3: Roboter und Menschen arbeiten gemeinsam und zeitgleich an einem Werkstück

Verglichen mit den bereits existierenden Einteilungen der Zusammenarbeitsszenarien erlaubt die Einführung von vier Levels, von denen sich drei mit der Arbeit in einem gemeinsamen Arbeitsraum befassen, eine bessere Beschreibung der Zusammenarbeit in diesem Bereich. Gleichzeitig können in Abhängigkeit des Levels der Zusammenarbeit auch Anforderungen an Roboter spezifiziert werden. Ein Roboter, der sich lediglich im gleichen Arbeitsraum wie ein Mensch befindet, ist deutlich weniger komplex als einer, der direkt mit einem Menschen zusammenarbeitet, um ein Bauteil zu montieren.

2.1 Überblick über ausgewählte Robotertypen

In der verarbeitenden Industrie werden heute unterschiedlichste Roboter eingesetzt, die sich allesamt den von der JARA erstellten Kategorien zuordnen lassen. Die stationären Industrien zeichnen sich in der Regel durch einen kontrollierten Arbeitsraum und eine hohe Stückzahl an produzierten Gütern aus (Mitsch, 2018). Die Optimierung von Produktionszeit und -kosten spielt besonders in der verarbeitenden Industrie eine große Rolle. Ganze Fertigungshallen werden für die Fertigung einer Produktreihe gebaut und optimiert. Künstliche Intelligenz, Mobilität und Flexibilität spielen eine untergeordnete Rolle, da die Produktionsverfahren nicht flexibel sind.

Demgegenüber müssen die in der Bauindustrie eingesetzten Roboter über eine gewisse Anpassungsfähigkeit verfügen, weil sich die Produktionsbedingungen auf der Baustelle von Tag zu Tag ändern. Da es sich bei Gebäuden um Unikate handelt, variieren auch die jeweiligen Produktionsprozesse und deren sequenzielle Abfolge. Die nötige Anpassungsfähigkeit setzt voraus, dass Roboter über ein gewisses Maß an Sensorik und Intelligenz verfügen, um ihre Umgebung wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Daher werden im Folgenden vorwiegend die nach der JARA als intelligente Roboter bezeichneten Roboter betrachtet. Diese können abhängig von ihrer Bauart und Funktionalität in Kategorien eingeteilt werden, die sich in ihrer Komplexität voneinander unterscheiden.

Die Roboter, die näher betrachtet werden, lassen sich in drei Kategorien einordnen. Bei der ersten Kategorie der Roboter handelt es sich um mobile autonome Roboter, die in der Lage sind, sich frei zu bewegen und Aufgaben zu erledigen. Dazu kommt die Kategorie der Roboterarme, die lediglich Armbewegungen ausführen. Bei der dritten Kategorie handelt es sich um tragbare Roboter, die eigenständig keine Tätigkeiten ausüben können, sondern den Menschen unterstützen sollen (R. Y. M. Li, 2018; R. Y. M. Li & Ng, 2018). Zusätzlich werden Szenarien betrachtet, in denen Roboter zusammenarbeiten, um gemeinsam komplexere Aufgaben zu lösen (siehe Kapitel 2.2.4).

Innerhalb dieser Arbeit wird die erste Kategorie nicht streng als humanoide oder anderweitig an die Natur angelehnte Roboter betrachtet. Die Arme und Beine, wie von Li beschrieben (R. Y. M. Li & Ng, 2018), werden in dieser Arbeit als Mittel für den Werkzeugeinsatz und für die Fortbewegung betrachtet. Somit fallen beispielsweise auch Roboter mit Rädern in die Kategorie der mobilen autonomen Roboter. Durch ihre Vielseitigkeit eignen sich diese Roboter am besten für einen Einsatz auf der Baustelle, sind jedoch auch am komplexesten, da sie eigenständig Aufgaben bewältigen und auf die sich ständig verändernde Umwelt reagieren müssen. Roboter, die sich am Vorbild der Natur und speziell am Vorbild des Menschen orientieren, sind am flexibelsten in ihrer Funktion. Die Komplexität dieser Roboter erhöht zwar ihr Potenzial, schränkt aber auch ihre Verwendungsmöglichkeiten ein, da sie in ihrer Leistungsfähigkeit den Roboterarmen unterlegen sind.

Auch die Roboterarme können auf der Baustelle eingesetzt werden, sind jedoch in ihrer Anwendung durch die fehlende selbstständige Mobilität eingeschränkt und daher vor allem für die Vorfertigung geeignet. Auf der Baustelle lassen sie sich insbesondere bei der Montage von Bauteilen einsetzen. Denkbar ist beispielsweise das Anbringen von Fassadenelementen durch Roboterarme. Eine Änderung der Position des Roboters durch den Menschen ist dabei möglich. Vorzugsweise werden die hochfunktionalen Arme mit einer Fortbewegungsmethodik kombiniert. Dadurch fallen sie, je nach Betrachtungsweise, in die Kategorie der mobilen autonomen Roboter.

Da tragbare Roboter den Arbeiter in seiner Tätigkeit lediglich unterstützen und keine Aufgaben selbstständig durchführen, ist ihr Einsatz auf der Baustelle verhältnismäßig einfach zu bewerkstelligen. Durch ihre unterstützende Funktion können sie flexibler eingesetzt werden als vollautomatische Single-Task-Roboter. Tragbare Roboter können in Form eines Exoskeletts, wie zum Beispiel des von Lockheed Martin entwickelten FORTIS, zum Einsatz kommen. Sie können unter anderem genutzt werden, um schwere körperliche Arbeit wie das Heben von Materialien oder schweren Werkzeugen zu erleichtern. Dadurch wird nicht nur die

Produktivität erhöht, es werden darüber hinaus auch die negativen gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen reduziert (Lockheed Martin, 2018; Pan, Linner, Pan, & Bock, 2018). Negative gesundheitliche Auswirkungen resultieren beispielsweise aus einer gebückten Arbeitshaltung oder dem häufigen Heben schwerer Lasten.

Besonders hohe Produktivität kann erreicht werden, wenn die unterschiedlichen Robotertypen gleichzeitig zum Einsatz kommen. Mobile Roboter können für den Materialtransport genutzt werden, während die stationären komplexen Roboterarme das angelieferte Material direkt verbauen. Eine reibungslose Zusammenarbeit mehrerer Roboter erhöht jedoch die Komplexität des betrachteten Szenarios erheblich. Roboter müssen untereinander kommunizieren, um sich nicht gegenseitig zu behindern und ihre Aufgaben gemeinsam zu erfüllen. Die Zusammenarbeit verschiedener Roboter findet bereits in der Vorfertigung von Betonfertigteilen und im Hochhausbau in Japan und Südkorea statt. (T. Bock, 2016). Besonders interessant an den automatisierten Baustellen sind für die Forschung die Organisation der Baustelle und die Formen der Zusammenarbeit. Produktionsprinzipien der automatisierten Baustelle lassen sich auf ein Szenario übertragen, in dem Menschen und Roboter zusammenarbeiten.

Speziell für die Zusammenarbeit mit Menschen konzipierte Roboter (Cobots) werden in der Arbeit nicht weiter betrachtet, da keiner der im Bauwesen eingesetzten Roboter in diese Kategorie fällt. Stattdessen wird untersucht, inwiefern sich die für das Bauwesen vorhandene Robotertechnik in einem Zusammenarbeitsszenario einsetzen lässt.

2.2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden verschiedene Roboter betrachtet, die bereits im Bauwesen im Einsatz sind oder deren zukünftiges Potenzial in der Forschung aufgezeigt wird. Es werden lediglich Roboter ausgewählt, die auf Grund ihres hohen Automatisierungsgrads eine besonders hohe Produktivität erzielen oder einen besonderen technischen Fortschritt darstellen. Als besonderer Fortschritt wird es beispielsweise angesehen, wenn sich Roboter besonders gut für unterstützende Aufgaben auf der Baustelle eignen. Ferngesteuerte Baumaschinen finden hier keine Betrachtung, da das Ziel ist, aktuell von Menschen ausgeführte Arbeiten auf der Baustelle zu automatisieren.

Durch den hohen Grad an Variabilität auf der Baustelle wird der Robotereinsatz gegenüber den stationären Industrien stark erschwert. Zukünftige Entwicklungen werden es Robotern jedoch ermöglichen, besser auf ihre Umgebung zu reagieren, und so ihr Einsatzgebiet vergrößern. Die Wahrnehmung von Umgebungseinflüssen und eine entsprechende Reaktion darauf sind besonders wichtig für einen Einsatz auf der Baustelle, da sich auch Menschen zusammen mit Robotern in einem gemeinsamen Arbeitsraum befinden können. In der Automobilindustrie hingegen sind Roboter und Menschen in der Regel streng voneinander getrennt, um die Gefahr für Menschen zu reduzieren (Jia et al., 2018). Auf der Baustelle ist eine derartige Trennung jedoch noch nicht möglich.

Häufig sind die am Bau beteiligten Akteure – Architekten – Bauunternehmen und Zulieferer – unzureichend koordiniert (Şahhanoğlu, Călbureanu, & Smid, 2016). Dieser Mangel an Koordination erhöht die nötige Anpassungsfähigkeit der Roboter auf ein Maß, das zum jetzigen Zeitpunkt noch unerreichbar ist. Erschwert wird die Anpassung der Roboter an unterschiedliche Arbeiten auch dadurch, dass in der Bauindustrie häufig mit schweren Bauelementen gearbeitet wird, was eine ausreichende Leistungsfähigkeit des Roboters voraussetzt (Şahhanoğlu et al., 2016). Gleichzeitig sind die Arbeitsbereiche auf Baustellen häufig nur schwer

zugänglich, wodurch die Abmessungen des Roboters stark eingeschränkt werden. Ein Roboter, der verputzen oder streichen soll, muss beispielsweise durch eine Tür passen, muss aber gleichzeitig genug Reichweite haben, um alle zu streichenden Flächen zu erreichen.

Möglichkeiten und Grenzen eines Einsatzes der vorgestellten Roboter sollen untersucht werden. Dabei werden Informationen hinsichtlich des Einsatzgebietes, der Arbeitsleistung, der Energieversorgung und des Preises der Roboter in den Blick genommen, falls diese Informationen öffentlich verfügbar sind.

2.2.1 Roboterarme

Die Firma ODICO Formwork Robotics bietet ein Robotersystem an, das auf Grund seiner hohen Flexibilität unterschiedliche Aufgaben erfüllen kann, die auf einer Baustelle anfallen. Ein Robotersystem, bestehend aus einem Roboterarm und unterschiedlichen Werkzeugen, wird in einen Standard-Transportcontainer gebaut und kann für unterschiedliche Aufgaben konfiguriert werden. Dazu zählt zum Beispiel der Bau von komplexen Schalungsformen, die aus Industrieschaum hergestellt werden. Die bereitgestellte Software ermöglicht es, 3D-Modelle direkt in Roboterbewegungen umzusetzen (Odico, 2019). Die Energieversorgung des Robotersystems erfolgt auf Grund der stationären Bauweise über einen Anschluss an das Stromnetz. Wegen der fehlenden Mobilität kann der Roboter sich das benötigte Material nicht selbst holen oder das Endprodukt abliefern. Für diesen Zweck wird mindestens ein weiterer Roboter oder ein Mensch mit einem Gabelstapler benötigt. Es handelt sich also um eine Level-2-MRZ.

Während ODICO Formwork Robotics sich vorwiegend mit dem Bau von Schalung für den Stahlbetonbau beschäftigt, setzen Firmen wie „hyperion robotics“ auf den Betondruck, der keine Schalung benötigt. Dafür werden bei „hyperion robotics“ handelsübliche Roboterarme mit speziellen Werkzeugen und Software ausgerüstet, um dann vielfältige Strukturen ohne Schalung direkt zu drucken (Hyperion Robotics, 2019). Durch das Wegfallen der Schalung wird sowohl Zeit als

auch Material eingespart, was Kosten und Bauzeit für Bauwerke reduziert. Erste Häuser, die mit Hilfe von Betondruck-Technologie gebaut wurden, kosteten verglichen mit der herkömmlichen Bauweise ca. 20 % weniger (3Dnatives, 2018). Ähnliche Technologien gibt es auch von Herstellern wie Sika, Apis Cor und vielen weiteren. Sie alle sind in der Lage, vorgegebene Strukturen in kurzer Zeit herzustellen. Jedoch mangelt es den Robotern an Mobilität, was einen Einsatz auf einer großen und komplexen Baustelle erschwert. Die Stromversorgung erfolgt in der Regel über einen Anschluss an das Stromnetz. In Verbindung mit einem mobilen Untersatz oder einem Kran, der den Roboterarm entsprechend neu positioniert, können Betondrucker vielfältig eingesetzt werden. Die Zusammenarbeit zwischen Betondruckern und Menschen ist je nach Modell und Arbeitsschritt auf den MRZ-Levels 1–3 möglich. Oft müssen Menschen zum Beispiel die Bewehrung verlegen oder die Wand verputzen.

Forschungsprojekte wie ECHORD und ECHORD++ beschäftigen sich damit, wie für den stationären Einsatz konzipierte Industrieroboter mit nur wenigen Anpassungen direkt auf der Baustelle eingesetzt werden können. Die Ergebnisse dieser Projekte beschränken sich aktuell jedoch vorwiegend auf die Anpassung von Robotern für das Greifen und Montieren kleiner Bauteile, was die möglichen Arbeitsbereiche im Bauwesen stark einschränkt.

2.2.2 Mobile autonome Roboter

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, werden nicht nur humanoide Roboter betrachtet, sondern all jene, die über einen eigenen Antrieb verfügen und mit Werkzeugen ausgestattet sind.

Einer der fortschrittlichsten Roboter, die zurzeit verfügbar sind, ist der HRP-5P des japanischen National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), der in Abbildung 1 zu sehen ist.

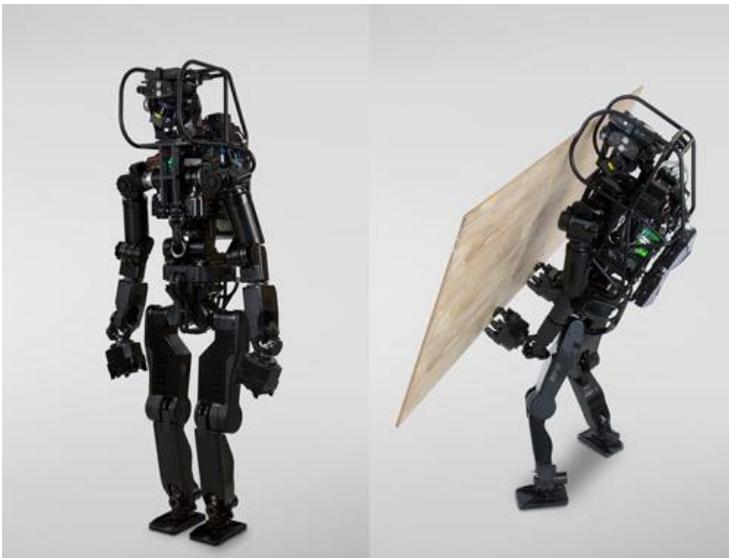


Abbildung 1 HRP-5P mit Sperrholzplatte¹

Dabei handelt es sich um einen humanoiden Roboter. Er ist 1,82m groß und wiegt 101 kg. Seine Bauweise ist der Anatomie des Menschen nachempfunden und er ist so konstruiert, dass er Aufgaben wie ein Mensch erfüllen kann. Das ermöglicht es ihm, Werkzeuge wie Bohrer oder Schraubenzieher zu benutzen und große Objekte, wie beispielsweise Gipskartonplatten, zu tragen. Er fällt also in die Kategorie der

1

https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_e/latest_research/2018/20181116/photo.jpg (2018) (10.02.2020)

multi-task-Robots. Durch seine hohe Beweglichkeit ist es dem HRP-5P möglich, wie in Abbildung 1 zu sehen, Gipskarton- oder Sperrholzplatten mit einer Abmessung von 1820x920x10 mm und einem Gewicht von bis zu 13 kg zu tragen zu und verbauen. Mit einem horizontal ausgestreckten Arm kann er ein Gewicht von 2,9 kg tragen, was einer Steigerung von über 100% gegenüber dem Vorgängermodell entspricht. Er ist bedingt in der Lage, mit Menschen zusammenzuarbeiten, zum Beispiel Bauelemente oder Materialien kooperativ zu tragen. Es ist also theoretisch eine Level-3-MRZ möglich. Um auf die Umgebung reagieren zu können, ist er mit Sensoren ausgerüstet, die alle drei Sekunden eine 3D-Messung der Umgebung durchführen. Seine Anpassungsfähigkeit erhält der Roboter aus einem lernfähigen neuronalen Netzwerk, das in einer virtuellen Umgebung trainiert wurde (Advanced Industrial Science and Technology, 2018). Bereits der älteren Version dieses Roboters (HRP2) war es möglich, Baugeräte zu steuern und somit einen Teil des Bauprozesses zu automatisieren (Linner, 2013). Auch wenn die Anwendung des HRP-5P in der Praxis noch durch seine geringe maximale Tragfähigkeit eingeschränkt ist, könnte er dem Menschen bereits jetzt eintönige und ermüdende Arbeit abnehmen. Durch die Erhöhung der Gelenke auf 37 und den Einsatz besserer Motoren ist der HRP-5P vielseitiger einsetzbar als sein Vorgängermodell und Roboter anderer Hersteller und Forschungsinstitute.

Der HRP-5P kann durch seine humanoide Bauart eine Vielzahl von Aufgaben erledigen und auch in beengten Verhältnissen eingesetzt werden. Er ist im Stande, unterschiedliche Werkzeuge zu greifen und zu verwenden, was ihn gegenüber klassischen Single-Task-Robots überlegen macht. Durch seine hoch entwickelte Sensortechnik ist es ihm möglich, Aufgaben unabhängig von menschlichen Bedienern zu bearbeiten. Seine Arbeitsleistung ist dabei verglichen mit dem Menschen etwas niedriger, jedoch kann er theoretisch rund um die Uhr arbeiten.

Beim Tragen von großen Bauteilen, wie beispielsweise Sperrholz- oder Gipskartonplatten, werden die optischen Sensoren am Kopf des Roboters durch die Bauteile verdeckt. In Abbildung 1 ist zu sehen, wie eine Sperrholzplatte das Sichtfeld einschränkt. Zwar kann der HRP-5P sich seine Umgebung einprägen und

auch ohne Sicht navigieren, jedoch kann er dann nicht mehr auf Veränderungen reagieren. Das bedeutet, dass sich sein Umfeld im Nachhinein nicht wesentlich verändern darf. Menschen, die seinen Arbeitsraum betreten, können dann nicht mehr erkannt werden. Eine Beschränkung der maximalen Größe der zu tragenden Bauelemente wäre denkbar, um die Sensoren nicht zu verdecken. Andernfalls müssten zusätzliche Sensoren angebracht werden, die auch beim Tragen größerer Bauteile eine Wahrnehmung der Umgebung ermöglichen. Um den HRP-5P auf der Baustelle zum Tragen von großen Elementen einzusetzen und gleichzeitig den Menschen zu schützen, müssen Lösungen gefunden werden, wie er in einem von menschlichen Arbeitern getrennten Arbeitsraum eingesetzt werden kann.

Ein weiteres Problem resultiert daraus, dass durch seine humanoide Bauform beim Heben von Lasten teils große Hebel auftreten, die die maximale Last, die der HRP-5P heben kann, erheblich reduzieren. Das Verhältnis von Eigengewicht zu maximaler Last ist dabei 7,7:1. Auf Grund dieser Einschränkungen muss der Einsatz des HRP-5P sorgfältig geplant werden, um überhaupt rentabel zu sein. Diese Planung muss auch ein Konzept für die Energieversorgung beinhalten, da der HRP-5P auf Grund seiner hohen Mobilität nur mit Batterie betrieben werden kann.

Ähnlich dem HRP-5P ist der ATLAS der amerikanischen Firma Boston Dynamics, bei dem es sich lediglich um ein Forschungsprojekt handelt. Ziel des ATLAS-Projektes ist es, einen Roboter zu bauen, der in seiner Flexibilität und Leistung dem Menschen möglichst ähnlich oder überlegen ist. Der ATLAS ist nicht für den Einsatz in der Fertigung konzipiert, zeigt jedoch, was in der Forschung schon heute möglich ist. Er ist in der Lage, auf unebenem Terrain zu laufen, zu springen und sogar einige Turnübungen durchzuführen. Beim ATLAS-Roboter handelt es sich lediglich um eine Forschungsplattform, die genutzt wird, um neue Technologien zu testen, bevor diese in kommerziell verfügbaren Robotern verbaut wird (Boston Dynamics, 2019).

Wie auch der HRP-5P kann der ATLAS nur im Batteriebetrieb funktionieren, da seine hohe Mobilität einen Anschluss an das Stromnetz nicht sinnvoll erscheinen lässt.

Der nächste näher betrachtete Roboter ist der Hadrian X der australischen Firma Fastbrick Robotics, der vom Erscheinungsbild nicht in die Kategorie eines mobilen autonomen Roboters passt, jedoch auf Grund seiner Mobilität und Komplexität auch in diese Kategorie eingeordnet wird. Beim Hadrian X handelt es sich um einen Roboterarm mit integriertem Förderband, der auf einen Lastkraftwagen montiert ist, der gleichzeitig als Antrieb sowie als Lager für Baumaterialien dient. Je nach Ausführung ist der Roboterarm bis zu 30 m lang. Der erste kommerzielle Einsatz des Hadrian X war für Ende 2019 geplant. Ob dieser Einsatz tatsächlich stattfand, ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht bekannt. Der Vorgänger des Hadrian X kostete rund 500.000€ (FBR, 2018).



Abbildung 2 Hadrian X mit LKW-Unterbau²

² <https://smallcaps.com.au/wp-content/uploads/2018/06/Fastbrick-Robotics-ASX-FBR-assembles-Hadrian-X-construction-industry-revolution-640x400.jpg>
(10.02.2020)

Laut Angaben des Herstellers ist der Hadrian X in der Lage, das Mauerwerk eines Hauses innerhalb eines Tages zu verlegen. Betrachtungen des vorliegenden Videomaterials haben gezeigt, dass es sich dabei jedoch um ein Haus mit lediglich einem Stockwerk handelt. Laut neuesten Herstellerangaben ist der Hadrian X fähig, pro Stunde das Äquivalent von 1500 NF Ziegeln zu verlegen, was einer Mauerwerksfläche von ca. 26 m² entspricht (FBR, 2019). Abmessungen der verlegbaren Ziegel sind nicht öffentlich zugänglich.

Für den Einsatz des Hadrian X muss das Verlegemuster der Ziegel bereits im Voraus feststehen und kann so optimiert werden, dass ein Minimum an Abfall anfällt. Das Verlegemuster lässt sich aus einem vorhandenen 3D-Modell automatisch erzeugen. Der Hadrian X ist im Stande, die einzelnen Ziegel vor dem Verlegen zuzusägen. Anstelle von Mörtel wird ein Spezialklebstoff verwendet, der schneller abbindet und eine höhere Festigkeit erreicht als herkömmliche Produkte (Autodesk, 2019; Blanco, Fuchs, Parsons, & Ribeirinho, 2018).

Von Nachteil ist der schwere und große Unterbau des Hadrian X. Dieser kann laut Herstellerangaben jedoch ausgetauscht werden. In Abbildung 2 ist der Hadrian X als Aufbau für einen Lastkraftwagen zu sehen.

Auch wenn der Hadrian X bereits einen hohen Automatisierungsgrad hat, ist er nicht in der Lage, komplett selbstständig zu arbeiten. Zur exakten Positionierung der Ziegel wird ein Reflektor benötigt, der eine genaue Lasermessung erlaubt. Dieser Reflektor muss von einem Arbeiter positioniert werden. Es handelt sich also um eine Level-3-MRZ. Wenn trotz einer Auslegerlänge von 30m nicht alle Orte erreicht werden können, an denen Mauerwerk erstellt werden soll, muss der Hadrian X neu positioniert werden. Die Materialanlieferung erfolgt über einen Gabelstapler. Dieser kann entweder von Menschen bedient werden oder automatisiert arbeiten. Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) kommen in automatisierten Lagerhallen zum Einsatz und können mit Anpassungen auch auf Baustellen eingesetzt werden. Beim aktuellen Stand der Technik ist deren Einsatz jedoch auf Grund des schwierigen Terrains und des sich wandelnden Umfelds nur

möglich, wenn besondere Vorkehrungen bei der Baustelleneinrichtung getroffen werden.

Ähnlich wie der Hadrian X funktioniert auch der SAM100, bei dem es sich um einen kürzeren Roboterarm handelt, der auf eine mobile Plattform montiert wird. Dieser arbeitet jedoch nicht so selbstständig wie der Hadrian X und ist nicht im Stande, Steine zuzusägen. Um zu funktionieren, benötigt der SAM100 mindestens zwei Menschen, die mit ihm zusammen die Mauer herstellen. Ein Mensch muss dabei die Ziegel in den Roboter einlegen und ein anderer überschüssigen Putz entfernen oder Randsteine legen. Es handelt sich um eine Level-3-MRZ. Außerdem ist der SAM100 nur in der Lage, auf einer Linie entlang zu fahren. Nach Fertigstellung einer Mauer muss er neu positioniert werden. Gerade bei kleineren Bauprojekten muss der SAM 100 häufiger neu positioniert werden, was mit zusätzlichem Zeit- und Personalaufwand einhergeht. Die Kosten des SAM100 belaufen sich auf 500.000\$ (GCR, 2015).

Der In Situ Fabricator (IF) der ETH Zürich kann, Betonwände durch den Einsatz von Mesh-Mould-Technologie selbstständig herstellen. Bei der Mesh-Mould-Technologie werden die Aufgaben von Schalung und Bewehrung von einem Stahlnetz übernommen, das es erlaubt, komplexe Geometrien ohne Schalaufwand zu produzieren. Der IF ist in der Lage, sich anhand von Markierungen auf der Baustelle zu orientieren. Er fertigt selbstständig die Gitterstruktur an und überwacht seine Arbeit mit Hilfe von zwei Kameras. Der Roboter ist im Stande, sich selbstständig an dem entsprechenden Einsatzort zu positionieren. Die Wand muss dann nur noch von Menschen verputzt werden. Da die betonierten Wände erst erhärten müssen, arbeiten Menschen und Roboter nicht gemeinsam an einem Werkstück. Es handelt sich also um eine Level-2-MRZ. In Verbindung mit anderen Robotern und Techniken der digitalen Fertigung wurde so im Rahmen eines Forschungsprojekts der ETH Zürich ein komplettes Haus gebaut (DFAB, n.d.).

Ein Forschungsprojekt mit dem Namen Robonet 4.0 der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV und der

Handwerkskammer für Schwaben befasste sich bis 2018 damit, einzelne Bauaufgaben zu automatisieren. Ziel des Projektes war es, einen Roboter zu entwickeln, der auf der Baustelle eingesetzt werden kann, um möglichst viele Arbeiten zu unterstützen oder zu automatisieren. Im Zuge einer Analyse der einzelnen Bauprozesse wurde festgestellt, dass Bohren der am häufigsten vorkommende Prozessschritt ist. Bohren ist vor allem beim Innenausbau wichtig; beim Rohbau ist es weniger relevant. Auch in diesem Forschungsprojekt wurde auf die Problematik der Mobilität herkömmlicher Roboterarme aufmerksam gemacht. Die Mobilität wurde dadurch gewährleistet, dass der Roboterarm mit Bohraufsatz auf eine Scherenhubbühne montiert wurde, die sowohl Mobilität als auch Reichweite gewährleistet (Baugewerbe-Magazin, 2018).

Mittels eines integrierten Lasermesssystems sammelt der Roboter Informationen in dem umgebenden Raum und kann diese mit den eingelesenen 3D-Planunterlagen vergleichen, die ihm zur Verfügung stehen. Das Festlegen der Bohrpunkte kann dabei entweder direkt anhand der 3D-Pläne oder aber mit Hilfe einer Augmented-Reality-Brille stattfinden. Anhand von drei Messpunkten ist der Roboter in der Lage, sich selbstständig im Raum zu bewegen, zu orientieren und alle Bohrungen durchzuführen (Handwerk Digital, 2019). Werden Menschen im gleichen Arbeitsraum zur Qualitätskontrolle eingesetzt, stellt dies eine Level-3-MRZ dar.

Forschungsprojekte wie Robonet 4.0 machen deutlich, welche Chancen der Einsatz von Robotern im Bauwesen bietet, zeigen jedoch auch die Limitierungen. Der eingesetzte Roboter ist im Stande, selbstständig zu arbeiten und seine Tätigkeit mit hoher Genauigkeit durchzuführen. Er ist jedoch ohne weitere Umbauten nicht dafür geeignet, andere Aufgaben auf der Baustelle zu übernehmen.

Für den Einsatz im Rahmen von Großprojekten, wie zum Beispiel Brücken, wurde von der Firma Advanced Construction Robotics ein auf ein Schienensystem montierter Roboter entwickelt, der eigenständig Bewehrungsstahl verlegen kann.

Da der Roboter erst Anfang 2020 für den kommerziellen Einsatz erhältlich ist, sind die verfügbaren Informationen auf die Herstellerangaben beschränkt.

Es existieren die Versionen TyBot und IronBot. Der TyBot ist in der Lage, Bewehrungsstahl zu binden, indem er mit optischen Sensoren überprüft, wo Bewehrungsknotenpunkte vorliegen. Der Roboter kann unabhängig vom Wetter eingesetzt werden und rund um die Uhr arbeiten. Er kann in Verbindung mit dem neu entwickelten IronBot genutzt werden, der im Stande ist, Bewehrungsstahl direkt von einem Lagerplatz an den entsprechenden Einsatzort zu transportieren und zu verbauen. Durch die Kombination beider Robotersysteme lassen sich so automatisch Bewehrungskonstruktionen herstellen (ACR, 2019). Beide Roboter sind zur Level-1-MRZ fähig.

Auf Grund ihrer Bauart ist das Einsatzgebiet der Roboter lediglich auf waagerechte Bauteile beschränkt und die Abmessungen der Roboter erfordern eine gewisse Größe der Baustelle. Daten bezüglich der Leistungsfähigkeit des Roboters liegen zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor.

2.2.3 Tragbare Roboter

Das prominenteste Beispiel für tragbare Roboter, die für den Einsatz in der Bauindustrie geeignet sind, stammt von der amerikanischen Firma Lockheed Martin. Dabei handelt es sich um das FORTIS Exoskelett, das nicht eigenständig arbeiten kann, sondern einen Arbeiter unterstützt. In Abbildung 3 ist zu sehen, wie das FORTIS Exoskelett genutzt wird, um ein schweres Werkzeug in der richtigen Einsatzhöhe zu halten, so dass der Mensch weniger belastet wird. Es stehen lediglich die öffentlich verfügbaren Informationen des Herstellers zur Verfügung. Die bisher existierenden Exoskelette werden vorwiegend in kontrollierten Fabrikhallen eingesetzt und sind auch für diesen Zweck konzipiert. Daher liegen keine Informationen vor, wie sie auf einer Baustelle funktionieren können.



Abbildung 3 Fortis Exoskelett³

Der Einsatz des FORTIS ermöglicht es, Werkzeuge bis zu ca. 16 kg ohne Anstrengung zu heben. Arbeiten, die sonst auf Grund schwerer Werkzeuge ermüdend oder gefährlich wären, können so leichter bewerkstelligt werden. Durch Ausgleichsgewichte auf Hüfthöhe lassen sich Belastungen ausgleichen. Das verhindert auf Dauer Schäden an der Wirbelsäule und der Rückenmuskulatur. Das vorliegende Videomaterial zeigt, dass Werkzeuge in eine ringförmige Halterung mit einem Durchmesser von ca. 15 cm eingespannt werden. Der Vorteil dieses Roboters gegenüber Robotern der anderen Kategorien ist, dass er ohne Umstrukturierungen in den vorhandenen Produktionsablauf integriert werden kann, da er nicht eigenständig Leistungen erbringt, sondern lediglich eine unterstützende Rolle einnimmt. Es handelt sich hier um eine Level-3-MRZ.

Durch diesen Roboter können negative gesundheitliche Auswirkungen auf den Arbeiter reduziert werden, was zu geringeren Ausfällen durch Krankheit oder Verletzungen führt. So kann die Produktivität erhöht werden. Die Kosten für ein vollständiges Exoskelett belaufen sich auf 24.750\$ (Lockheed Martin, 2018).

³ <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/mfc/photo/exoskeleton-technologies/mfc-fortis-photo006-h.jpg.pc-adaptive.1920.medium.jpeg> (10.02.2020)

Einschränkungen für den Einsatz von tragbaren Robotern im Bauwesen resultieren ausschließlich aus der stark begrenzten Traglast. Informationen darüber, wie gut sich das FORTIS Exoskelett an unterschiedliche Werkzeuge oder zu tragende Materialien anpassen lässt, stellt Lockheed Martin nicht öffentlich zur Verfügung. Die vorhandenen Informationen lassen jedoch darauf schließen, dass durch unterschiedliche ringförmige Halterungen unterschiedlich große Werkzeuge eingespannt werden können.

Ähnliche Produkte wie das FORTIS-Exoskelett gibt es auch von anderen Herstellern. Diese sind jedoch oft motorisiert, um die zur Verfügung stehende Leistung noch weiter zu erhöhen. Beispielsweise werden von der koreanischen Firma Daewoo motorisierte Exoskelette eingesetzt, die es den Arbeitern zukünftig erlauben, Lasten von bis zu 100 kg ohne Anstrengung zu heben. Beim aktuellen Stand der Technik sind rund 30 kg möglich. Das Exoskelett wiegt dabei weniger als 30 kg und trägt sich durch einen Metallrahmen selbst, sodass der Arbeiter nicht belastet wird (Ackerman, 2014). Neben den verbesserten Arbeitsbedingungen kann dieses System auch die Produktivität der Arbeiter erhöhen, da schwere Werkzeuge oder Bauteile leichter in der Handhabung werden (siehe Abbildung 4), wodurch die Präzision steigt. Es handelt sich hierbei um eine Level-3-MRZ.



Abbildung 4 Daewoo Exoskelett⁴

Auch andere Firmen, wie Ford, Hyundai und Mitsubishi, arbeiten an Exoskeletten zur Unterstützung der Arbeitskräfte. Während es sich bei dem Modell von Ford um ein eher simples Modell, ähnlich dem FORTIS, handelt, arbeitet Hyundai an einem Exoskelett, das durch hydraulische Aktuatoren große Lasten heben kann.

Für einen Einsatz auf der Baustelle muss erprobt werden, wie gut sich Exoskelette in unterschiedlichen Situationen bedienen lassen. Dazu zählen beispielsweise das Erklettern von Leitern sowie das Arbeiten in unebenem Terrain oder in beengten Verhältnissen.

⁴ https://images.newscientist.com/wp-content/uploads/2014/08/mg22329803.900-1_800.jpg?width=800 (10.02.2020)

2.2.4 Automatisierte Baustellen

In Japan kommen erste automatisierte Baustellen bereits seit den 1990er Jahren zum Einsatz, um Hochhäuser teilautomatisiert zu errichten. Das erste eingesetzte System war das Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology (SMART), das von der japanischen Firma Shimizu Construction und sieben anderen Baufirmen entwickelt wurde. Ziel des Forschungsprojektes war es, den wachsenden Bedarf an Immobilien zu decken. Das so entwickelte SMART-System ist in der Lage, nach einer ca. dreiwöchigen Aufbauphase ein Hochhaus vollautomatisch zu bauen.



Abbildung 5 Shimizu SMART-System⁵

Der horizontale Materialtransport erfolgt über Robo-Carrier. Der vertikale Materialtransport erfolgt über ein Aufzugssystem. Roboter vom Typ Robo-Buddy bringen Bauteile in Position und montieren diese. Robo-Welder schweißen die

⁵ https://www.shimz.co.jp/en/company/about/news-release/2018/images/2018006_ph01.jpg (10.02.2020)

Stahlträger fest. Die verwendeten Roboter sind frei beweglich. Nach Abschluss eines Bauabschnitts hebt sich das SMART-System selbstständig über ein hydraulisches System an, um die nächsten Geschosse zu bauen. Durch diese Bauweise ist es möglich, bis zu zwei Geschosse pro Woche fertigzustellen. Das SMART-System wird von einer Wetterschutzhülle abgedeckt (siehe Abbildung 5).

Bei den Robo-Carriern handelt es sich um Gabelstapler, die die Abmessungen des Materials erfassen und auf Hindernisse reagieren. Der Robo-Buddy ist ein Roboter, der aus zwei Roboterarmen besteht, die auf einen fahrbaren Untersatz montiert sind. Er positioniert sich über Kameras und Lasersensoren. Mögliche Einsatzgebiete sind beispielsweise das Montieren von Deckenelementen, Trockenbauwänden oder Fassadenelementen. Robo-Welder werden immer in Paaren eingesetzt. Durch einen fahrbaren Untersatz positionieren sie sich selbstständig am Einsatzort und können dann Stahlstützen symmetrisch schweißen. Alle auf der SMART-Baustelle eingesetzten Roboter sind mobile autonome Roboter. Eine Level-2-MRZ kommt nur bei der Materiallieferung vor. Ansonsten werden Menschen nicht auf der Baustelle benötigt.

Auf Grund der hohen Komplexität des Systems benötigt der Aufbau auf der Baustelle drei bis vier Wochen, was in etwa der Dauer der Rohbauphase eines durchschnittlichen Einfamilienhauses entspricht. Das Smart-System ist jedoch in der Lage, Gebäude mit Grundflächen von 900 m² pro Geschoss zu errichten (Maeda, 1994). Pro Woche können also ca. 1800 m² Geschossfläche hergestellt werden. Das hohe Gewicht von 1200 Tonnen und die Beschränkung auf den Bau von rechteckigen Gebäuden führte schlussendlich jedoch zu einer Reduzierung der Forschungstätigkeit an dem Projekt (T. Bock, 2016; Chu, Jung, Lim, & Hong, 2013).

In Südkorea wurde eine Forschungseinrichtung für roboter- und kranbasierte Bauautomation (RCA) gegründet, um ein ähnliches System wie das SMART-System zu entwickeln, dabei jedoch die technischen Einschränkungen zu überwinden, die aus dem hohen Gewicht und der rechteckigen Geometrie resultieren. Das so entwickelte System ist deutlich leichter als die japanischen Vorgänger und wiegt ca.

200 Tonnen. Auch die Komplexität wurde durch den Wegfall von frei beweglichen Robotern reduziert. Der Einsatz von beweglichen Robotern ist mit einem hohen Organisationsaufwand verbunden, da sich alle Roboter aufeinander abstimmen müssen, um sich nicht gegenseitig zu behindern. Auch werden durch den Einsatz mobiler Roboter spezielle Anforderungen an die Baustelleneinrichtung gestellt, da sichergestellt sein muss, dass sich alle Roboter an den Einsatzort bewegen können. Zu diesem Zweck müssen beispielsweise Rampen eingebaut werden. Während im SMART-System die Arbeiten durch frei bewegliche Roboter durchgeführt werden, ist das vom RCA entwickelte Construction-Factory-System (CF) schienenbasiert. Auch die eigentlichen Konstruktionsroboter, die Schraub- und Schweißarbeiten erledigen, werden über Schienen an den Einsatzort transportiert (siehe Abbildung 6).

Die gesamte Konstruktion kann über ein Hydrauliksystem angehoben werden. Das RCA-System dient nur einem automatisierten Bau der Stahlskelettkonstruktion, da es sich dabei um einen besonders gefährlichen Bauabschnitt handelt. Beim Bau des Stahlskeletts arbeiten Menschen häufig mit schweren Werkzeugen in großen Höhen, was zu einer hohen Absturzgefahr führt (Chu et al., 2013). Roboter können Arbeiten in großer Höhe verrichten und werden dabei durch die schweren Werkzeuge nicht eingeschränkt. Auf Menschen kann bei dieser Bauweise aber nicht gänzlich verzichtet werden, da das System nur auf einige wenige Aufgaben spezialisiert ist. Es liegen nicht genug Informationen vor, um das Level der MRZ zu bewerten.

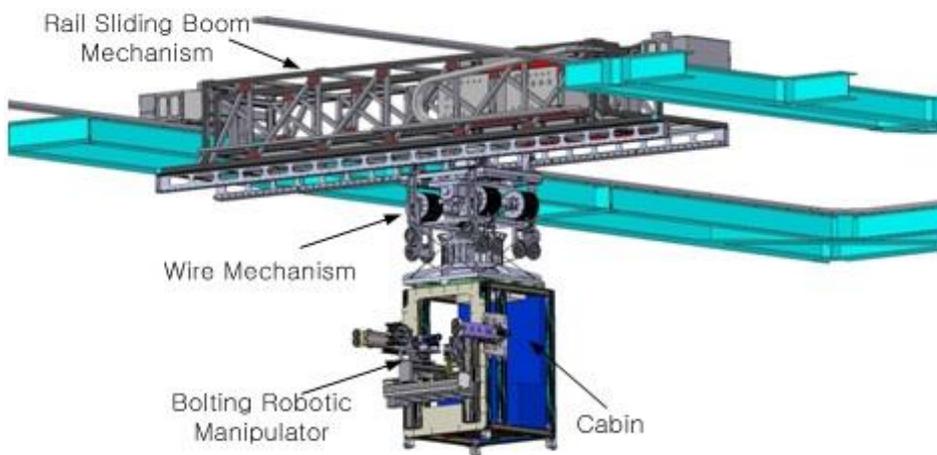


Abbildung 6 Schraubroboter auf Schienen⁶

Mit (teil-)automatisierten Baustellen befasst sich seit 2018 ein Forschungsprojekt der RWTH Aachen, Kuka, Liebherr, Autodesk und weiteren Partnern aus der Industrie in dem eigens dafür gegründeten Center Construction Robotics (Construction Robotics, 2019). Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf dem Schließen digitaler Lücken in der Fertigung am Beispiel der automatisierten Montage von Fassadenelementen. Dabei kommen Turmdrehkräne zum Einsatz, die eine Plattform mit Roboterarmen bewegen. Die Roboterarme sind mit

⁶ <http://mfr.korea.ac.kr/img/Research/Robotic/Fig8.jpg> (10.02.2020)

unterschiedlichen Sensoren und Werkzeugen ausgerüstet, um Arbeiten selbstständig durchzuführen und zu überwachen. Im November 2019 wurde der Bau einer Referenzbaustelle beschlossen, die gleichzeitig zur Forschung und zu Schulungszwecken dient (Construction Robotics, 2019). Durch den kombinierten Einsatz von Kränen und unterschiedlichen Roboterarmen ist sowohl das Problem der Mobilität als auch das der Flexibilität hinsichtlich des Einsatzgebietes deutlich reduziert. Je nach Einsatzzweck könnten unterschiedliche Roboterarme eingesetzt werden. Dadurch ist das Robotersystem nicht nur auf eine einzelne Aufgabe beschränkt. In Zukunft könnte ein System wie das des Center Construction Robotics nach einem Baukastenprinzip an die jeweiligen Aufgaben angepasst werden. Der automatisierte Kran nimmt dabei eine zentrale Rolle ein und wird mit unterschiedlichen Plattformen kombiniert, die mit Roboterarmen ausgestattet sind. Dadurch kann der Kran für viele Aufgaben die passenden Werkzeuge auswählen und so eine große Anzahl an Aufgaben erledigen. Eine MRZ ist nach aktuellen Informationen nicht geplant.

2.3 Tabellarische Übersicht der betrachteten Roboter

Tabelle 1 zeigt eine tabellarische Übersicht wichtiger Eigenschaften der in den vorangegangenen Kapiteln betrachteten Roboter.

Tabelle 1 Roboterübersicht

Bezeichnung	Kategorie	Aufgabe	MRZ-Fähigkeit
ODICO Formwork	Roboterarm	Multifunktional	Level 2
Hyperion Robotics	Roboterarm	Betondruck	Level 1-3
HRP-5P	Mobiler autonomer Roboter	Multifunktional	Level 1-3
Hadrian X	Mobiler autonomer Roboter	Mauern	Level 3
ATLAS	Mobiler autonomer Roboter	Forschungsplattform	Unbekannt
In Situ Fabricator	Mobiler autonomer Roboter	Mesh-Mould-Betondruck	Level 2
Robonet 4.0	Mobiler autonomer Roboter	Bohren	Level 3
IronBot	Mobiler autonomer Roboter	Verlegen von Bewehrung	Level 1
TyBot	Mobiler autonomer Roboter	Binden von Bewehrung	Level 1
Fortis	Tragbarer Roboter	Multifunktional	Level 3
Daewoo Exoskelett	Tragbarer Roboter	Multifunktional	Level 3
	Automatisierte Baustelle	Multifunktional	Level 0-2

2.4 Produktivität von Robotern auf Baustellen

Allgemeine Aussagen über die Produktivität von Robotern auf Baustellen können nur schwer getroffen werden, da keine verlässlichen Informationen zur Leistungsfähigkeit der Roboter vorliegen. Der Vorteil von Robotern gegenüber Menschen ist, dass sie theoretisch rund um die Uhr arbeiten können. Das bedeutet: Auch wenn die stündliche Arbeitsleistung des Roboters geringer als die des Menschen ist, so erbringt der Roboter seine Leistung über einen merklich längeren Zeitraum. Hinzu kommt, dass die Produktivität der Roboter in Zukunft durch Fortschritte in Forschung und Entwicklung weiter ansteigen wird, wohingegen die eines Menschen größtenteils konstant ist. Zwar wird die Arbeitsleistung eines Menschen anfänglich durch seine Lernfähigkeit erhöht, jedoch ist diese Lernfähigkeit begrenzt. Während das Lernen einer Tätigkeit die Arbeitsleistung erhöht, spielen auch Faktoren wie das Alter eine Rolle, die die Leistung reduzieren. Bereits ab dem 28. – 32. Lebensjahr lässt die Kraft nach, fünf Jahre später die Ausdauer und ab 35 Jahren nehmen dann auch die koordinativen Fähigkeiten ab (Ehrler & Huth, 2000). Bei körperlich belastender Arbeit, wie sie auf der Baustelle üblich ist, wird es für Arbeitskräfte also zunehmend schwieriger, eine konstante Arbeitsleistung zu erbringen.

Neben der theoretischen Arbeitsleistung muss auch noch die tatsächliche Arbeitsleistung betrachtet werden. Die tatsächliche Arbeitsleistung kann beispielsweise durch Ausfälle von Arbeitern oder Maschinen reduziert werden. Als Ausfall ist die gesamte Zeit zu verstehen, in der keine Leistung erbracht wird. Der Ausfall eines einzelnen Arbeiters auf einer Baustelle führt in der Regel nur zu einer etwas reduzierten Arbeitsleistung oder kann sogar durch Aushilfen komplett ausgeglichen werden. Fällt jedoch ein Roboter aus, müsste die Arbeit, die dieser normalerweise verrichtet, vom Menschen – oder sofern vorhanden – von Ersatzgeräten erbracht werden. Stehen diese Alternativen als Ersatz nicht zur Verfügung, so kommt es zwangsläufig zum Stillstand der Produktion. Ausfälle können in drei unterschiedliche Kategorien eingeordnet werden. Die

vorhersehbaren sowie die unvorhersehbaren bzw. sonstigen Ausfälle. Sofern der Roboter nicht vollständig automatisiert arbeitet, sind Arbeiter nötig, die den Roboter bedienen oder überwachen. Zu den vorhersehbaren Ausfällen des Roboters zählen die Abwesenheit des Bedieners, Wartung und Instandhaltung sowie eventuelle Ladezeiten bei batteriebetriebenen Robotern. Bei einem Ausfall des Hadrian X müssten ca. 50 zusätzliche Arbeiter vorhanden sein, um eine ähnliche Arbeitsleistung wie dieser zu erzielen (FBR, 2019). In einem weitgehend automatisierten Baustellenszenario kann also bereits der Ausfall eines einzelnen Roboters zum Stillstand der gesamten Baustelle führen, falls es sich dabei beispielsweise um den Kran handelt, der die anderen Roboter mit Material versorgen soll. Während ein erkrankter Kranfahrer leicht durch einen Kollegen ersetzt werden kann, sofern dieser über die nötigen Kenntnisse verfügt, ist der Austausch des ganzen Krans deutlich zeitaufwändiger.

Die Ausfälle der Roboter variieren je nach Fertigungsprinzip und Automatisierungsgrad. Ein automatisierter Roboter ist nicht von der Anwesenheit eines Bedieners abhängig und kann daher theoretisch auch arbeiten, wenn keine menschlichen Arbeitskräfte anwesend sind. Es steht zu erwarten, dass in Zukunft zunehmend weniger Roboter von der Anwesenheit des Bedieners abhängig sind, so dass die Produktivität der Roboter nicht mehr durch das Fehlen eines Arbeiters reduziert wird. In einem MRZ-Szenario bedeutet die Abwesenheit eines Arbeiters jedoch, dass je nach MRZ-Level entweder mit reduzierter Leistung oder gar nicht gearbeitet werden kann.

Die Autonomie eines Robotersystems bezieht sich dabei jedoch nur auf die technischen Möglichkeiten und muss zukünftig auch von Seiten der Gesetzgebung zulässig sein. Zwar kann der Roboter rund um die Uhr arbeiten, jedoch muss auch sichergestellt werden, dass durch die Abwesenheit von Aufsichtspersonen keine Gefahrenquellen geschaffen werden. Einem dauerhaften Einsatz widersprechen auch gesetzliche Ruhezeiten, da Nachbarn vor Lärmbelastungen zu schützen sind. Die Ruhezeiten hängen dabei von der Umgebung ab. In einem Industriegebiet spricht wenig gegen einen dauerhaften Einsatz. In einem Wohngebiet ist ein

Einsatz rund um die Uhr nur dann möglich, wenn dadurch keine unzumutbare Lärmbelastung erzeugt wird.

Während durch Schichtarbeitsmodelle die ständige Kontrolle des Roboters durch einen Menschen gewährleistet werden kann, ist ein Ausfall durch Wartungen oder Reparaturen nicht zu verhindern. Bestenfalls werden diese so geplant, dass sie außerhalb des Nutzungszeitraumes des Roboters stattfinden. Ist bekannt, dass eine Wartung ansteht, kann diese Wartung auch durchgeführt werden, bevor der Roboter auf der nächsten Baustelle eingesetzt wird.

Für einen regulären Ablauf auf einer Baustelle mit mobilen Robotern ohne konstante Energieversorgung sind vor allem Ladezeiten wichtig, da diese zwangsläufig einen Ausfall des Roboters bedeuten. In diesem Fall muss ein Konzept erarbeitet werden, welches es gestattet, eine möglichst hohe Einsatzzeit des Roboters zu gewährleisten. Dies kann beispielsweise über Austauschroboter, auswechselbare Batterien oder Schnellladestationen realisiert werden.

Unvorhersehbare Ausfälle können sich sowohl auf den Menschen als auch auf den Roboter beziehen:

- Mensch
 - Krankheit
 - Verletzung
 - Sonstiges
- Roboter
 - Beschädigungen
 - Sonstiges

Die unvorhersehbaren Ausfälle lassen sich zumindest in Bezug auf den Menschen teilweise vermeiden oder zumindest reduzieren. Verletzungen am Arbeitsplatz können durch ein umfangreiches Sicherheitskonzept vermieden werden, welches idealerweise bereits beim Bau des Werks implementiert wird. Mit Hilfe eines angemessenen Sicherheitskonzepts ist beispielsweise zu gewährleisten, dass

Arbeitsplätze, möglichst ergonomisch eingerichtet und Gefahren minimiert werden (Mitsch, 2019).

Solange der Einsatz eines Roboters die Gegenwart eines Menschen erfordert, ist es wichtig, dafür zu sorgen, dass im Krankheitsfall auch Ersatz für den Arbeiter vorhanden ist. Im Schnitt waren 2017 Arbeitnehmer 17,4 Tage im Jahr krank (IWD, 2019) und verglichen mit dem durchschnittlichen Krankenstand von Unternehmen liegt der des Baugewerbes ca. 25% höher (BKK Dachverband, 2019; Statistisches Bundesamt, 2019b).

Die Überlastung von Arbeitern oder das falsche Ausführen von Tätigkeiten führt zu Verletzungen und Ausfällen. Ähnlich verhält es sich bei Robotern. Ein Einsatz, der vom geplanten Zweck abweicht, oder Überlastungen können zur Beschädigung der Roboter und damit einer reduzierten Arbeitsleistung führen. Werden die planmäßigen Wartungen durchgeführt und die Roboter nicht überlastet, lassen sich unvorhersehbare Ausfälle reduzieren oder vermeiden.

In die Kategorie der sonstigen Ausfallgründe können beispielsweise menschliche Fehler, wie etwa das Betreten eines geschützten Bereichs, fallen, die einen Stopp des Roboters erzwingen. Dies ist besonders auf Baustellen wichtig, auf denen MRZ-Szenarien vorkommen, da Menschen und Roboter sich einen Arbeitsraum teilen.

Nicht nur die theoretische und die tatsächliche Arbeitsleistung wirken sich darauf aus, wie effizient ein Roboter auf der Baustelle arbeitet. Auch die Flexibilität hinsichtlich seines Einsatzgebietes hat Einfluss auf die Produktivität. Im Bereich der Flexibilität ist der Mensch zumindest beim aktuellen Entwicklungsstand den Robotern überlegen. Während ein menschlicher Arbeiter nahezu jede Tätigkeit erlernen kann, solange sie im Rahmen seiner physischen Möglichkeiten liegt, sind die meisten Roboter lediglich für einen bestimmten Einsatzzweck konzipiert und können nachträglich nur wenig oder gar nicht verändert werden (T. Bock, 2016; Linner, 2013). Roboter können aktuell also hauptsächlich für stark repetitive Arbeiten eingesetzt werden, die möglichst wenige Anpassungen erfordern.

Mit den zu erwartenden Entwicklungen auf dem Gebiet der Robotik wird sich die Flexibilität von Robotern jedoch zukünftig stark erhöhen. Die Möglichkeiten der Robotik zeigen Forschungsinstitute wie Boston Dynamics oder AIST bereits heute mit dem ATLAS und dem HRP-5P auf. Forschungsprojekte wie die des Center Construction Robotics stellen einen Ansatz dar, wie Probleme hinsichtlich der Flexibilität einzelner Roboter durch die Kombination mehrerer Robotersysteme gelöst werden können. Dennoch ist nicht zu erwarten, dass für jede einzelne Tätigkeit auf Baustellen eine Roboterlösung angeboten werden kann, wenn die Bauweise der Gebäude nicht im Hinblick auf einen vermehrten Robotereinsatz standardisiert wird. Mit der Standardisierung von Gebäuden und Bauelementen für einen effizienten Robotereinsatz beschäftigten sich bereits Bock und Linner in der Publikation „Robot-Oriented-Design“, in der ausführlich untersucht wird, wie die Bauweise angepasst werden muss, um trotz begrenzter Flexibilität der Roboter automatisiert zu bauen.

Nicht nur die Menge der geleisteten Arbeit wirkt sich auf die Produktivität aus, sondern auch die Qualität der Arbeit. Die Zuverlässigkeit von Arbeitern hinsichtlich der Qualität der von ihnen erbrachten Arbeit basiert auf ihrer tatsächlichen Leistungsfähigkeit und ihrer Erfahrung.

Roboter müssen mit speziellen Sensoren und Instrumenten ausgerüstet werden, um eine Qualitätskontrolle durchführen zu können. Die Qualität der geleisteten Arbeit zu bewerten, ist im Allgemeinen nur schwer möglich. Jedoch sind Roboter in der Regel gut dafür geeignet, bei möglichst statischen Rahmenbedingungen eine Tätigkeit schnell und in hoher Qualität auszuführen (Faber, Bützler, & Schlick, 2015). Ändern sich jedoch die Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel die Materialparameter, kann ein normaler Industrieroboter darauf nicht oder nur bedingt reagieren und führt weiterhin die Tätigkeit aus, für die er programmiert wurde. Daher sind weitere Kontrollmechanismen nötig, die eine dauerhafte Qualitätskontrolle gewährleisten. Dafür ist im Betondruck beispielsweise ein optisches Monitoring der Betonfließfähigkeit möglich. Dabei wird in Echtzeit überwacht, wie weit sich eine gedruckte Form ausdehnt und inwiefern die

Ausdehnung mit den Vorgaben übereinstimmt. Anhand der gewonnenen Daten können Materialparameter unter Umständen angepasst werden. Diese Methode der Qualitätskontrolle kommt zur Zeit nur im Rahmen von Forschungsprojekten zum Einsatz (Kazemian, Yuan, Davtalab, & Khoshnevis, 2019). Menschliche Arbeitskräfte hingegen sind in der Lage, auf kleine Imperfektionen des Baumaterials zu reagieren und diese gegebenenfalls auszubessern oder das Verfahren entsprechend anzupassen. Beispielsweise hat ein leicht höherer Fließmittelanteil im Beton bei einem herkömmlichen Bauverfahren wenig Auswirkung auf das Endprodukt, wenn jedoch Betondruckverfahren eingesetzt werden, kann die erhöhte Fließfähigkeit große Auswirkungen auf das Endprodukt haben.

Durch die unterschiedlichen Sensoren, mit denen Roboter ausgestattet werden können, eignen sie sich jedoch gut zur Qualitätskontrolle fertiggestellter Arbeit. Sie sind im Stande, systematisch das gesamte Werkstück zu scannen und dabei Fehlstellen zu erkennen, die für das menschliche Auge nicht sichtbar sind. Für die robotergestützte Qualitätskontrolle werden Wärmebildkameras, Farbkameras, Laserscanner und Steigungsmesser verwendet (Yan, Kayacan, Chen, Tiong, & Wu, 2019). Beim aktuellen Stand der Technik eignen sich Roboter besonders gut dazu, bereits abgeschlossene Arbeiten zu kontrollieren. Qualitätsmonitoring während der Arbeit ist nicht in allen Fällen möglich.

3. Aktuelle Rahmenbedingungen für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit im Bauwesen

Da beim gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen auf der Baustelle nicht auf einen großen Erfahrungsschatz der deutschen Bauunternehmen zugegriffen werden kann, muss untersucht werden, welche Rahmenbedingungen existieren, damit der Robotereinsatz effizient und sicher möglich ist. Dazu wird betrachtet, welche Rahmenbedingungen in anderen Industrien für einen generellen Robotereinsatz gelten und inwieweit diese auf ein Baustellenszenario übertragen werden können. Besonders wichtig ist dabei, dass die Arbeit der Roboter und Menschen nicht in getrennten Arbeitsräumen stattfindet.

3.1 Technische Rahmenbedingungen

3.1.1 Planung von Gebäuden und Baustellen

Der Einsatz von Robotern im Bauwesen und speziell auf der Baustelle erfordert ein Maß an Planung, das im Bausektor in der Praxis noch nicht erreicht wird. Möglichkeiten zur genaueren Planung existieren bereits in Form des 5D-BIM. Dabei werden dem regulären Gebäudemodell neben geometrischen Informationen zusätzlich Informationen zu benötigten Ressourcen und zur Bauablaufplanung hinzugefügt (Frantzen & Brücken, n.d.). Die 5D-BIM-Planung geht jedoch mit einem erhöhten Planungsaufwand und erfordert Umstellungen in den Bauunternehmen. Um zu überprüfen, an welcher Stelle eine genauere Planung nötig ist, wird der Planungsprozess in zwei gesonderten Abschnitten betrachtet: die Gebäudeplanung und die Baustelleneinrichtungsplanung.

Durch die großen Unterschiede von Gebäude zu Gebäude finden sich zwar immer wieder ähnliche Produktionsprozesse, wie zum Beispiel das Mauern, die

Rahmenbedingungen ändern sich jedoch ständig. Dies muss in der Planung berücksichtigt werden. Die Bauablaufplanung wird dadurch erschwert, dass die Bauunternehmen in der Regel nicht in den Planungsprozess involviert sind. Planung und Ausführung werden so nicht aufeinander abgestimmt. Dieser Mangel an Abstimmung führt auch dazu, dass aus Zeitgründen oft schon mit dem Bau begonnen wird, bevor der Planungsprozess komplett abgeschlossen ist. Nachträgliche Leistungsänderungen, die vom ursprünglichen Bauvertrag abweichen, werden berücksichtigt und führen zu kurzfristigen Anpassungen. Für einen Menschen ist es auf der Baustelle kein Problem, kleine Anpassungen vorzunehmen. Für einen Robotereinsatz müssen Gebäude jedoch schon von vornherein besser durchgeplant werden, damit es nicht zu Verzögerungen auf der Baustelle kommt.

Beispielsweise muss für das automatisierte Mauern durch den Hadrian X bereits vor Baubeginn feststehen, wo jeder einzelne Stein im Mauerwerksverband platziert werden muss. Dies erfordert den Einsatz von Planungssoftware, die über den aktuellen Standard hinausgeht. Durch den Einsatz von Robotern wird zwar der Planungsaufwand erhöht, jedoch entstehen durch die verbesserte Planung auch Chancen: Material und damit Geld können durch eine optimierte Planung eingespart werden. Bereits in der Planungsphase eines Gebäudes wird über einen Großteil der Kosten entschieden. Im späteren Verlauf können diese Kosten nur noch wenig beeinflusst werden (siehe Abbildung 7). Eine optimierte Planung kann also als Mittel für Bauherren und Bauunternehmer genutzt werden, um Zeit und Kosten zu sparen.

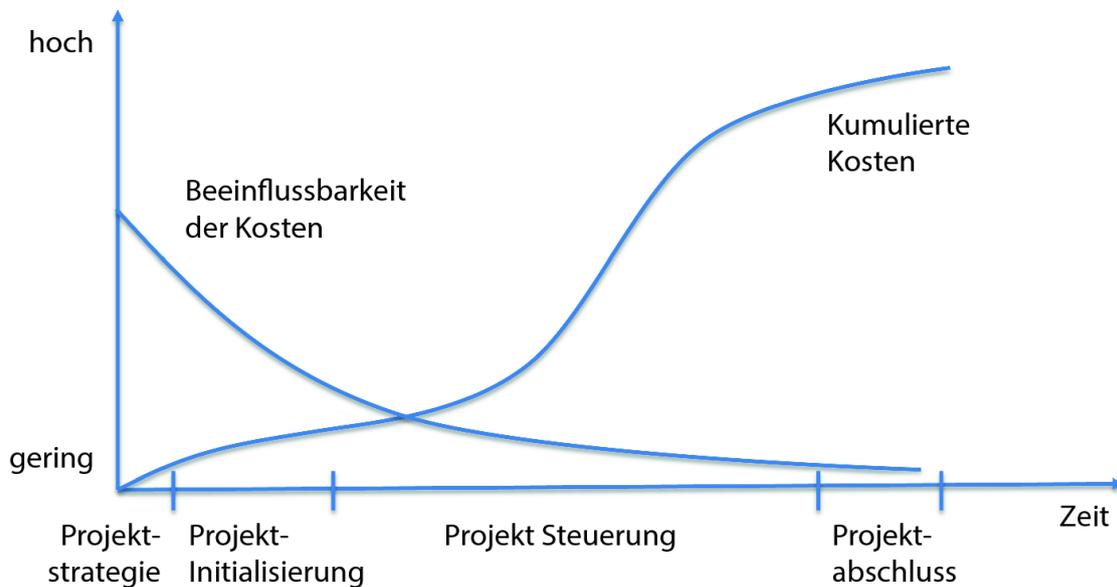


Abbildung 7 Beeinflussbarkeit der Kosten⁷

Eine konkretere anfängliche Planung verbessert zwar die Möglichkeiten des Robotereinsatzes, erschwert jedoch nachträgliche Änderungen am Gebäude. Auch müssen Bauelemente mit Rücksicht auf den Robotereinsatz geplant werden, da die technischen Möglichkeiten der Roboter begrenzt sind. Je höher die Industrialisierung eines Bauprojektes ist, desto wichtiger ist auch die Planungsphase, da der Entwurf und die Vorfertigung von Bauelementen bereits vor dem eigentlichen Baubeginn erfolgen (T.-A. Bock, 1988).

Für eine genaue und robotergerechte Planung ist es wichtig, dass der Informationsaustausch zwischen den beteiligten Planern reibungslos vonstattengeht. Nur so kann sichergestellt werden, dass auch kurzfristige Änderungen berücksichtigt werden. Auf Grund der Vielzahl der Softwareanbieter und der Vielfalt der Dateiformate im Bauwesen ist ein verlustfreier Austausch in vielen Fällen gegenwärtig allerdings nicht möglich. Austauschformate wie die Industry Foundation Classes (IFC) wurden seit 2000 als Prototypen getestet, um

⁷ https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-658-25879-5_5/MediaObjects/476976_1_De_5_Fig6_HTML.png (09.02.2020)

Planunterlagen zwischen den einzelnen Gewerken auszutauschen. Die Version 2x3 wird seit 2008 auch in begrenztem Rahmen in der praktischen Anwendung genutzt.

Um einen gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen auf der Baustelle zu planen, ist zu betrachten, welche zusätzlichen Informationen im Vergleich zur aktuellen Baustellenplanung benötigt werden. Bei der Planung ist vor allem zu beachten, welche auf einer Baustelle einsetzbaren Roboter existieren und welche Vorteile diese gegenüber menschlichen Arbeitskräften aufweisen. Diese Roboter sollen so eingesetzt werden, dass sie ihre Arbeit möglichst vollautomatisch erledigen. Trotz der hohen Automatisierung muss die Sicherheit der Arbeiter auf der Baustelle gewährleistet werden. Zu diesem Zweck muss festgelegt werden, in welchen Bereichen Roboter und Menschen arbeiten.

Auch wenn der Einsatz von Robotern auf der Baustelle die Produktivität erhöht, macht dieser Einsatz beim aktuellen Stand der Technik die Organisation der Baustelle unflexibler. Beispielsweise könnte ein menschlicher Arbeiter bei einer verspäteten Anlieferung von Material andere Aufgaben zuerst erledigen. Für einen Roboter, der nur für eine spezielle Tätigkeit konzipiert ist, ist dies jedoch nicht möglich. Eine kontinuierliche Verfügbarkeit aller erforderlichen Ressourcen ist demnach von großer Wichtigkeit. Dazu muss auch von vornherein geregelt werden, wie der Materialtransport auf der Baustelle stattfinden soll.

Damit Roboter und Menschen gemeinsam auf der Baustelle eingesetzt werden können, muss sichergestellt werden, dass die Baustelle über die nötige Infrastruktur verfügt. Das schließt die Energieversorgung der Roboter, der sonstigen Arbeitsgeräte und die Datenübertragung zwischen den Robotern mit ein.

3.1.2 Einsatzgebiete von Robotern

Die Einsatzgebiete für Roboter auf der Baustelle müssen so gewählt werden, dass die Roboter mit ausreichender Planung möglichst ununterbrochen und möglichst vollautomatisch arbeiten können. Da das Ziel des Robotereinsatzes nicht nur ist, die Arbeitsleistung auf der Baustelle zu erhöhen, sondern auch die Menschen zu entlasten, wurden bei vorhandenen Robotern die Einsatzgebiete so gewählt, dass die Roboter auf möglichst vielen Baustellen eingesetzt werden können. Wichtig ist bei der Wahl des Einsatzgebietes also die Häufigkeit der auszuführenden Tätigkeit. Ein besonders gutes Beispiel dafür ist der IronBot. Unabhängig von der Art des Gebäudes werden Bauteile wie die Bodenplatte aus Stahlbeton hergestellt. Dadurch sind viele Einsatzmöglichkeiten für einen Bewehrungsroboter gegeben.

Für einen sinnvollen Einsatz auf der Baustelle müssen Roboter idealerweise kompakt, leistungsstark und flexibel in ihrem Einsatzgebiet sein. Sie müssen unabhängig von Wettereinflüssen einsetzbar sein. Die automatisierten Baustellen sind daher mit Wetterschutzhüllen abgedeckt. Außerdem müssen sie bei der Kooperation mit Menschen mit Maßtoleranzen arbeiten, die in anderen Industrien undenkbar wären (Baumarkt, n.d.).

Die technische Realisierbarkeit spielt natürlich eine zentrale Rolle bei der Entwicklung und bei der Einsatzplanung eines Roboters. Die bereits vorgestellten Roboter erfüllen bis auf wenige Ausnahmen jeweils nur eine Aufgabe, für die sie optimiert sind. Einsatzgebiete sollten daher so ausgewählt werden, dass die auszuführende Tätigkeit möglichst wenig variabel vom generellen Ablauf her ist und aus wenigen Arbeitsschritten besteht. Abweichende Arbeitsschritte können dann von Menschen durchgeführt werden, wie es auch beim SAM100 der Fall ist, wo die Menschen die Randsteine zusägen und verlegen. Alternativ muss für einen umfassenden Robotereinsatz der Entwurf der Gebäude in einer Weise optimiert werden, dass mit möglichst wenig unterschiedlichen Robotern möglichst viele Arbeiten auf der Baustelle erledigt werden können (T.-A. Bock, 1988).

Für Bauunternehmen ist selbstverständlich auch der wirtschaftliche Nutzen des Robotereinsatzes von Bedeutung, weshalb die Einsatzgebiete so gewählt werden, dass die Produktivität entweder durch einen alleinigen Robotereinsatz oder durch einen gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen gesteigert wird. Bei der Planung des Bauablaufs muss durch die Bauunternehmen überprüft werden, welche Bauleistungen, die sich gut automatisieren lassen, erbracht werden und in welcher Menge sie erbracht werden müssen. Ausgehend von der Mengenermittlung lassen sich Roboter auswählen, die einzelne Arbeiten automatisiert verrichten.

3.1.3 Forschung und Entwicklung

Ein umfassender Einsatz von Robotik im Bauwesen setzt Fortschritte in der Forschung voraus. Damit ein Roboter sinnvoll auf der Baustelle eingesetzt werden kann, muss seine tatsächliche Arbeitsleistung hinsichtlich Menge und Qualität mindestens der eines Menschen entsprechen. Dabei ist selbstverständlich zu bedenken, dass Roboter theoretisch rund um die Uhr eingesetzt werden können.

Speziell wenn die Entwicklung weg von Single-Task-Robots gehen soll, ist es wichtig, dass die Motoren- und Sensortechnik weiter verbessert wird, so dass Roboter nicht überproportional schwerer sein müssen als die Last, die sie tragen sollen. Zur Reduktion des Robotergewichts kann auch der Einsatz von Leichtbaumaterialien und ein konsequentes Leichtbaudesign beitragen (DLR, 2019). Soll ein humanoider Roboter wie der HRP-5P die gleichen Lasten anheben wie ein Mensch, müsste der Roboter über 200 kg wiegen. Das erhöhte Gewicht würde sich unweigerlich auch auf die Größe und damit das mögliche Einsatzgebiet für den Roboter auswirken. Zusätzlich steigt mit zunehmender Größe und Leistungsfähigkeit auch der Energiebedarf an.

Zwar handelt es sich bei dem HRP-5P bisher nur um eine Technologiestudie, jedoch zeigt sich, dass ein an den Menschen angelehnter Roboter auf Grund der

großen Komplexität und der großen inneren Hebel nicht für das Heben und den Transport von großen Lasten geeignet ist. Armroboter auf mobilen Plattformen scheinen auf Grund der, verglichen mit dem HRP-5P, geringen Komplexität deutlich besser für einen Einsatz auf der Baustelle geeignet.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

3.2.1 Sicherheitsbestimmungen

Wenn Roboter mit künstlicher Intelligenz (KI) ausgerüstet sind, muss, unabhängig vom Modell, sichergestellt werden, dass es durch ihren Einsatz nicht zur Gefährdung von Menschenleben kommt. Der Einsatz von KI unterscheidet die Roboter auf der Baustelle von einfachen Baumaschinen, durch die Intelligenz entstehen neue Gefahrenpotenziale. Beim Betreiben eines Roboters wird die KI genutzt, um mit der realen Welt zu interagieren. Über verschiedene Sensoren wird die KI mit Informationen versorgt, die verarbeitet werden und zu Entscheidungen führen. Falsche Entscheidungen gefährden sowohl den Roboter als auch den Menschen (Sünderhauf et al., 2018). Bevor ein Roboter auf der Baustelle zusammen mit Menschen eingesetzt werden kann, muss also die Sicherheit aller gewährleistet sein. Dazu sind Sicherheitsvorkehrungen nötig, die auch im Falle eines Versagens der KI den Menschen und den Roboter schützen.

Zu diesem Zweck sind Schutzeinrichtungen für Roboterzellen zu errichten, die verhindern, dass Menschen sich in Gefahrenbereichen aufhalten. Die Größe der Schutzeinrichtung ist dabei abhängig von der Reichweite des Roboters und der Gefahrenursache (DGUV, 2015). Eine strikte Trennung der Roboter und Menschen ist jedoch bei einer MRZ nicht möglich, daher wurden neue Schutzprinzipien aufgestellt (VDMA, 2016):

1. **Sicherheitsgerichteter überwachter Stillstand:** Der Roboter hält an, wenn der Mitarbeiter den gemeinsamen Arbeitsraum betritt und fährt weiter, wenn der Mitarbeiter den gemeinsamen Arbeitsraum wieder verlassen hat.
2. **Handführung:** Roboterbewegung wird vom Mitarbeiter aktiv mit geeigneter Ausrüstung gesteuert.

3. **Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung:** Kontakt zwischen Mitarbeiter und in Bewegung befindlichem Roboter wird vom Roboter verhindert.
4. **Leistungs- und Kraftbegrenzung:** Kontaktkräfte zwischen Mitarbeiter und Roboter werden technisch auf ein ungefährliches Maß begrenzt.

Kollaborative Robotersysteme müssen entsprechend gekennzeichnet werden und dürfen nur von qualifizierten Arbeitskräften bedient werden. Die Informationen zu kollaborativen Robotersystemen beruhen auf Erfahrungswissen der DGUV (Meyer, 2016).

Zusätzlich zu den Schutzprinzipien können Sicherheitszonen eingeführt werden (siehe Abbildung 8), mithilfe derer das Verhalten der Roboter in unterschiedlichen Situationen geregelt wird. Diese Sicherheitszonen sind speziell dafür da, um Fälle zu betrachten, in denen Roboter nicht streng von Menschen getrennt sind, wie es lange Zeit der Fall war (Mitka, Gasteratos, Kyriakoulis, & Mouroutsos, 2012), daher lassen sich diese Zonen zum Entwurf von Fertigungshallen mit kollaborativen Robotersystemen nutzen. Die Sicherheitsprinzipien des VDMA können unter Verwendung der Sicherheitszonen genauer angepasst werden. Befindet sich ein Mensch in Sicherheitszone 1, kann mit voller Leistung gearbeitet werden. Befindet sich ein Mensch in Sicherheitszone 2, so wird die Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters reduziert. Betritt ein Mensch Sicherheitszone 3, also den unmittelbaren Gefährdungsbereich, wird ein Stillstand des Roboters veranlasst (Mitka et al., 2012).

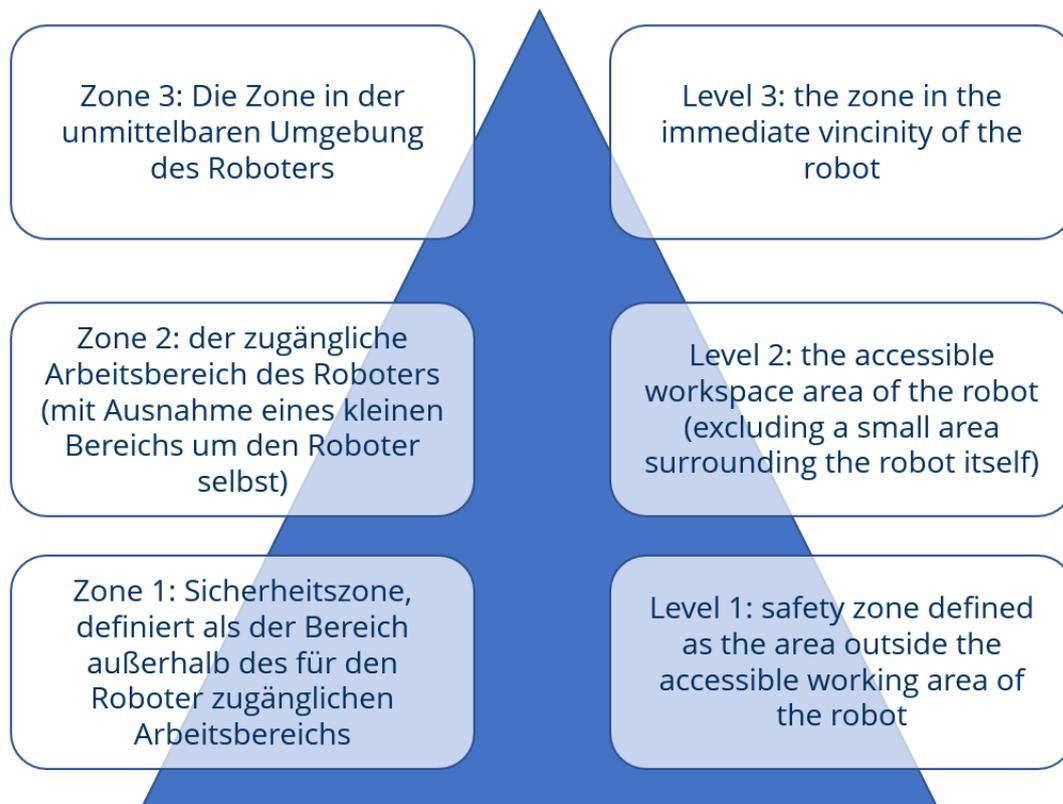


Abbildung 8 Sicherheitszonen für Roboter adaptiert aus Mitka et al., 2012⁸

Das Aufstellen von Richtlinien und das Einführen von Sicherheitszonen stellen organisatorische Maßnahmen dar, die helfen, die Mensch-Roboter-Interaktion sicher zu gestalten. Die organisatorischen Maßnahmen werden durch technische Maßnahmen ergänzt, die sich je nach Hersteller unterscheiden. So überzieht der Hersteller Stäubli den Roboterarm TX2 mit einer synthetischen Haut, die bei Berührung innerhalb von 10 Millisekunden einen Stopp des Roboters veranlasst. Die Haut selbst wird Air-Skin genannt und ist 20 Millimeter dick. Sie dient als Puffer, da sich der Roboter beim Erkennen des Menschen noch 10 Millisekunden weiterbewegt (Stäubli, 2019). Ähnlich wie die Air-Skin von Stäubli funktioniert auch die Airskin des Wiener Unternehmens Blue Danube. Diese besteht aus

⁸ Mitka, E., Gasteratos, A., Kyriakoulis, N., & Mouroutsos, S. G. (2012). Safety certification requirements for domestic robots. *Safety Science*.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.009>

Schaumstoff, der Sensoren enthält und mit einer Polyurethanbeschichtung umhüllt ist. Diese Schaumstoffpackungen können an dem Roboter angebracht werden und veranlassen bei Druckveränderungen einen Stopp des Roboters. Nachlaufzeiten werden durch die Schaumstoffpads abgefedert. Der Vorteil dieses Systems gegenüber der Air-Skin von Stäubli ist, dass dadurch praktisch alle Roboter nachträglich zu kollaborativen Robotern umfunktioniert werden können (Foitzik, 2018).

Andere Hersteller setzen auf Drehmomentsensoren in den Gelenken der Roboter, die Bewegungen stoppen können, wenn es zu einem Kontakt mit Hindernissen kommt. In Verbindung mit den Sicherheitszonen und Richtlinien kann so festgelegt werden, wie Roboter auf unterschiedliche Situationen reagieren, in denen Menschen den gemeinsamen Arbeitsbereich betreten.

Zu den Gefahren, die durch einen normalen Robotereinsatz entstehen, kommen noch Gefahren, die aus Fehlfunktionen des Roboters resultieren, hinzu. Heutige und zukünftige Industrieroboter sind durch einen ständig wachsenden Grad an Vernetzung immer stärker Gefahren durch Cyberattacken ausgeliefert. Ein mögliches Ziel der Cyberattacken sind die personenbezogenen Daten, die sich unter Umständen verkaufen lassen. Cyberattacken können aber auch das Ziel haben, möglichst viel Schaden anzurichten, entweder am Roboter selbst oder an seiner Umwelt und den Beschäftigten. Um diese Angriffe abzuwehren, kann ein Roboter mit KI ausgerüstet werden und dann eigenständig durch deep-learning-Algorithmen entscheiden, ob es sich bei den auszuführenden Befehlen um schädliche Anweisungen handelt oder nicht (L. Li, Xie, Li, Liu, & Wang, 2018). Zur Gefahrenabwehr mittels deep-learning wird die KI des Roboters mit Hilfe von Simulationen trainiert, verschiedene Anweisungen zu erkennen und zu bewerten. Durch dieses Training ist es möglich, ohne menschliches Eingreifen potenziell gefährliche Anweisungen zu erkennen, zu melden und nicht auszuführen. Ähnlich wie der HRP-5P, könnten die Sicherheitsalgorithmen mit virtuellen Szenarien darauf trainiert werden, unbefugte Zugriffe zu erkennen und zu blockieren. Beim

Einsatz von KI zur Gefahrenabwehr muss jedoch geregelt sein, wie viel Befehlsgewalt diese hat. Ein Beschäftigter vor Ort muss immer die Möglichkeit haben, die Befehle des Roboters zu überschreiben, falls dieser in seiner Funktion gestört ist.

3.2.2 Datenschutz

Durch die steigende Komplexität von modernen Industrierobotern steigt auch deren Bedarf, die Umgebung wahrzunehmen. Dafür sind sie mit unterschiedlichen Sensoren ausgerüstet, unter anderem auch mit optischen. Durch den Einsatz von optischen Sensoren in einem kollaborativen Robotersystem sind Menschen, die sich im Arbeitsbereich des Roboters aufhalten, indirekt einer konstanten Überwachung ausgesetzt. Zwar sind die Sensoren nicht für diesen Zweck in den Robotern verbaut, sie könnten allerdings dafür zweckentfremdet werden. Daher muss genau geregelt werden, wie die Daten, die der Roboter sammelt, verwendet werden, wie lange sie gespeichert werden und wer darauf Zugriff hat. Personenbezogene Daten können zum Beispiel Namen, Anschriften, Telefonnummern, Arbeitszeiten und Bildaufnahmen sein. Auf einer Baustelle sind dabei vor allem die mögliche Überwachung von Arbeitszeiten und das konstante Anfertigen von Bildaufnahmen problematisch, da Bildaufnahmen ebenfalls von Menschen gemacht werden könnten, die sich nicht auf der Baustelle selbst, sondern beispielsweise in einem Nachbargebäude oder auf der Straße aufhalten.

Gemäß §26 Abs. 2 BDSG dürfen aber auch die personenbezogenen Daten der Arbeiter, die durch Roboter gesammelt werden, nur mit Einwilligung der Beschäftigten verarbeitet werden, sofern der dafür Verantwortliche die Grundsätze für die Verarbeitung von personenbezogenen Daten einhält, die in Artikel 5 der Verordnung (EU) 2016/679 dargelegt werden.

Die Grundsätze der personenbezogenen Datenverarbeitung sind:

- Datensparsamkeit
- Zweckbindung
- Verbot mit Erlaubnisvorbehalt
- Datensicherheit

Da für die Funktion eines Roboters in der Regel eine langfristige Datenspeicherung nicht sinnvoll ist, können gesammelte Daten beispielsweise am Ende eines Bauabschnitts oder Bauprojekts gelöscht werden. Ein Filtern der Daten ist dabei theoretisch möglich, so dass personenbezogene Daten gelöscht oder unkenntlich gemacht werden, wichtige Betriebsdaten jedoch erhalten bleiben.

Die Zweckbindung der Daten und die Datensicherheit sind für den Einsatz von Robotern wichtig, da große Mengen an Daten gesammelt und gespeichert werden. Um einen Missbrauch der gewonnenen Daten zu vermeiden, müssen Vorkehrungen getroffen werden, die einen Zugriff durch Unbefugte oder einen generellen Zugriff von außen verhindern. Rechtsexperten müssen sich damit befassen, wie die gesammelten Daten verwaltet werden, ob eine Unkenntlichmachung der personenbezogenen Daten nötig ist und wie lange die Informationen, die der Roboter jeden Tag sammelt, gespeichert werden dürfen.

3.2.3 Verantwortung und Haftung

Je autonomer ein Roboter durch den Einsatz von verbesserter KI wird, desto schwieriger wird es, Fragen nach der Verantwortung und Haftung zu klären. Da selbst ein Roboter mit hochentwickelter KI keine Person im juristischen Sinne ist, kann er auch nicht für sein Handeln verantwortlich gemacht werden.

Damit Haftungsfragen geklärt werden können, muss verstanden werden, welche Entscheidungen die KI trifft und welche Auswirkungen diese Entscheidungen haben. Um die Entscheidungen der KI nachzuvollziehen, wurde das Konzept der Explainable Artificial Intelligence (XAI) in der Forschung eingeführt. XAI ist wichtig,

um zu verstehen, ob wir den Entscheidungen einer künstlichen Intelligenz vertrauen können und wie es zu diesen Entscheidungen kommt (Holzinger, Mak, Kieseberg, & Holzinger, 2018).

Die Aktionen von KI können anhand der möglichen Implikationen ihrer Handlungen in einem einfachen Modell in zwei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden:

Die erste Kategorie stellt jegliche eher triviale Entscheidungsprozesse dar, bei denen eine Fehlentscheidung keine schwerwiegenden Folgen (monetär, sicherheitsrelevant, etc.) verursachen kann. In diese Kategorie fallen beispielsweise Kaufempfehlungen im Onlinehandel.

Die zweite Kategorie setzt sich aus einer Vielzahl komplexer Entscheidungsprozesse zusammen, die möglicherweise zu den oben genannten Folgen führen können. Ein Beispiel für die zweite Kategorie ist das autonome Fahren.

Im Bauwesen stellt sich dabei neben der Frage nach der Sicherheit auch die Frage nach der Qualität der geleisteten Arbeit. Es muss also überprüft werden, ob die Verfahrensschritte, die von einem Roboter ausgeführt werden, noch einmal auf ihre Qualität untersucht werden müssen oder ob man der internen Qualitätskontrolle des Roboters vertraut und ob spezielle Roboter für die Qualitätskontrolle eingesetzt werden oder ob diese durch einen Menschen durchgeführt werden muss, damit alle Standards erfüllt werden. Forschungen auf dem Gebiet der Robotergestützten Qualitätskontrolle lassen vermuten, dass in Zukunft die Abnahme von Bauprozessen hauptsächlich mit Robotern durchgeführt wird, da diese genauer und zuverlässiger arbeiten als Menschen, deren Arbeitsleistung von der aktuellen physischen und psychischen Verfassung abhängt (Yan et al., 2019). Speziell bei Bauprojekten mit vielen Subunternehmern kann der Einsatz von Robotern zur Abnahme den Generalunternehmer unterstützen. Die erbrachte Bauleistung kann nach jedem Arbeitsschritt automatisch überprüft und

dokumentiert werden. Eventuell auftretende Mängel werden so frühzeitig erkannt und festgehalten. Je mehr Unternehmen an einem Bauprojekt beteiligt sind, desto schwieriger wird es, entstandene Mängel zuzuordnen. Beschädigungen an einem Bauteil können auch durch Subunternehmer verursacht werden, die sich mit dem Erbringen einer anderen Leistung beschäftigen. Eine automatisierte und ausführliche Dokumentation der erkannten Mängel vereinfacht es, Mängel den jeweiligen Subunternehmern zuzuordnen.

Damit verantwortungsvolle Aufgaben an Roboter auf Baustellen übergeben werden können, muss vom Gesetzgeber geregelt werden, wann der Betreiber und wann der Hersteller eines Roboters für dessen Handlungen verantwortlich ist.

3.3 Soziale Rahmenbedingungen

3.3.1 Weiterbildung

Durch den Einsatz von Robotern im Bauwesen wird sich das Arbeitsumfeld für Bauarbeiter verändern. Um einen Einsatz zu ermöglichen, werden Baustellen umstrukturiert und in ihrer Organisation zunehmend herkömmlichen Fabriken ähneln. Das Tätigkeitsfeld der auf dem Bau beschäftigten Menschen wird sich grundlegend wandeln. Die Bedienung, aber auch die Kontrolle der Roboter wird zukünftig eine größere Bedeutung erlangen. Damit die Transformation zu modernen Arbeitern gelingt, sind Weiterbildungsmaßnahmen durch den Arbeitgeber unerlässlich. Zentrale Themen bei der Weiterbildung sind:

- Arbeitssicherheit beim Umgang mit Robotern
- Bedienung von Robotern
- Instandhaltung von Robotern
- Baustellenorganisation

Weiter- bzw. Ausbildungsmaßnahmen sind nicht nur für bereits im Bauwesen tätige Arbeiter wichtig, sondern vor allem auch für Auszubildende und

Studierende, die in Zukunft in ihrem Berufsleben immer häufiger in Kontakt mit Robotik kommen werden. Dazu sollten fachübergreifend Veranstaltungen angeboten werden, die sich mit der Funktionsweise, dem Einsatzgebiet und dem Potential von Robotern beschäftigen. Ein zentraler Punkt der Weiterbildungsmaßnahmen ist, wie Menschen mit Robotern in unterschiedlichen Formen zusammenarbeiten können, um die Produktivität zu steigern.

3.3.2 Soziale Absicherungen

Je nach Sektor werden in Zukunft Arbeiter teilweise durch Roboter ersetzt. In der Baubranche wird angenommen, dass bis zu 40% der Arbeitsplätze in Gefahr sind. Vor allem körperliche Arbeit und monotone Aufgaben werden in Zukunft von Robotern übernommen (McKinsey Global Institute, 2018; PWC, 2018; Rao, Likens, Baccala, & Shehab, 2019). Soziale Absicherungen sind notwendig, damit der weitgehende Einsatz von Robotik und künstlicher Intelligenz nicht zu einer Massenarbeitslosigkeit führt. Man geht davon aus, dass durch die Automatisierung bis in die 2030er Jahre ca. 37 % der Arbeitskräfte in Deutschland durch künstliche Intelligenz und Roboter ersetzt werden (PWC, 2018).

Besonders wenn Roboter eine hohe Produktivität in bisher auf menschliche Arbeitskraft angewiesenen Bereichen erreichen, wie beispielsweise der Hadrian X, werden soziale Absicherungen relevant. Selbst wenn eine einwandfreie Funktion des Roboters den Einsatz eines Arbeiters erfordert, werden insgesamt doch 49 Arbeitsplätze vernichtet. Zwar können Arbeiter, die durch den Hadrian X ersetzt werden, auch anderweitig eingesetzt werden, jedoch werden diese Ausweichtätigkeiten durch die zunehmende Automatisierung immer weiter reduziert.

Durch den zunehmenden Bedarf an Robotern und deren Einsatz werden jedoch auch neue Arbeitsplätze geschaffen, die heutzutage nicht auf Baustellen zu finden sind. Diese unterscheiden sich von der bisher üblichen Tätigkeit eines

Bauarbeiters. Mögliche Tätigkeiten sind die Steuerung und Überwachung von Robotern. Besonders dann, wenn mehrere Roboter zusammenarbeiten sollen, werden Menschen benötigt, die den Ablauf auf der Baustelle überwachen.

Als mögliche soziale Absicherung kommen zum Beispiel Fortbildungsmaßnahmen in Frage, die den Beschäftigten helfen können, den Übergang von der eher handwerklichen zur industrialisierten Produktion zu schaffen. Wenn die Automatisierung weiter fortschreitet, werden jedoch mehr und mehr Menschen ihren Arbeitsplatz verlieren. Sollten die neu geschaffenen Arbeitsplätze nicht ausreichen, um den Bedarf an Arbeit zu decken, könnte die Einführung eines bedingungslosen Grundeinkommens in Erwägung gezogen werden.

3.4 Fazit

Die vorangegangenen Betrachtungen haben gezeigt, dass die folgenden Herausforderungen für einen gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen im Bauwesen bewältigt werden müssen, um einen gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen zu ermöglichen:

- Technische Herausforderungen
 - Erhöhung des Planungsstandards
 - Berücksichtigung von zusätzlichen Informationen die für einen Robotereinsatz nötig sind, z.B. Mensch-Roboter-Schnittstellen und Energieversorgung
 - Anpassung der Bauverfahren für einen Robotereinsatz
 - Forschungen auf dem Gebiet der Robotik, um einen umfassenden Einsatz zu ermöglichen
- Rechtliche Herausforderungen
 - Gewährleistung der Sicherheit in einem MRZ-Szenario durch organisatorische und technische Maßnahmen

- Unkenntlichmachung personenbezogener Daten, die von Robotern gesammelt werden
- Klärung von Haftungsfragen, wenn Roboter Verantwortung übernehmen sollen.
- Soziale Herausforderungen
 - Vorbereitung der Arbeiter auf einen gemeinsamen Einsatz mit Robotern
 - Soziale Absicherungen für diejenigen, die durch einen vermehrten Robotereinsatz ihren Arbeitsplatz verlieren

4. Verbesserte Mensch-Roboter-Zusammenarbeit

4.1 Technische Spezifikationen

4.1.1 Planung

Damit Roboter effektiv auf der Baustelle eingesetzt werden können, müssen Gebäude anders als bisher geplant werden. Der Fokus sollte darauf liegen, bereits vor Baubeginn möglichst detailliert zu planen. Das bedeutet, dass nachträgliche Änderungen reduziert oder ausgeschlossen werden. Ein denkbare Konzept dafür ist die Systembauweise, die Goldbeck bereits heute praktiziert. Dabei werden sowohl die Planung als auch die Ausführung von einem Unternehmen übernommen. Zur Erfüllung von Kundenwünschen werden bestehende Systemelemente kombiniert. Der Nachteil der Systembauweise liegt darin, dass ein Mittelweg zwischen Anpassungsfähigkeit und Einfachheit gefunden werden muss, so dass möglichst viele Kundenwünsche berücksichtigt werden können, eine industrialisierte Bauweise aber dennoch möglich ist. Die Systemelemente werden in Werkshallen vorgefertigt und dann auf der Baustelle nur noch verbaut. Eine Systembauweise kommt aktuell nur sehr begrenzt zum Einsatz, weshalb eine Produktion von Bauelementen vor Ort auch weiterhin nötig ist. Um eine möglichst

hohe Produktivität zu erreichen, werden Gebäude und Baustellen so geplant, dass Roboter und Menschen möglichst einfach gemeinsam eingesetzt werden können.

Um Roboter und Menschen gemeinsam auf einer Baustelle einzusetzen, müssen sich die Planung und die Baustelleneinrichtung von einer herkömmlichen Baustellenplanung unterscheiden. Die Baustelle wird so geplant, dass ein möglichst hoher Automatisierungsgrad erreicht wird. Da eine vollständige Automatisierung nur schwer möglich ist, ist auch die Sicherheit der Menschen auf der Baustelle zu berücksichtigen. Zusätzlich zu der herkömmlichen Planung einer Baustelle sind noch weitere Aspekte zu betrachten bzw. anzupassen:

- Arbeitsbereiche der Roboter
- Arbeitsbereiche von Menschen
- Gemeinsame Arbeitsbereiche
- Energieversorgung
- Informationsmanagement
- Sicherheitskonzept

4.1.2 Einsatzgebiete von Robotern

Die Einsatzgebiete werden in drei Kategorien unterteilt: leicht automatisierbare Arbeiten, bedingt automatisierbare Arbeiten und schwer automatisierbare Arbeiten.

Um die einzelnen Arbeiten den jeweiligen Kategorien zuzuordnen, werden einige Kriterien aufgestellt, anhand derer entschieden wird, wie leicht eine Arbeit automatisierbar ist. Die folgenden Kriterien sind dabei entscheidend:

- Technische Realisierbarkeit
- Wirtschaftlicher Nutzen
- Häufigkeit des Prozesses

Die betrachteten Bauprozesse werden so ausgewählt, dass ein breites Spektrum an Gewerken abgedeckt wird. So kann untersucht werden, an welcher Stelle sich

ein Einsatz von Robotern, von Menschen oder ein kombinierter Einsatz lohnt. Der Fokus wird dabei jedoch auf dem Rohbau liegen, da dieser einen großen Teil der Baukosten ausmacht.

Rohbauprozesse:

- Erdarbeiten
- Kanalisierungsarbeiten
- Mauern
- Schalen
- Bewehren
- Betonieren
- Fassade

Prozesse aus anderen Bauabschnitten:

- Abrissarbeiten
- Dämmungsarbeiten
- Putzarbeiten
- Verlegen von Fußboden

Zu den gut automatisierbaren Arbeiten zählen das Mauern, Schalen, Bewehren und Betonieren sowie Dämmungs- und Putzarbeiten. Diese Prozesse zeichnen sich dadurch aus, dass sie häufig wiederholt werden und generell wenige Arbeitsschritte benötigen. Das reduziert die notwendige Komplexität der eingesetzten Roboter.

Bei Erdarbeiten, Kanalisierungsarbeiten, dem Verlegen von Fußboden und dem Bauen von Fassaden handelt es sich um bedingt automatisierbare Prozesse. Zwar sind diese Prozesse generell nicht komplex, können jedoch auf Grund der möglichen Vielfältigkeit weniger gut im Voraus geplant werden. Beim Ausheben von Baugruben können beispielsweise Findlinge, vergrabener Bauschutt oder in

deutschen Städten sogar alte Fliegerbomben den Aushub erschweren oder unmöglich machen. Auch die anderen bedingt automatisierbaren Prozesse sind in ihrer Ausführung erheblich von dem zu errichtenden Bauwerk abhängig und eignen sich deshalb weniger gut für die Automatisierung. Zunehmende Standardisierung von Gebäuden und Bauelementen könnte sie jedoch langfristig interessanter machen.

Am schlechtesten automatisierbar ist die Abrissarbeit. Jedes Gebäude, das abgerissen werden muss, ist ein Unikat und der Roboter müsste für die einzelnen Abrissarbeiten angepasst werden. Planunterlagen von älteren Gebäuden liegen – wenn überhaupt – in der Regel nur in Papierform vor. Sie können nicht genutzt werden, um Abrissarbeiten automatisch durchzuführen, da dem Roboter keine Informationen über das Gebäude zur Verfügung stehen. Maschinen für den Abbruch, die konzipiert sind, den Menschen vor den großen Gefahren im Abbruchgewerbe zu schützen, kommen bereits zum Einsatz, sind jedoch in der Regel ferngesteuert, da nur so ein sicherer Abbruch gewährleistet werden kann. Besonders wichtig für einen Einsatz von Abrissrobotern ist auch, dass für die Sicherheit derer gesorgt ist, die sich nicht direkt auf der Baustelle befinden, zum Beispiel Nachbarn oder Passanten.

Da die technologischen Einschränkungen aktuell noch von großer Relevanz sind, werden in dieser Arbeit lediglich gut automatisierbare Arbeiten betrachtet. Zur Betrachtung eines optimierten Robotereinsatzes werden häufig vorkommende Bauprozesse in ihre elementaren Schritte zerlegt, sodass überprüft werden kann, welche Arten von Robotern sich für welchen Einsatz eignen. Anhand der Grundfunktionen, die nötig sind, um die elementaren Schritte auszuführen, können auch Roboter für das Beispielszenario eingesetzt werden, die bisher noch nicht auf dem Markt sind. Zur Einschränkung des Themas werden vor allem diejenigen Prozesse betrachtet, die eine besonders große physische oder gesundheitliche Belastung darstellen. Des Weiteren wird die Betrachtung auf Prozesse des Massivbaus und des Ausbaus begrenzt, da diese einen hohen Anteil an den Baukosten und der Bauzeit haben.

Mauern:

Das Mauern ist ein Prozess, der in vielen Massivbauwerken einen hohen Zeitanteil einnimmt. Das liegt daran, dass selbst mit großformatigen Steinen oft nur eine Produktivität von 1,43 m²/h erreicht wird

Der Prozess des Mauerns lässt sich in die folgenden Schritte zerlegen:

- Positionierung am Einsatzgebiet
- Greifen
- Heben
- Messen
- Zusägen
- Auftragen
- Positionieren des Baumaterials

Unter der Annahme, dass der Prozess des Mauerns vollautomatisch stattfindet, muss das Verlegemuster der Ziegel bereits im Voraus feststehen. Auf diese Weise kann das Mauerwerk so optimiert werden, dass möglichst wenig gesägt werden muss. So lassen sich Zeit und Material einsparen. Das Verlegemuster kann aus den 3D-Planunterlagen automatisch erzeugt werden.

Verputzen:

Putzarbeiten dauern im Schnitt zwischen 0,4 und 0,5 h/m² und sind eine, auf die Teilschritte bezogen, sehr simple Tätigkeit. Damit ein Roboter Putzarbeiten eigenständig erledigen kann, muss er die folgenden Aufgaben erfüllen können:

- Positionierung am Einsatzgebiet
- Auftragen
- Glätten

Schalen:

Durch das teils hohe Gewicht von Schalttafeln können diese in der Regel nicht ohne Hilfe von Baugeräten eingebaut werden. Dennoch sind Menschen nötig, die die Bauteile einhängen, an die richtige Position befördern und befestigen oder abstützen. Unter der Voraussetzung eines weitgehend standardisierten Schalungssystems sind die elementaren Funktionen, die ein Roboter erfüllen müsste, um eigenständig Schalung zu verbauen, nicht besonders komplex:

- Positionierung am Einsatzgebiet
- Greifen
- Heben
- Positionieren des Baumaterials
- Befestigen

Bewehren:

Die Bewehrungsarbeit ist eine Arbeit, die mit großer physischer Belastung einhergeht und gleichzeitig eine Gesundheitsgefährdung darstellt. Schnittverletzungen am Bewehrungsstahl oder Bindedraht sind keine Seltenheit und können auch zum Ausfall von Arbeitskräften führen. Eine häufig gebückte Arbeitshaltung und das Heben von schweren Bewehrungskörben wirken sich negativ auf die Gesundheit der Arbeiter aus, weshalb eine Automatisierung des Bewehrens anzustreben ist. Die Elementarfunktionen, die ein Roboter besitzen muss, um selbstständig Bewehrung herzustellen, unterscheiden sich unwesentlich voneinander, wenn statt mit Bewehrungskörben mit Stab- oder Mattenstahl gearbeitet wird.

- Positionierung am Einsatzgebiet
- Greifen
- Heben
- Schneiden (nicht bei fertigen Körben)

- Positionieren des Baumaterials
- Befestigen

Betonieren:

Das Betonieren stellt keine große physische Belastung dar. Jedoch entstehen durch die eingesetzten Chemikalien gesundheitliche Gefahren, die nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Dazu zählen die Schädigung von Haut und Augen durch Frischbeton und Trennmittel. Beim Verdichten werden starke Schwingungen auf den Menschen übertragen, was zu Schädigungen des Nervensystems führen kann. Auf Grund der negativen gesundheitlichen Auswirkungen lohnt sich eine Automatisierung des Betonierens oder zumindest von einzelnen Teilarbeiten.

- Positionierung am Einsatzgebiet
- Fördern von Beton
- Messen der betonierten Menge
- Verdichten des Betons

4.1.3 Mensch-Roboter-Schnittstellen

Die Schnittstellen zwischen Menschen und Robotern unterscheiden sich je nach geplantem Einsatzgebiet und Level der Zusammenarbeit. Auf Grund der Komplexität der Bedingungen auf der Baustelle wird Zusammenarbeit auf den Levels 1 – 3 stattfinden. Ausgehend von den Levels der Zusammenarbeit, die in Kapitel 2 definiert wurden, können die Schnittstellen für die jeweiligen Levels beschrieben werden.

Für Level-1-MRZ gibt es keine direkten Schnittstellen zwischen Menschen und Robotern, da keine direkte Zusammenarbeit stattfindet. Dennoch müssen Roboter in der Lage sein, auf die Anwesenheit von Menschen zu reagieren.

Für Level-2-MRZ ist der Zweck der Schnittstellen, einen einfachen und sicheren Austausch von Material und Bauelementen zu gewährleisten. Da unterschiedliche Materialien oder Bauelemente übergeben werden, werden potenziell auch

unterschiedliche Roboter eingesetzt. Um nicht für jeden einzelnen Roboter spezielle Schnittstellen einzurichten, werden die Schnittstellen so geplant, dass sie unabhängig vom eingesetzten Roboter sicher sind.

Die Übergabe von Baumaterial oder -elementen kann direkt zwischen Robotern und Menschen erfolgen. Dazu benötigt der Roboter eine spezielle Sensorik und Software, um zu erkennen, wo das Material positioniert werden muss, damit es an Menschen übergeben wird. Zur Erfassung der Abmessungen des Materials, das der Roboter hält, werden Lasersensoren verwendet, die Genauigkeiten im Millimeterbereich erreichen. Die Abmessungen des getragenen Materials sind wichtig, damit der Roboter entscheiden kann, welcher Abstand zum Menschen eingehalten werden muss. Die Position der Menschen kann über Kameras abgefragt werden. Das erlaubt es dem Roboter, sich so zu positionieren, dass das Material übergeben werden kann. Zur Sicherheit der Arbeiter wird der Roboter dabei eine eher passive Rolle übernehmen und der Mensch sich das Material nehmen. Je nach eingesetztem Roboter setzt diese Form der Zusammenarbeit jedoch mehr Sensorik auf Seiten der Roboter voraus, als diese besitzen.

Um die Anforderungen an Roboter möglichst wenig zu erhöhen, ist es möglich, für die Level-2-MRZ Zonen einzurichten, in denen Material oder Bauelemente übergeben werden. Dafür muss der Roboter lediglich an eine Position fahren und dort das Material abstellen. Es ist dennoch wichtig, dass der Roboter in der Lage ist, auf Menschen zu reagieren und diese nicht zu verletzen. Dafür können wieder Kameras zum Einsatz kommen. Die Austauschzonen können entweder einfach als designierte Plätze auf der Baustelle realisiert werden oder in einer komplexeren Form als Zonen, die über Möglichkeiten zum Materialmonitoring verfügen.

Die Schnittstellen für Level-3-MRZ sind abhängig von den eingesetzten Robotern, da viele unterschiedliche Formen der Zusammenarbeit stattfinden können. Zur Beschreibung der Schnittstellen ist es wichtig, exakt festzulegen, welche Arbeiten durch Menschen und welche durch Roboter durchgeführt werden. Eine räumliche Trennung ist bei Level-3-MRZ nicht möglich, weshalb die Einhaltung der

Schutzprinzipien des VDMA besonders wichtig ist. Der VDMA legt in seinen Richtlinien den Fokus auf den gesamten Arbeitsbereich des Roboters. Je nach eingesetztem Roboter entspricht der Arbeitsbereich des Roboters jedoch nicht dem tatsächlichen Gefährdungsbereich. Zum Beispiel hat ein Turmdrehkran einen großen Arbeitsraum, der tatsächliche Gefährdungsbereich ist jedoch gering. Er befindet sich unter der gehobenen Last und in einem kleinen Bereich darum.

4.1.4 Energieversorgung

Für die mehr oder weniger stationären Roboter, die sich höchstens innerhalb ihres Einsatzgebietes bewegen, erfolgt die Energieversorgung über einen direkten Anschluss an das Stromnetz. Dafür muss überprüft werden, ob Starkstrom benötigt wird. Da Starkstrom auch für andere Baugeräte benötigt wird, führt der aufgrund des Robotereinsatzes gesteigerte Energiebedarf nicht zu einer erhöhten Komplexität der Baustelle. Werden mobile Roboter eingesetzt, muss geregelt werden, wie die Energieversorgung stattfindet, um eine möglichst hohe Einsatzzeit zu gewährleisten.

Mobile Roboter werden mit Batterien betrieben. Diese haben jedoch nur begrenzte Ladekapazität und sind vermutlich nicht in der Lage, Roboter für einen gesamten Arbeitstag zu betreiben. Für die dauerhafte Stromversorgung von mobilen Robotern ist der Einsatz von Schnellladestationen denkbar, die so auf der Baustelle zu platzieren sind, dass die Roboter geladen werden können, wenn sie gerade nicht benötigt werden. Das ist jedoch nur bei Robotern möglich, die nicht dauerhaft eingesetzt werden. Arbeitsunterbrechungen lassen sich durch den Einsatz von Austauschrobotern bzw. die Verwendung leicht austauschbarer Batterien auf ein Mindestmaß verringern. Infolge der hohen Anschaffungskosten von Austauschrobotern sind jedoch die anderen Optionen vorzuziehen. Sowohl beim Einsatz von Schnellladestationen als auch beim Einsatz von Austauschbatterien wird ein vollautomatischer Ladeprozess bzw. Batteriewechsel angestrebt.

Die Planung der Energieversorgung hat sowohl den Energiebedarf der Roboter als auch der Werkzeuge, die von Menschen genutzt werden, zu berücksichtigen. Auf einer normalen Baustelle stellt es kein Problem dar, wenn ein Kabel mit Hilfe einer Verlängerungstrommel direkt von A nach B geführt wird, solange es auf dem Boden liegt und die Stolpergefahr minimiert ist. Werden jedoch Roboter auf der Baustelle eingesetzt, können freiliegende Kabel leicht zu Unfällen führen. Es ist daher Sorge dafür zu tragen, dass Kabelstränge keine Gefahrenquelle darstellen. Daher werden Kabel in entsprechende Kanäle aus Hartplastik möglichst im Randbereich verlegt, da diese eine Unfallgefahr durch lose verlegte Kabel eliminieren. Damit Kabelkanäle eingesetzt werden können, müssen Roboter allerdings fähig sein, diese zu überwinden. Alternativ dazu können auch Stromverteiler außerhalb der Verkehrsbereiche der Roboter aufgestellt werden. Werden alle Kabel in Kabelkanäle verlegt, führt dies zu einem hohen Zeitaufwand, vor allem, wenn Werkzeuge nur kurz gebraucht werden. Für jeden Werkzeugeinsatz müssten Kabel in Kabelkanäle verlegt werden. Die Verteiler hingegen werden einmal aufgestellt und deren Anschlusskabel in Kanäle verlegt. Alle weiteren Anschlusskabel müssen nicht in Kanäle verlegt werden, da sie sich nicht in Bereichen befinden, in denen sich Roboter bewegen.

4.1.5 Informationsverarbeitung

Um Roboter und vor allem mobile Roboter zu steuern, muss eine Steuereinheit existieren, die die gesammelten Sensordaten der Roboter sowie Anweisungen und Informationen über die Baustelle verarbeitet. Diese Steuerung kann entweder in den Roboter selbst integriert werden oder zentral erfolgen. Um zu entscheiden, welchem der Systeme der Vorzug zu geben ist, muss untersucht werden, welche Vor- und Nachteile eine zentrale oder dezentrale Informationsverarbeitung mit sich bringt. Vor allem die Effektivität sowie die Kosten des Systems sind hier zu beachten.

Bei der zentralen Datenverarbeitung werden alle Informationen von den einzelnen Robotern gesammelt und an eine zentrale Rechenstelle weitergeleitet, die die Informationen verarbeitet und ihrerseits Befehle an die einzelnen Roboter sendet.

Bei der dezentralen Informationsverarbeitung tauschen die Roboter untereinander Informationen aus und handeln selbstständig. Zum Vergleich der beiden Systeme werden im Folgenden die Vor- und Nachteile aufgelistet. Anschließend ist dann darzulegen, welches System sich für welchen Einsatzzweck eignet.

Zentrale Datenverarbeitung:

Vorteile

- Roboter müssen nicht über eigene Intelligenz verfügen
- Komplexität der einzelnen Roboter wird nicht unnötig erhöht
- Geringere Komplexität führt zu geringeren Preisen
- Geringerer Stromverbrauch

Nachteile

- Leistungsfähige Rechenzentrale benötigt
- Störungen wirken sich auf das Gesamtsystem aus
- Veränderungen am System unter Umständen problematisch

Dezentrale Datenverarbeitung

Vorteile

- Höhere Ausfallsicherheit, da keine zentrale Steuerungseinheit existiert
- Beliebige Veränderungen am System sind möglich
- Flexibler Einsatz möglich

Nachteile

- Höhere Ansprüche an Intelligenz der Roboter
- Komplexität der Roboter wird erhöht
- Höherer Einzelpreis der Roboter

- Höherer Stromverbrauch durch zusätzlich benötigte Rechenleistung von mobilen Robotern

Auf kleinen bis mittleren Baustellen wird die Anzahl der eingesetzten Roboter gering sein, so dass nur wenig Informationsaustausch nötig ist. Zusätzlich sind auf kleinen Baustellen die Bauzeiten häufig geringer. Daher sind ein schneller Einsatz und Abbau des MRZ-Systems gewinnbringend. Eine dezentrale Informationsverarbeitung ermöglicht es, mehrere Roboter unabhängig voneinander einzusetzen und zu betreiben. Jeder Roboter hat selbst alle Fähigkeiten, die für eine MRZ auf unterschiedlichen Levels nötig ist. Die Abstimmung der einzelnen Roboter aufeinander ist jedoch schwierig, da es keine zentrale Verwaltung für die Roboter gibt.

Bei großen Baustellen hingegen, bei denen eine hohe Anzahl an Robotern und eine längere Bauzeit erwartet werden, eignet sich eine zentrale Informationsverarbeitung, da viele einzelne Akteure aufeinander abgestimmt werden müssten. Durch die längere Bauzeit lohnt sich die aufwändigere Installation eines MRZ-Systems, das langfristig die Produktivität auf der Baustelle erhöht.

Die Informationen, die von Robotern gewonnen werden, sind vor dem Zugriff von Unbefugten zu schützen. Wichtig ist aus Datenschutzgründen vor allem der Umgang mit Bildaufnahmen von Arbeitern und Unbeteiligten. Eine denkbare Lösung für die Gewährleistung des Datenschutzes ist es, durch den Einsatz von KI personenbezogene Daten unkenntlich zu machen, bevor die Informationen weitergeleitet werden. Das würde jedoch die nötige Rechenleistung der eingesetzten Roboter oder der zentralen Steuerungseinheit erhöhen.

4.1.6 Navigation auf der Baustelle

Für die Navigation auf der Baustelle ist es wichtig, dass das verwendete System sowohl in Außenbereichen als auch in Innenräumen funktioniert. Je nach Einsatzgebiet des Roboters muss dabei mit unterschiedlicher Genauigkeit

gearbeitet werden. Wird lediglich Material in der Austauschzone abgestellt, muss nicht so genau gearbeitet werden, wie wenn einzelne Bauteile vollautomatisch montiert werden sollen. Eine möglichst hohe Genauigkeit ist jedoch in allen Bereichen wünschenswert.

In den Außenbereichen der Baustelle kann die Ortung über ein Differential-GPS-System erfolgen. Bei der herkömmlichen GPS-Ortung wird die Position des Empfängers anhand der Position von mindestens drei Satelliten bestimmt. Damit können Positionen bis auf ca. einen Meter genau bestimmt werden. Beim Differential-GPS werden die Messungsungenauigkeiten von weiteren Referenzstationen miteinander verrechnet, um so die Fehler bei der Messung zu reduzieren. Durch ein flächendeckendes Netz dieser Referenzstationen können Genauigkeiten von ca. einem Zentimeter erreicht werden (Spektrum, n.d.). Eine Genauigkeit der Roboter auf einen Zentimeter ist für die Baustelle mehr als ausreichend, da die genaue Positionierung des Bauteils entweder durch Menschen erfolgt oder unter Einsatz von weiterer Sensorik.

In den Innenräumen ist eine Positionierung mittels GPS nicht möglich, weshalb andere Ortungssysteme benutzt werden müssen. Dazu können Radarsensoren genutzt werden. Diese sind anders als laserbasierte Messsysteme deutlich genauer, auch wenn die Sicht durch Staub, Dampf oder Rauch eingeschränkt ist. Da Radarsensoren lediglich Entfernungsmessungen durchführen, müssen mehrere Radar-Einzelsensoren kombiniert werden, um eine räumliche Positionsbestimmung zu erlauben (Robotik-Produktion, 2017).

Für beide Ortungsmethoden ist es wichtig, einen Ursprung auf der Baustelle festzulegen, der es erlaubt, ein lokales Koordinatensystem einzuführen. So können alle gewonnenen Ortungsdaten in das Koordinatensystem umgerechnet werden, was eine genaue Ortung aller Roboter auf der Baustelle erlaubt. Anhand des lokalen Koordinatensystems können dann auch Wände, Baugeräte und andere Hindernisse markiert werden, die von mobilen Robotern umfahren werden sollen. Der Koordinatenursprung kann bereits im 3D-Modell der Baustellenplanung

festgelegt werden. Dadurch erhalten alle im Plan enthaltenen Elemente Koordinaten, die genutzt werden können, um Roboter zu steuern.

Die Positionierung der Roboter erfolgt je nach verwendetem System zentral oder dezentral. In beiden Fällen ist es jedoch wichtig, dass die Baustellenplanung aktualisiert wird. Durch den Baufortschritt kommen ständig neue Hindernisse für Roboter hinzu oder werden entfernt. Beispielsweise werden Wände errichtet oder temporäre Stützen für das Betonieren der Decke entfernt. Diese Veränderungen müssten in der Pfadplanung berücksichtigt werden, wenn diese abhängig vom Baufortschritt angepasst werden soll. Zwar muss nicht jede kleine Änderung festgehalten werden, jedoch sollte am Ende des Arbeitstages das Modell auf den neuesten Stand gebracht werden. Eine denkbare Lösung für die Navigation anhand eines 3D-Modells ist es, errichtete Bauteile im 3D-Modell der Baustelle als gebaut zu markieren, sodass diese in der Ortung der Roboter berücksichtigt werden. Zur eigentlichen Pfadfindung der Roboter müsste untersucht werden, ob sich aus dem vorhandenen 3D-Modell ein Graph bilden lässt, der die Ermittlung von Wegen mittels des Dijkstra- Algorithmus ermöglicht.

4.2 Wirtschaftliche Aspekte des Robotereinsatzes

Neben den technischen Aspekten ist die Planung eines Robotereinsatzes auf der Baustelle auch davon abhängig, welche Leistung die jeweiligen Roboter erbringen und was sie kosten. Dazu werden für die bereits ausgewählten gut automatisierbaren Arbeiten aus der Literatur bekannte Arbeitszeitrichtwerte und Lohnkosten mit den Leistungsdaten und Kosten der Roboter verglichen, sofern diese vorhanden sind.

Die Arbeitszeiten und Kosten für die betrachteten Arbeitsschritte werden dem Buch Plümecke -Preisermittlung für Bauarbeiten, 27. Auflage entnommen. Betrachtet werden dabei die am häufigsten verwendeten Varianten (siehe Tabelle 2). Für die Verwendung der bekannten Werte wurden diese in ein möglichst vergleichbares Format umgerechnet. Dafür wurde die Einheit „Hergestellte Menge/Zeit“ gewählt.

Tabelle 2 Arbeitszeitrichtwerte nach Plümecke – Preisermittlung für Bauarbeiten 27. Auflage

Tätigkeit	Arbeitsleistung
Mauern KS 16DF	1,43 m ² /h
Außenputz	1,47 m ² /h
Innenputz	3,03 m ² /h
Schalen	2,56 m ² /h
Bewehrung (Stabstahl)	0,022 t/h
Bewehrung (Mattenstahl)	0,062 t/h
Betonieren	0,909 m ² /h

Für die Berechnung der zukünftigen Lohnkosten wird lediglich eine Inflationsanpassung vorgenommen, da sonstige Veränderungen der Löhne oder

Sozialabgaben nicht absehbar sind. Zusätzlich werden die Lohnkosten an den aktuellen Stand angepasst, da die Werte aus dem Jahr 2012 stammen. Die Materialkosten werden nicht betrachtet, da sie bei Robotern und Menschen gleich sind. Die Ergebnisse der Anpassung sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3 Kostenrichtwerte nach Plümecke – Preisermittlung für Bauarbeiten 27. Auflage

Tätigkeit	Lohnkosten/Einheit
Mauern KS 16DF	35,02 €/m ²
Außenputz	33,46 €/m ²
Innenputz	16,24 €/m ²
Schalen	19,19 €/m ²
Bewehren (Stabstahl)	2263,65 €/t
Bewehren (Mattenstahl)	787,36 €/t
Betonieren	54,13 €/m ²

Anhand der Lohnkosten für das Erbringen von Bauleistungen kann ermittelt werden, wie viel ein Roboter, der die gleiche Leistung erbringt wie ein Mensch oder mehr, kosten darf. Dafür wird die maximale Arbeitsleistung über die gesamte Lebensdauer ermittelt. Für viele Baugeräte wird eine durchschnittliche Lebensdauer von ca. 8 Jahren angenommen. Da bisher keine Werte für die Lebensdauer von Robotern bekannt sind, werden für sie die gleichen Werte angenommen. Im Folgenden wird errechnet, wie viel ein Roboter über seinen gesamten Lebenszyklus kosten darf. Das schließt Investitionskosten, Abschreibungen, Wartungs- und Reparaturkosten sowie Kosten für Betriebsstoffe und Energie ein. Die Arbeitsleistung der Roboter hat auf seinen maximalen Preis einen großen Einfluss, ist jedoch in den meisten Fällen nicht bekannt. Daher wird angenommen, dass die Leistung von Robotern deren Leistungsdaten unbekannt sind und Menschen gleich ist. Da Roboter theoretisch 24h am Tag ohne

Unterbrechung arbeiten können, wird dies auch berücksichtigt. Wochenenden werden nicht als Arbeitszeit mit einberechnet. Da Roboter wie der Hadrian X mindestens einen Arbeiter benötigen, der Material zuliefert und den Reflektor platziert, werden die Kosten für diesen Arbeiter vom maximalen rentablen Anschaffungspreis abgezogen. Da die Roboter 24h am Tag arbeiten, ist Schichtarbeit auf der Baustelle nötig, was zu höheren Kosten führt. Es wird für alle Roboter angenommen, dass es mindestens einen Arbeiter gibt, der auf der Baustelle eine Überwachungsfunktion ausübt. Daraus ergeben sich die folgenden maximalen Kosten für Bauroboter in Tabelle 3.

Tabelle 4 Maximale Roboterkosten über den Lebenszyklus

Roboter für Tätigkeit	Arbeitsleistung	Max. €/8 Jahre [€]	Bekannte Abzüge [€]	Gesamt [€]
Mauern (Allgemein)	1,43 m ² /h	2.499.987	1.023.561	1.476.426
Mauern (Hadrian X)	26 m ² /h	45.454.325	1.023.561	44.430.763
Außenputz	1,47 m ² /h	2.455.565	1.023.561	1.432.004
Innenputz	3,03 m ² /h	2.456.302	1.023.561	1.432.741
Schalungsarbeit	2,56 m ² /h	2.452.617	1.023.561	1.429.056
Bewehren (Stabstahl)	0,022 t/h	2.486.026	1.023.561	1.462.465
Bewehren (Mattenstahl)	0,062 t/h	2.436.895	1.023.561	1.413.334
Betonieren	0,909 m ² /h	2.456.302	1.023.561	1.432.741

Die Berechnung der maximalen Kosten beruht auf der Annahme, dass sich der Roboter kontinuierlich, d.h. ohne Unterbrechung, im Einsatz befindet. Tatsächlich kann aufgrund der bekanntermaßen variablen Auftragslage in der Praxis nicht von einer wirklich 100-prozentigen Auslastung des Roboters ausgegangen werden.

5. Beispielszenario

Als Beispielszenario für einen gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen auf der Baustelle wird der Bau eines Gebäudes in Mischnutzung mit vier Stockwerken und einer Gesamtgeschossfläche von ca. 3000 m² analysiert. 25% der Nutzfläche sollen als Gewerbefläche genutzt werden, die verbleibenden 75% als Wohnfläche. Im Kellergeschoss ist eine Tiefgarage geplant. Das Gebäude wird in Massivbauweise errichtet.

Bei den Wänden des Kellergeschosses handelt es sich um Stahlbetonwände. Diese werden als Halbfertigteile angeliefert und verbaut. Das Treppenhaus und der Aufzugsschacht werden zur Aussteifung des Gebäudes genutzt. Alle Stahlbetonwände werden in Halbfertigteilbauweise errichtet.

Tragende Wände oberhalb des Kellergeschosses, mit Ausnahme des Aufzugsschachts, werden in Mauerwerksbauweise errichtet. Dies ermöglicht den Einsatz des Hadrian X, der eine deutlich höhere Arbeitsleistung erreicht als Menschen. Da sich das Gebäude in einer Lage mit hohem Verkehrsaufkommen befindet, werden die Mauerwerkswände aus Kalksandstein hergestellt, Kalksandstein besitzt eine hohe Rohdichte und gewährt somit einen guten Lärmschutz.

Nicht tragende Wände werden aus Porenbetonsteinen gemauert. Diese besitzen eine niedrige Rohdichte und sind leicht zu verarbeiten.

Alle Decken des Gebäudes werden mit Hilfe von Filigrandecken in Halbfertigteilbauweise hergestellt. Durch den Einsatz von Filigrandecken fällt ein großer Anteil der Schalarbeiten weg und die Bauzeit kann verkürzt werden.

Die erwarteten Baukosten für ein Gebäude dieser Größe belaufen sich ausgehend von den Erfahrungswerten des BKI auf rund 6 Millionen €. Der Rohbau wird ca. 50% der Baukosten ausmachen.

5.1 Anwendung der technischen Spezifikationen

5.1.1 Planung und Einsatzgebiete

Bei der Planung des Gebäudes wurde der Einsatz von Robotern berücksichtigt. Die Bauweise und die eingesetzten Bauverfahren wurden so gewählt, dass ein möglichst großer Anteil der Bauleistungen automatisiert erbracht werden kann. Da der Fokus der Arbeit auf dem Rohbau liegt, werden dabei besonders die Herstellung von Wänden und Decken berücksichtigt, will diese einen Großteil der zu erbringenden Leistung ausmachen.

Bauleistungen, die nur schwer oder gar nicht automatisiert werden können, werden soweit möglich, durch die Vorfertigung unterstützt. Stahlbetonwände und -decken werden daher mit Hilfe von Fertigteilen gebaut.

Die Planung des Beispielgebäudes wird vollständig abgeschlossen, bevor mit dem Bau begonnen wird. Eine frühzeitige Planung erlaubt es, Elemente, die nicht vor Ort hergestellt werden, bereits frühzeitig zu produzieren. Im Beispielszenario kommen für die Stahlbetonwände und -decken Halbfertigteile zum Einsatz, die in Fertigteilwerken hergestellt werden. Änderungen am Rohbau können nach Abschluss der Planung nicht mehr vorgenommen werden.

Die folgenden Roboter werden auf der Baustelle eingesetzt:

- Automatisierter Turmdrehkran
- Fahrerloses Transportsystem
- Automatisierter Lastenaufzug
- IronBot
- TyBot
- Hadrian X
- Kontrollroboter, z.B. QuicaBot

Die Auswahl der Roboter ist so getroffen, dass besonders zeitaufwändige und damit lohnkostenintensive Aufgaben automatisiert werden, bei denen Bauleistung

erbracht wird. Bei dem geplanten Gebäude handelt es sich dabei um das Herstellen der Bewehrung und des Mauerwerks. Zusätzlich werden Arbeiten automatisiert, bei denen keine direkte Bauleistung erbracht wird. Dazu zählen Transportaufgaben und die Qualitätskontrolle. Diese Automatisierung erlaubt es den Arbeitern, die sich auf der Baustelle befinden, sich komplett auf ihre eigentliche Aufgabe zu konzentrieren und dadurch schneller und besser zu arbeiten. Bei dem automatisierten Turmdrehkran, dem fahrerlosen Transportsystem und dem automatisierten Lastenaufzug handelt es sich um Roboter, die in dieser Form im Baugewerbe bislang nicht zum Einsatz kommen, jedoch mit kleineren Adaptionen aus der stationären Industrie übernommen werden können. Transportfahrzeuge für die Baustelle müssen so modifiziert werden, dass diese in der Lage sind, auf unebenem Untergrund zu fahren. Fahrerlose Transportfahrzeuge sind bisher hauptsächlich für den Einsatz in großen Lagerhallen konzipiert, wo sie unter streng kontrollierten Bedingungen arbeiten. Unebenheiten auf dem Boden existieren in Lagerhallen in der Regel nicht, weshalb die Roboter nicht darauf ausgelegt sind, diese zu überfahren. Zusätzlich müssen die Roboter auf ein sich wandelndes Umfeld und die Anwesenheit von Menschen in deren Arbeitsbereich reagieren. Dafür ist mehr Sensorik nötig als in einem automatisierten Lager mit festgelegten Wegen.

Für die Modellbaustelle ist ein automatisierter Turmdrehkran vorgesehen, der in Größe und Leistungsfähigkeit dem Liebherr 42 KR.1 entspricht. Der automatisierte Turmdrehkran wird genutzt, um vorhandene Fertigteile selbstständig zu positionieren. Die Position des Krans ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Montage erfolgt durch Menschen in Form einer Level-3-MRZ. Auch wird Material, das im Zentrallager kommissioniert wird, an den vorgegebenen Einsatzort transportiert.

Da der automatisierte Materialtransport ein hohes Maß an Koordination zwischen Robotern und Menschen erfordert, erfolgt die Steuerung des Materialflusses in einer Steuerzentrale, die im Lager eingerichtet wird. Dabei handelt es sich um einen PC, der über WLAN-Verbindung mit den Robotern kommuniziert. Arbeitern ist es möglich, Bestellungen an das Transportsystem zu senden. Im Zentrallager

wird ein Arbeiter eingesetzt, der Zugriff auf die Bestellungen hat und diese für den Transport zusammenstellt. Da der Turmdrehkran vor allem zum Liefern und Positionieren von Schalttafeln oder Fertigteilen benutzt wird, ist es wichtig, dass dieser möglichst immer zur Verfügung steht. Daher wird im Lager ein kleinerer nicht automatisierter Kran eingesetzt, der vom Lagerarbeiter genutzt wird, um die Bestellungen für den Transport vorzubereiten. Das hat den Vorteil, dass die Wartezeiten auf der Baustelle verkürzt werden, da bereits im Voraus bekannt ist, wann bestimmte Bauteile oder Materialien benötigt werden und sie so rechtzeitig bereitgestellt werden können. Ist eine Lieferung vorbereitet, wird sie in die dafür eingerichtete Abholzone des Turmdrehkrans befördert. Es handelt sich dabei also um einen Übergabeprozess, der als Level-2-MRZ einzuordnen ist.

Die Zusammenstellung des Materials etc. erfolgt durch Menschen, da dadurch die Komplexität des Lagermanagements reduziert werden kann. Damit ein automatischer Transport zwischen Lager und Einsatzort möglich ist, müssten die Position und Menge der gelagerten Materialien der Steuerzentrale bekannt sein. Das wäre zwar generell möglich, würde jedoch einen deutlich erhöhten Planungsaufwand bedeuten, da schon bei der Bestellung der Materialien vom Lieferanten Paletten mit exakt den richtigen Mengen bestellt werden müssten. Wird jedem Material und jeder benötigten Menge ein eigener Platz auf der Lagerfläche zugewiesen, wird eine größere Gesamtlagerfläche benötigt.

Für einen Transport mit dem fahrerlosen Transportsystem werden die Lieferungen in den dafür vorgesehenen Austauschzonen abgestellt. Bei den von autonom fahrenden Fahrzeugen durchgeführten Transportprozessen handelt es sich jeweils um eine Level-2-MRZ. Es werden zwei fahrerlose Transportfahrzeuge eingesetzt, so dass ein dauerhafter Betrieb gewährleistet ist. Für die erwartete Menge der Lieferungen durch Transportfahrzeuge würde ein Fahrzeug genügen, jedoch ist ein Austauschgerät sinnvoll, damit Arbeitsunterbrechungen vermieden werden.

Die Roboter fahren nur zu festgelegten Koordinaten. Informationen über das anzusteuende Geschoss übergeben sie an den Lastenaufzug. Der Aufzug kann auch von Menschen bedient werden. Sowohl der Einsatz des Transportsystems als auch der des Aufzugs sind Level-2-MRZ.

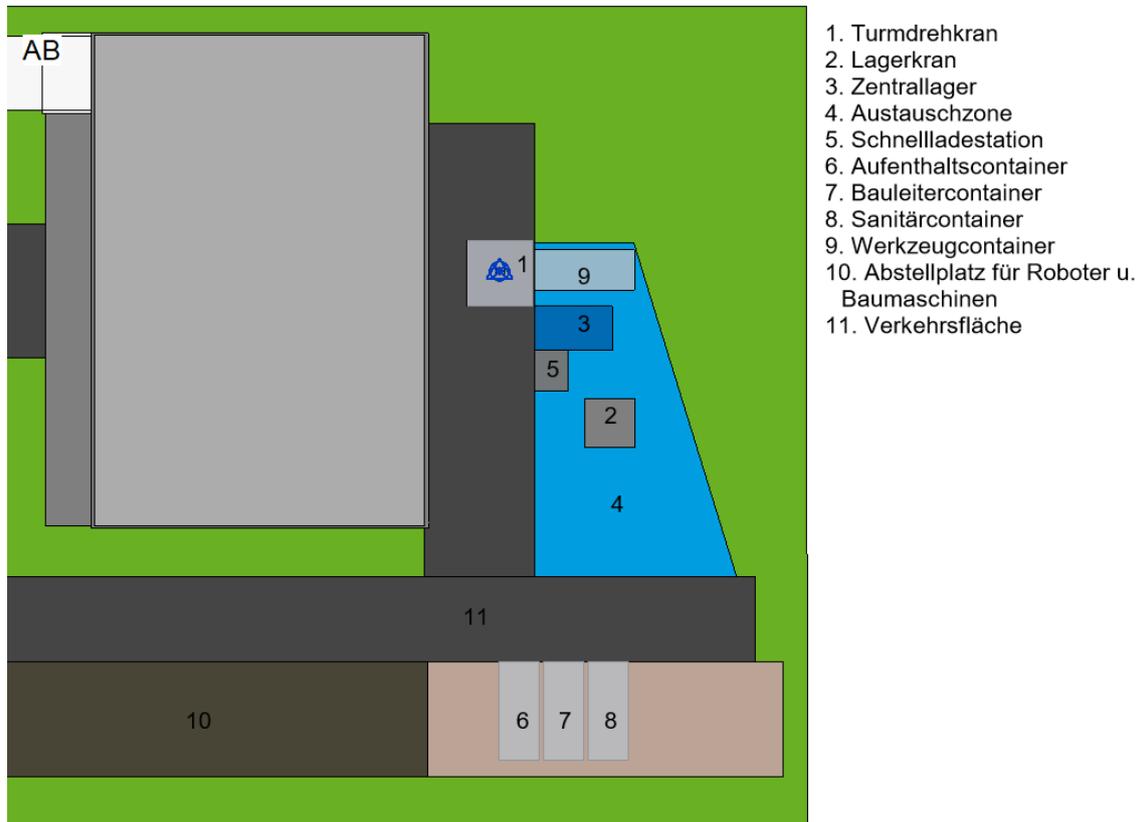


Abbildung 9 Baustelleneinrichtung

IronBot und TyBot werden genutzt, um vollautomatisch die Bewehrung von horizontalen Bauteilen herzustellen. Sie werden also bei der Bodenplatte und den Deckenplatten eingesetzt. Es findet eine Level-1-MRZ statt. Die Abnahme der Bewehrung erfolgt durch Menschen.

Für Mauerarbeiten, die unter freiem Himmel stattfinden, wird der Hadrian X eingesetzt. Bei diesen Mauerarbeiten wird es sich um das tragende Mauerwerk handeln. Der Hadrian X kann auf Grund seiner Bauweise nicht in Innenräumen eingesetzt werden. Er wird von Menschen mit Material beliefert und der nötige Reflektor wird auch durch Menschen versetzt. Um Tür- und Fensterstürze einzubauen, ist eine Zusammenarbeit zwischen Hadrian X und Menschen

notwendig. Es handelt sich um eine Level-3-MRZ. Nichttragende Wände werden nachträglich durch Menschen gemauert, während die folgenden Geschosse errichtet werden. Der QuicaBot wird eingesetzt, um fertiggestellte Bauabschnitte auf ihre Ausführungsqualität zu überprüfen und die gesammelten Informationen zu dokumentieren. Da er sich im gleichen Arbeitsraum wie Menschen aufhalten wird, findet eine Level-1-MRZ statt. Eine Übersicht der Baustelleneinrichtung ist in Abbildung 9 zu sehen.

Bis zum Bau der Bodenplatte werden keinerlei Roboter eingesetzt. Der Bauablauf des Beispielszenarios unterscheidet sich zu diesem Zeitpunkt nicht von dem eines anderen Gebäudes. Auf Grund der Schwierigkeit, Erdarbeiten zu automatisieren, erfolgt der Aushub der Baugrube nicht mit Hilfe von Robotern. Auch die Einrichtung der Baustelle wird nicht durch Roboter unterstützt.

Bei den Schalarbeiten der Bodenplatte kommt der automatisierte Turmdrehkran zum Einsatz. Er entspricht in Größe und Leistungsfähigkeit einem Liebherr 42 KR.1. Der Kran kann gemäß den vorhandenen Plänen die jeweiligen Schaltafeln direkt vom Lager an ihren Einsatzort befördern. Dort werden sie von Menschen verbaut. Für einen automatisierten Transport der Schalelemente ist es wichtig, dass die einzelnen Schalelemente im Lager nach Typen sortiert sind, so dass der Roboter immer das richtige Element auswählt.

Zur Herstellung der Bewehrung der Bodenplatte werden die beiden Roboter IronBot und TyBot eingesetzt, nachdem die Schalarbeiten erledigt sind. Diese verrichten vollautomatisch einen Großteil der Bewehrungsarbeiten der Bodenplatte. Der IronBot ist jedoch nur dafür geeignet, Stabstahl zu verbauen. Sind besondere Biegeformen des Stahls, zum Beispiel als Durchstanzbewehrung, nötig, werden diese von Arbeitern verbaut. Das ist auch bei der vertikalen Anschlussbewehrung für die Stahlbetonstützen der Fall. Die Abnahme der Bewehrung wird durch Menschen durchgeführt.

Die Bodenplatte wird mit Hilfe einer herkömmlichen Betonpumpe hergestellt. Das Betonieren und Verdichten werden nicht mit Hilfe von Robotern durchgeführt, da

bislang noch keine Roboter existieren, die bei der Bewältigung dieses Arbeitsschritts eine merkliche Leistungssteigerung gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren in Aussicht stellen würden. Die Abnahme wird nach Erreichen der Frühfestigkeit durch den QuicaBot durchgeführt. Auf Grund der enthaltenen Sensorik des QuicaBot ist er in der Lage, die gesamte Bodenplatte systematisch auf eventuelle Mängel zu untersuchen. Zu den Mängeln zählen beispielsweise Risse, Abplatzungen oder Unebenheiten. Mängel können automatisch dokumentiert werden.

Während der QuicaBot die Abnahme der Bodenplatte erledigt, werden Schalungen und Bewehrungen für die Stahlbetonwände und -stützen vorbereitet. Da es sich dabei um vertikale Bauteile handelt, können weder IronBot noch TyBot eingesetzt werden. Beim Betonieren kommt wieder eine Betonpumpe zum Einsatz.

Als Deckenplatten werden jeweils Halbfertigteile eingesetzt, deren obere Bewehrungslage durch den IronBot und TyBot hergestellt wird. In der Zeit, in der die Bewehrungsarbeiten durchgeführt werden, wird die Randschalung für die Deckenplatte von den Arbeitern in Zusammenarbeit mit dem Turmdrehkran hergestellt. Da der Einsatz dieser Roboter bereits beschrieben wurde und sich die MRZ-Szenarien, die sich aus ihrem Einsatz ergeben, in den Obergeschossen wiederholen, wird die Arbeit der Bewehrungsroboter nicht erneut betrachtet.

In der Zeit, in der der QuicaBot die Abnahme der Deckenplatte durchführt, werden Vorbereitungen getroffen, um den Hadrian X zur Erstellung des Mauerwerks aufzubauen. Das bedeutet, dass die Austauschzone für das benötigte Material eingerichtet und die Arbeitsfläche freigeräumt wird.

Der Hadrian X wird ohne den LKW-Unterbau eingesetzt. Dadurch verliert er seine Mobilität und muss so positioniert werden, dass er mit seiner 30 m Auslegerlänge alle Stellen erreicht, an denen Mauerwerk hergestellt werden soll. Dafür wird er möglichst zentral im Gebäude positioniert. Im Erdgeschoss ist das Positionieren des Hadrian X ohne Schwierigkeiten möglich, da es wenig Innenwände gibt, die einen Einsatz einschränken (siehe Abbildung 10). Die Innenwände der

Obergeschosse hingegen schränken einen Einsatz des Hadrian X auf Grund seiner Abmessungen ein. Das Material wird mit Hilfe von fahrerlosen Transportsystemen zum Hadrian X transportiert. Die Anlieferung erfolgt bis zur Austauschzone. Da genaue Informationen über das Befüllen des Hadrian X mit Ziegeln und Klebstoff nicht zur Verfügung stehen, wird angenommen, dass das Befüllen von einem Menschen übernommen wird.

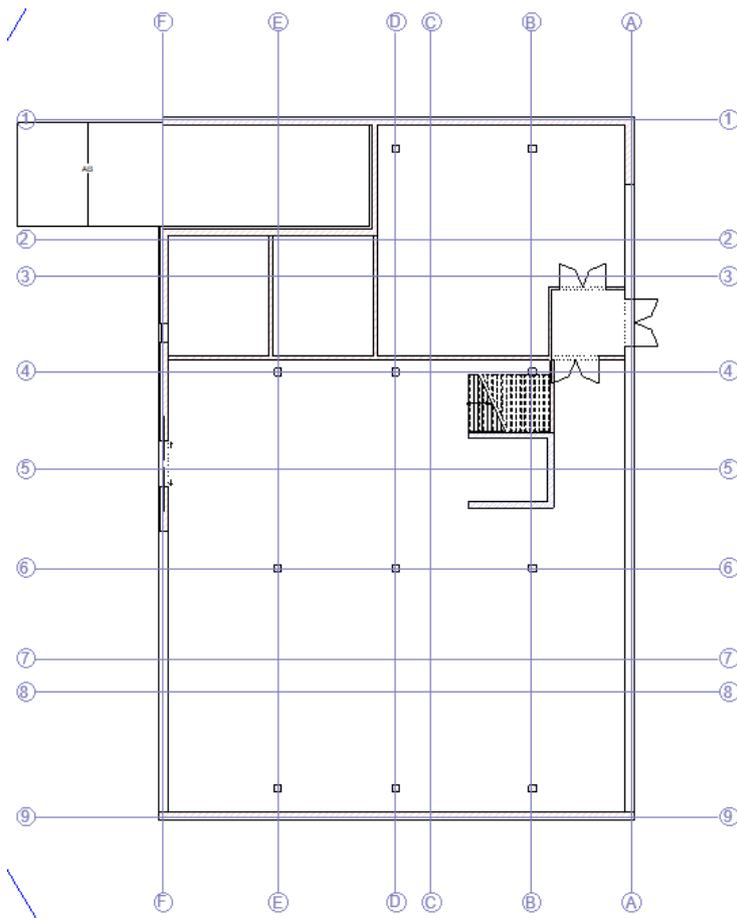


Abbildung 10 Mauern EG

In Bereichen, die vom Hadrian X fertiggemauert wurden, können bereits die Fertigteile für Stützen und Stahlbetonwände von Menschen montiert werden. Sie befinden sich dabei im gleichen Arbeitsraum wie der Hadrian X und es kommt zu einer Level-1-MRZ. Nach Abschluss des Mauerns wird der Hadrian X herausgehoben und die Stahlbetonbauteile werden wie in den vorherigen Bauabschnitten betonierte.

Im Anschluss an die Herstellung und Kontrolle der Deckenplatte wird der Hadrian X in den folgenden Etagen positioniert. Da die oberen Geschosse als Wohnfläche genutzt werden, sind mehr Innenwände vorhanden. Das schränkt die mögliche Position des Roboters ein. Die Position des Hadrian X ist in Abbildung 11 markiert. Die Austauschzone für die Materiallieferungen für den Hadrian X ist mit „A“ markiert. Auf Grund der Positionierung des Hadrian X ist die Reihenfolge, in der die Wände hergestellt werden, besonders wichtig. Sie werden dabei von außen nach innen um den Hadrian X herum errichtet. Nach Abschluss der Mauerarbeiten wird der Hadrian X mit einem Kran aus dem Gebäude gehoben. Das Material wird mit Hilfe eines automatisierten Lastenaufzugs und von fahrerlosen Transportfahrzeugen angeliefert.

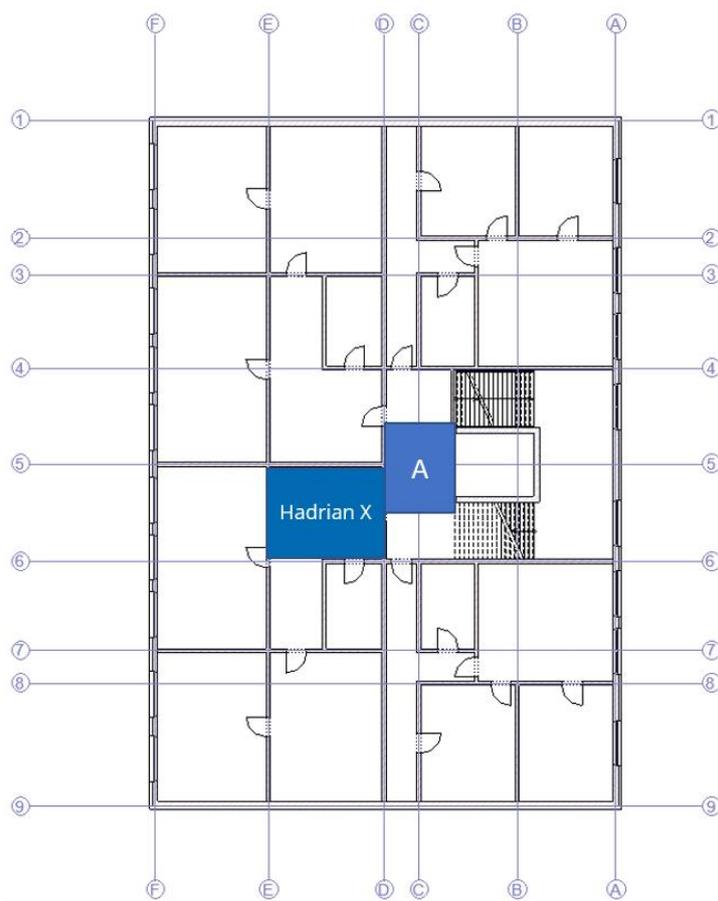


Abbildung 11 Position des Hadrian X und Austauschzone in den OG

Da die Geschosse ab dem ersten Stockwerk identisch sind, verändern sich auch die Bauprozesse und damit die Mensch-Roboter-Schnittstellen nicht.

5.1.2 Mensch-Roboter-Schnittstellen

Aus den festgelegten Einsatzgebieten ergeben sich die jeweiligen Mensch-Roboter-Schnittstellen. Für die verwendeten Roboter werden die entsprechenden Schnittstellen beschrieben. Ziel der Beschreibung der Schnittstellen ist es, eine sinnvolle Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern zu gewährleisten.

Turmdrehkran:

Da der Turmdrehkran auf Grund seiner Abmessungen beinahe jeden Ort auf der Baustelle erreichen kann, ist es wichtig, dass die Level-1-MRZ so geregelt ist, dass er die Arbeiter nicht bei ihrer Arbeit behindert oder sie gefährdet. Zu diesem Zweck wird der Turmdrehkran mit Kameras ausgestattet, die sowohl die Abmessungen und die Position der gehobenen Last als auch den Aufenthaltsbereich der Menschen im Arbeitsbereich überwachen.

Zur Umsetzung der Level-2-MRZ des Turmdrehkrans und des Lagerarbeiters wird die Material- bzw. Bauteilübergabe im Lager durch den Einsatz einer Austauschzone vereinfacht (siehe Abbildung 12).

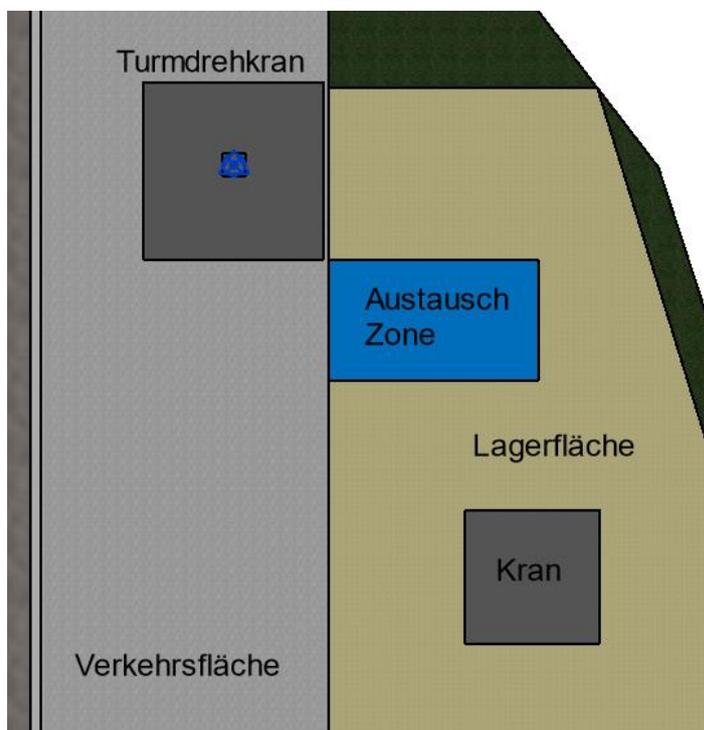


Abbildung 12 Austauschzone Lager

Bei der Austauschzone im Lager handelt es sich lediglich um eine befestigte Fläche, in der Materialien oder Bauteile für den Transport zwischengelagert werden. Ein Bestandsmonitoring findet nicht statt. Da es kein Bestandsmonitoring gibt, ist es wichtig, dass der Lagerarbeiter genau arbeitet. Der Kran selbst überprüft nicht, welches Material bzw. welche Menge er davon aus der Austauschzone abholt.

Um die Sicherheit des Lagerarbeiters zu gewährleisten, findet durch den Kran keine Materialabholung statt, wenn sich Menschen in der Austauschzone befinden. Zusätzlich gibt es akustische und optische Warnsignale, während der Kran die Austauschzone benutzt.

Damit die Level-3-MRZ zwischen Turmdrehkran und Arbeitern funktioniert, ist es wichtig, dass der Kran über Informationen zur gehobenen Last und den Aufenthaltsorten der Arbeiter besitzt. Durch den Einsatz von Kameras können die Abmessungen der gehobenen Last überprüft werden. Informationen zur Positionierung der Last ergeben sich in Form von Kugelkoordinaten aus der Position des Krans, des Auslegerwinkels, der Hakenposition und der Hubhöhe. Die Kugelkoordinaten können in kartesische Koordinaten umgerechnet werden, was Arbeitern die Eingabe von Zielorten erleichtert. Eine Ermittlung der Position der Last mit Hilfe von Kameras ist für eine Level-3-MRZ wenig geeignet, da die Kameras nur eine Positionierung in Abhängigkeit von Referenzpunkten erlauben. Werden Bauteile oder Schalelemente geliefert, muss die Positionierung jedoch auch ohne Referenzpunkte genau sein. Eine exakte Positionierung des Bauteils am Einsatzort ist durch eine Orientierung am Koordinatensystem möglich, jedoch kann die Ausrichtung durch den Kran nicht beeinflusst werden. Diese erfolgt durch die Arbeiter. Die Last wird nur bis knapp über den Zielort abgesenkt, dort von Arbeitern ausgerichtet und dann vollständig abgelassen. Das endgültige Absenken wird von den Menschen entweder mit Hilfe einer Fernbedienung oder durch Handführung des Roboters eingeleitet.

Eine Handführung wäre dabei praktisch, weil keine zusätzlichen Steuergeräte nötig wären, die die Arbeiter mit sich führen müssen. Für den Einsatz einer Handführung

des Krans ist jedoch sicherzustellen, dass durch den Kran erkannt wird, wann es ein Mensch eingreift.

Da es sich um eine Zusammenarbeit zwischen Robotern und Menschen handelt, erscheint es sinnvoll, dass die Richtlinien des VDMA zur sicheren MRZ zugrunde gelegt werden. Der Kran hält beim Bewegen der Last einen Mindestabstand von 1 m zwischen Last und Arbeitern ein. Wird dieser unterschritten, wird die Bewegung gestoppt. Wird ein Abstand von 3 m zwischen Last und Menschen unterschritten, wird die Geschwindigkeit des Krans reduziert. Eine Begrenzung der Leistung auf ein ungefährliches Maß ist bei einem Kran nicht möglich, da mit großen Lasten gearbeitet wird, jedoch reduziert die begrenzte Geschwindigkeit die auftretenden Gefahren.

Hadrian X:

Der Hadrian X kann auf Grund seines langen Auslegers jeden Punkt innerhalb eines Geschosses erreichen. Auch wenn die meiste Zeit lediglich eine Level-1-MRZ zwischen Hadrian X und den Arbeitern stattfindet, muss sichergestellt werden, dass es durch diese Zusammenarbeit zu keinen Problemen kommt. Dafür müssen Kameras auf dem Unterbau des Hadrian X angebracht werden, die die Position von Arbeitern und Ausleger überwachen. Bis auf die Handführung können alle Sicherheitsprinzipien des VDMA vom Hadrian X umgesetzt werden. Eine Handführung wäre theoretisch möglich, ist jedoch nicht gewinnbringend für die Funktionsweise des Roboters.

Das Beliefern des Hadrian X mit Material entspricht einer Level-2-MRZ. Dazu wird der Roboter mit Hilfe eines Gabelstaplers oder einer anderen Hebevorrichtung mit Ziegeln und Mörtel beladen. Zu diesem Zeitpunkt arbeitet der Roboter nicht, weshalb keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen nötig sind.

Damit der Hadrian X die Mauerwerkssteine an die richtige Position setzt, ist das Aufstellen und Versetzen eines Reflektors nötig, der als Referenzpunkt dient. Es handelt sich dabei um eine Level-3-MRZ, da gemeinsam gearbeitet wird, um eine Mauer zu bauen. Für die Dauer der Neupositionierung des Reflektors wird der

Roboter abgeschaltet. Daher sind in dieser Phase keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen nötig.

Für das gemeinsame Einbauen von Tür- und Fensterstürzen muss der Hadrian X den Arbeiter auf der Baustelle benachrichtigen, wann ein Sturz eingebaut werden soll. Diese Benachrichtigung kann in Form eines akustischen Signals erfolgen. Die Stürze werden dann vom Menschen am Ausleger des Roboters eingehängt. Der Transport der Stürze an den groben Einsatzort erfolgt automatisch. Eine genaue Ausrichtung des Bauteils erfolgt durch den Menschen. Es handelt sich um eine Level-3-MRZ. Damit diese Zusammenarbeit funktioniert, muss der Hadrian X über Informationen darüber verfügen, wann ein Sturz einzubauen ist. Diese Informationen werden aus dem erstellten 3D-Modell gewonnen. Er muss in der Lage sein, mit dem gehobenen Material einen Mindestabstand zum Menschen einzuhalten. Zur Überwachung des Sicherheitsabstandes werden Kameras eingesetzt. Da der Hadrian X, verglichen mit einem Turmdrehkran, mit geringen Gewichten arbeitet, ist eine Handführung für die exakte Positionierung der Stürze möglich.

Fahrerlose Transportfahrzeuge:

Die fahrerlosen Transportfahrzeuge können sich innerhalb des gesamten Geschosses und auf der Baustelle bewegen. Sie teilen sich bei ihren Fahrten einen gemeinsamen Arbeitsraum mit Menschen, weshalb es sich um eine Level-1-MRZ handelt. Damit diese Zusammenarbeit reibungslos abläuft, müssen die Roboter im Stande sein, Menschen zu erkennen und ihnen gegebenenfalls auszuweichen. Zu diesem Zweck werden sie mit Kameras ausgestattet, die die Bewegungen der Menschen überwachen. Anhand dieser gesammelten Daten können potenzielle Gefahren eingeschätzt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.

Die Übergabe von Material an die Bauarbeiter stellt eine Level-2-MRZ dar. Damit diese Übergabe funktioniert, muss feststehen, welcher Roboter welches Material wohin liefern soll. Die Übergabe selbst wird vereinfacht, indem Austauschzonen eingerichtet werden. Diese sind vergleichbar mit der Austauschzone im Lager. Es

werden Bereiche auf der Baustelle für den Materialaustausch freigehalten, die sich möglichst nahe am Bestimmungsort des Materials befinden. Theoretisch kann überall im Gebäude und auf der Baustelle eine Austauschzone angelegt werden. Wichtig dafür ist, dass die Position der Zone an die Steuerzentrale des Transportsystems übermittelt wird, damit die Transportvorgänge geplant werden können.

Je nach Größe der festgelegten Austauschzone kann unterschiedlich viel Material angeliefert oder abtransportiert werden. Sollen zum Beispiel die Metallstützen abtransportiert werden, die zum Betonieren der Decke angebracht wurden, wird eine kleinere Austauschzone benötigt, als wenn mehrere Paletten Mauerwerkssteine für den Hadrian X angeliefert werden.

Eine Materialbestellung, deren Lieferung von Robotern durchgeführt wird, erfolgt dabei folgendermaßen:

- Auftrag wird von Arbeiter an Lager geschickt
- Material wird von Lagerarbeiter zusammengestellt
- Auftrag wird an Roboter übermittelt
- Roboter liefern Material an Austauschzone
- Arbeiter holt Material ab

Das Material kann von den Arbeitern entweder über ein Tablet oder ein Smartphone bestellt werden. Auch der Lagerarbeiter verfügt über ein mobiles Gerät, das es ihm erlaubt, auf die Bestellungen zuzugreifen. Die mobilen Endgeräte sind über WLAN untereinander und mit der zentralen Steuereinheit verbunden.

In der Bestellung enthaltene Informationen:

- Auftraggeber
- Bezeichnung des zu liefernden Materials
- Menge
- Zeit bis Bedarf
- Austauschzone

Die Austauschzonen müssen für alle Beteiligten kenntlich gemacht werden, damit Gefahren erkannt und vermieden werden können. Je nach eingesetzten Robotern und je nach Tätigkeit unterscheiden sich dabei die möglichen Gefahren. Zu den allgemeinen Gefahren zählen:

- Quetschgefahr durch Roboter
- Quetschgefahr durch Material
- Absturzgefahr von Material

Um diese Gefahren zu vermeiden, ertönt ein akustisches Warnsignal vom Roboter, wenn dieser sich in der Austauschzone befindet. Die Austauschzonen werden durch Beschilderung kenntlich gemacht.

IronBot, TyBot und QuicaBot:

Sie alle arbeiten nur in Form einer Level-1-MRZ auf der Baustelle. Das bedeutet, dass sie alle mit Kameras ausgerüstet sein müssen, die die Abfrage der eigenen Position und die Position der Arbeitskräfte ermöglichen. So können die jeweiligen Aufgaben erfüllt werden, ohne Menschen zu behindern oder zu gefährden. Die Sicherheitsprinzipien des VDMA gelten, auch wenn eine Handführung nicht wünschenswert ist.

Allgemeines:

Da alle Schnittstellen zwischen Menschen und Robotern mit einer Positionsüberwachung der Arbeiter auf der Baustelle einhergehen, wird auch dauerhaft Bildmaterial von Arbeitern angefertigt. Auf Grund des angefertigten Bildmaterials muss sichergestellt werden, dass trotz dauerhafter Überwachung der Datenschutz gewährleistet ist. Zu diesem Zweck können Kameras, die nicht für die Positionierung des Roboters selbst genutzt werden, durch Wärmebildkameras ausgetauscht werden. Dafür müsste jedoch untersucht werden, wie sich Arbeiten, wie zum Beispiel das Schweißen, das selbst viel Wärme erzeugt, auf die Positionsabfrage mit Hilfe von Wärmebildkameras auswirken.

5.1.3 Informationsverarbeitung

Da sowohl die Roboter miteinander als auch die Menschen mit den Robotern kommunizieren müssen, ist es unabdingbar, dass eine Infrastruktur existiert, die es möglich macht, die auf der Baustelle gesammelten Informationen zu verarbeiten, auf Anweisungen von Menschen zu reagieren und die Roboter abhängig von den Anforderungen zu steuern. Je nachdem, ob diese Infrastruktur zentralisiert oder dezentralisiert werden soll, müssen Roboter mehr oder weniger Funktionen besitzen. Um die Komplexität der eingesetzten Roboter nicht unnötig zu erhöhen, werden möglichst viele Funktionen von einer zentralen Steuereinheit übernommen. Funktionen, die eine Rolle für die Sicherheit der Arbeiter auf der Baustelle spielen, werden jedoch nicht zentralisiert, um ein funktionierendes System auch bei kleineren Störungen sicherzustellen.

Alle Roboter haben die folgenden Funktionen:

- Ortung
- Wahrnehmung von Umgebungseinflüssen
- Reaktion auf Umgebungseinflüsse

Die zentrale Steuerungseinheit übernimmt:

- Koordination des Materialflusses
- Zuweisung der Transportfahrzeuge
- Pfadplanung der beweglichen Roboter

Eine komplette Zentralisierung der Informationsverarbeitung für die Steuerung und Koordination der Roboter ist theoretisch möglich, wird aber nicht als praktikabel angesehen. Im Falle einer Störung der Zentrale muss gewährleistet werden, dass die Funktionalität und die Sicherheit auf der Baustelle gegeben sind. Daher werden elementare Funktionen zum Erhalt der Produktivität und zum Schutz von Menschen dezentral in die jeweiligen Roboter integriert. Das erlaubt es den Robotern, zumindest ihre aktuelle Aufgabe zu beenden. Weitere Aufgaben können jedoch nicht an die Roboter übermittelt werden, wenn die Funktion der

Zentrale gestört ist. Soll die Komplexität der Roboter geringer gehalten werden, kann ein Aufrechterhalten der Funktionalität bei Störungen der Verbindung zur Zentrale nicht gewährleistet werden. Falls die Funktionalität der Roboter nicht aufrechterhalten werden kann, ist ein Notstopp einzuleiten, wenn die Verbindung zur Zentrale oder deren Funktion gestört ist. So kann verhindert werden, dass die Roboter unvollständige oder fehlerhafte Aufgaben ausführen. Je mehr Daten zwischen den Robotern und der Zentrale ausgetauscht werden, desto wichtiger ist es, dass die nötige IT-Infrastruktur zur Verfügung steht. Durch die vorgeschlagene Lösung ist eine permanente Kommunikation zwischen Zentrale und Roboter nicht nötig. Nachdem die Pfadplanung abgeschlossen ist, ist der Roboter in der Lage, sich selbstständig auf der Baustelle zu orientieren und seine Aufgabe auszuführen. Diese Orientierung beinhaltet auch die Rückkehr zum Lagerplatz. Das ist möglich, da die Roboter selbstständig im Stande sind, ihre Position zu bestimmen und auf Umwelteinflüsse zu reagieren.

Zur Sicherstellung der Verbindung zwischen Robotern und Zentrale wird auf der Baustelle ein WLAN-Netzwerk eingerichtet. Dazu werden WLAN-Router auf der Baustelle aufgestellt. Einer der Router wird im Zentrallager platziert und ein weiterer wird im Lastenaufzug angebracht. Dadurch kann eine einfache Stromversorgung gewährleistet werden und die Router müssen nicht für jedes Geschoss umgebaut werden.

5.1.4 Energieversorgung

Die Energieversorgung der stationären Roboter ist ohne Probleme durch einen Anschluss an das Stromnetz möglich. Für die mobilen Roboter müssen spezielle Vorkehrungen getroffen werden, um eine möglichst hohe Einsatzzeit zu garantieren. Da es sich lediglich bei den fahrerlosen Transportrobotern um mobile Roboter handelt, wird auch nur deren Energieversorgung gesondert betrachtet. Die eingesetzten Roboter für den Materialtransport sind batteriebetrieben. Da nicht bekannt ist, ob ein automatisierter Batterieaustausch möglich ist, wird auf

den Einsatz von Austauschbatterien im Baustellenszenario verzichtet. Zusätzlich müsste zuerst ein System ausgewählt werden, das einen kurzfristigen Batteriewechsel überhaupt erlaubt. Der Einsatz von Schnellladestationen wird daher bevorzugt. Diese werden im Zentrallager eingerichtet. So wird vermieden, dass zusätzliche Strecken zurückgelegt werden müssen, um zwischen Ladestation und Lager zu pendeln. Die Position der Schnellladestationen ist im Baustelleneinrichtungsplan markiert (siehe Abbildung 9). Das Laden der Roboter an den Schnellladestationen erfolgt kabellos, was den Vorgang vereinfacht und ein automatisiertes Laden begünstigt. Für das kabellose Laden können entweder Induktionsspulen eingesetzt werden, wie es bereits beim Laden von Smartphones der Fall ist, oder Metallkontakte, wie zum Beispiel beim Laden von Staubsaugerrobotern. Beide Methoden müssen für einen Einsatz auf der Baustelle auf ihre Sicherheit untersucht werden.

Beim Einsatz von Induktionsspulen werden Magnetfelder erzeugt, die sich abhängig von ihrer Stärke auf medizinische Geräte, wie zum Beispiel Herzschrittmacher, auswirken. Beim Einsatz von Metallkontakten zum Laden müssen diese stromführenden Bauteile ungeschützt sein, was eine Gefahrenquelle für die Arbeiter auf der Baustelle darstellt. Auf Grund der schwer abzuschätzenden Gefährdung durch den Einsatz von Induktionsspulen wird ein Laden über Metallkontakte für die Modellbaustelle bevorzugt. Ein Sicherheitskonzept für die Ladestationen kann nur allgemein aufgestellt werden, da detailliertere Informationen nicht vorliegen. Als generelle Regel kann jedoch festgelegt werden, dass sich Menschen nicht während des Ladevorgangs im Bereich der Schnellladestationen befinden sollen. Die Metallkontakte müssen isoliert sein, wenn sich kein Roboter in der Ladestation befindet. Für den Ladevorgang wird diese Isolierung entfernt. Dafür müssen die Roboter und die Ladestation mittels WLAN-Verbindung miteinander kommunizieren.

Der Energieverbrauch der eingesetzten Roboter müsste genauer untersucht werden, sobald deren Technologie für das Bauwesen adaptiert wurde. Die Einsatzzeiten der Transportfahrzeuge in Lagerhallen liegen zwischen 16h (SSI

Schäfer – FTS Weasel) und 8h (Savant Automation - Power Roller). Bei diesen Fahrzeugen ist jedoch die Nutzlast stark begrenzt (35kg und 770kg). Das Gewicht einer Kalksandsteinpalette beträgt jedoch 1200kg – 2200kg. Die erhöhte Leistung würde auch den Energieverbrauch steigern. Bei einem Energieverbrauch, der nicht durch die Ladezyklen im Lager gedeckt werden kann, können zusätzliche Schnellladestationen an weiteren Orten angebracht werden, an denen sich Roboter länger aufhalten. Hier ist namentlich an die Austauschzone und den Lastenaufzug zu denken, da sich die Transportfahrzeuge dort oft für kurze Zeit aufhalten. Für eine Einrichtung von weiteren Ladestationen ist die Dauer des Be- oder Entladens des transportierten Materials von großer Relevanz, da kurze Ladezeiten lediglich der Batterie schaden und die Betriebsdauer des Roboters nur wenig erhöhen. Je nach betrachtetem Vorgang unterscheiden sich die Aufenthaltszeiten stark. Wird lediglich eine Palette mit Material in der Austauschzone abgeladen, ist der Aufenthalt des Roboters nur kurz. Werden die Roboter mit Werkzeugen oder beispielsweise den Stützen beladen, die genutzt werden, um die Filigrandecken beim Betonieren zu sichern, ist die Aufenthaltszeit deutlich länger.

Die Ladestationen in den Austauschzone selbst können direkt an das Stromnetz angeschlossen werden. Alle Kabel müssen so verlegt werden, dass die Stolpergefahr für Menschen minimiert wird und mobile Roboter nicht daran hängenbleiben. Kabel, die Verkehrswege kreuzen, werden dafür in mobile Kabelkanäle aus Hartplastik verlegt, die die Kabel schützen und Unfälle vermeiden helfen. Da die Austauschzone über einen Stromanschluss verfügen, können diese auch als Verteiler für Baustrom genutzt werden, der benötigt wird, um Werkzeuge der Arbeiter zu betreiben.

5.1.5 Navigation auf der Baustelle

Um die Navigation der Roboter auf der Baustelle möglichst einfach zu gestalten, wird davon abgesehen, das Baustellenmodell bei jeder Veränderung zu aktualisieren. Stattdessen wird anhand des 3D-Modells des fertigen Gebäudes ein Graph erzeugt, auf dessen Kanten sich Roboter bewegen können. Alle vorhandenen Türen im Gebäude werden mit Knoten versehen, die es erlauben, einen Graphen zu erzeugen, der alle Räume des Gebäudes miteinander verbindet. Diese werden aufsteigend durchnummeriert, beginnend bei der Tür des Lastenaufzugs in der Mitte des Gebäudes. Zusätzlich werden noch Kreuzungspunkte eingeführt, um die Anzahl der nötigen Kanten im Graphen zu reduzieren. Die Kreuzungspunkte werden alphabetisch benannt. Ein beispielhafter Graph ist in Abbildung 13 für das erste Obergeschoss zu sehen. Anhand dieses Graphen ist es möglich, für die einzelnen Knoten jeweils den kürzesten Weg zu einem anderen Knoten zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird der Dijkstra-Algorithmus eingesetzt.

Der vorhandene Graph wird unabhängig vom Baufortschritt des Geschosses erzeugt. Dadurch wird vermieden, dass nach dem Errichten einer einzelnen Wand der komplette Graph angepasst werden muss, um die Roboter zu navigieren. Zu Beginn des Baus ergeben sich dadurch längere Wege für die Roboter, da sie Hindernisse umfahren, die nicht vorhanden sind, jedoch wird der Arbeitsaufwand für die Menschen reduziert, da kein Arbeiter benötigt wird, der sich darum kümmert, dass das Baustellenmodell regelmäßig aktualisiert wird.

Zeitgleich unterstützt das Anlegen des Graphen auch die MRZ auf der Baustelle, da durch den Graphen festgelegt wird, wo sich Roboter bewegen. So können außerhalb der durch den Graphen festgelegten Verkehrsflächen der Roboter problemlos Materialien oder Werkzeuge gelagert werden.

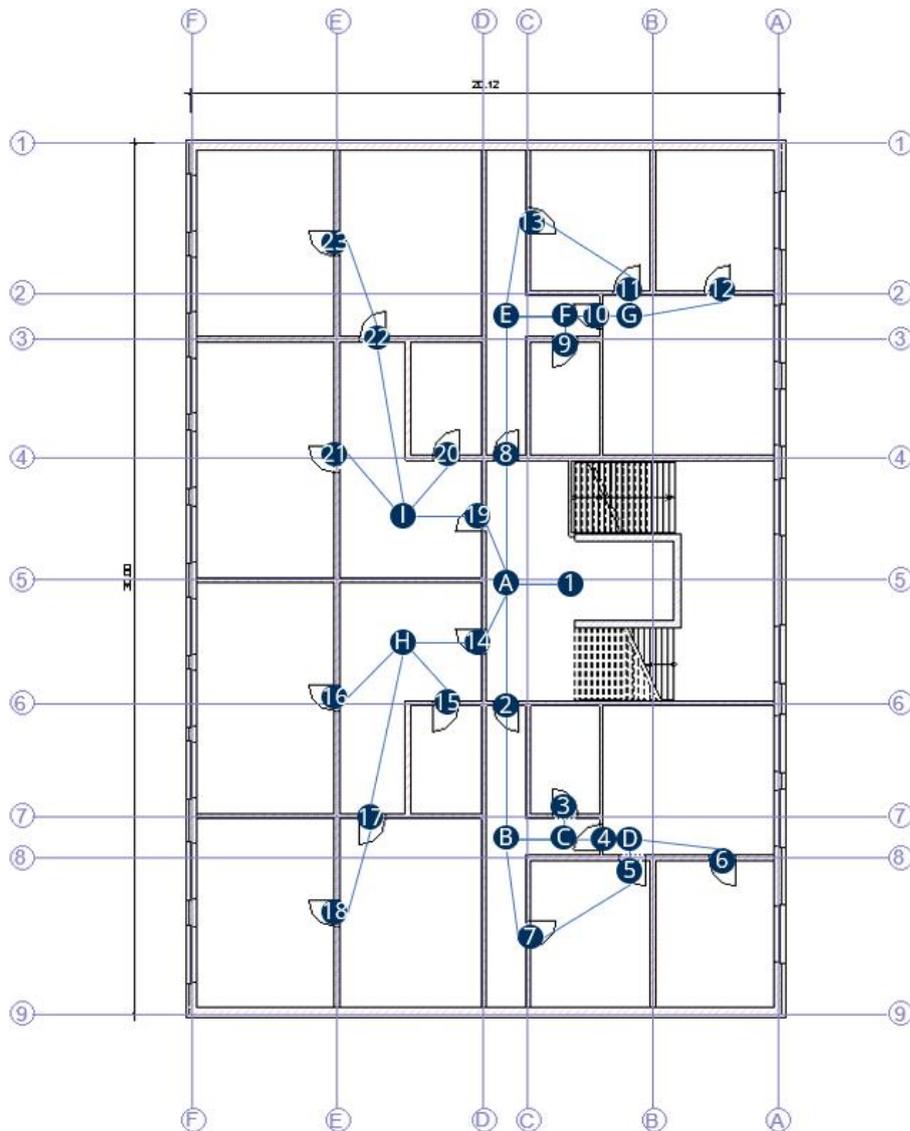


Abbildung 13 Graph 1.OG

Um die mobilen Roboter zum Lastenaufzug zu navigieren, wird ein deutlich weniger komplexer Graph erzeugt, der lediglich das Lager mit dem Aufzug verbindet. Da sich die Geschosse 1-3 vom Grundriss her nicht voneinander unterscheiden, kann der Graph für diese Geschosse beibehalten werden. Das entsprechende Geschoss, auf dem der Roboter eingesetzt wird, wird zusätzlich zu den Koordinaten des Graphs eingespeichert, so dass die Transportroboter diese Information an den automatisierten Lastenaufzug übertragen können.

Außerhalb des Gebäudes wird, wie bereits beschrieben, ein Differential-GPS eingesetzt, das es ermöglicht, die Position der Roboter auf wenige Zentimeter

genau zu bestimmen. Anhand des im 3D-Modell erzeugten Koordinatensystems kann so der Ort, zu dem die Roboter geschickt werden, genau angegeben und angesteuert werden. Der Ursprung des Koordinatensystems wird an der Position des Turmdrehkranses festgelegt.

Innerhalb des Gebäudes erfolgt die Positionsabfrage der Roboter über Radarsensoren. Mit Hilfe der Radarsensoren können die Roboter ihre Bewegungen genau nachvollziehen und so zwischen den Knoten des Graphen navigieren. Sobald Wände errichtet wurden, können diese genutzt werden, um zu bestimmen, wie sich der Roboter bewegt. Da die Radarsensoren auch bei schlechter Sicht funktionieren, ermöglichen sie theoretisch einen Robotereinsatz, ohne dass eine gesonderte Beleuchtung angebracht werden müsste.

Da die Roboter sich nur auf dem Graphen bewegen, wäre auch eine Ortung möglich, bei der lediglich die Ausrichtung im Vergleich zum magnetischen Nordpol und die Geschwindigkeit des Roboters über die Rotationen der Räder bestimmt werden. Starke Magnetfelder, die zum Beispiel durch die Schnelladestationen erzeugt werden, würden diese Form der Navigation jedoch beeinflussen. Auch durchdrehende Räder auf glatten Oberflächen würden zu einer ungenauen Ortung führen. Daher eignet sich diese Art der Ortung nicht für die Navigation auf der Baustelle.

Der Vorteil der Ortung anhand eines Graphen in Verbindung mit dem Differential-GPS und Radarsensoren ist, dass unabhängig vom Baufortschritt eine Navigation der Roboter anhand des Graphen und der Position der Roboter im lokalen Koordinatensystem möglich ist. Werden Wände, die im Plan enthalten sind, später hergestellt, weil sie keine Tragwirkung haben, wirkt sich das nicht auf die Navigation aus. Eine Änderung der Pfade wäre möglich, ist jedoch nicht nötig.

5.2 Wirtschaftliche Kenngrößen

Der Robotereinsatz im Rahmen des Beispielszenarios wirkt sich auf die Kosten und auf die Bauzeit aus. Da nur vom Hadrian X Informationen zu dessen tatsächlicher Arbeitsleistung vorliegen, wird auch nur das Erstellen des Mauerwerks betrachtet. Für die Transportaufgaben wird angenommen, dass jeder Roboter einen Menschen auf der Baustelle ersetzt. Dadurch wird zwar die Arbeitsleistung nicht erhöht, aber Lohnkosten können eingespart werden. Diese gesparten Kosten sind mit den Anschaffungs- und Betriebskosten der Roboter zu verrechnen.

Da keinerlei Informationen des Herstellers der Roboter IronBot und TyBot hinsichtlich deren Arbeitsleistung zur Verfügung stehen, kann nicht direkt bewertet werden, wie sich deren Einsatz auf die Bauzeit- und Kosten auswirkt. Jedoch entlasten beide Roboter die Arbeiter auf der Baustelle und können anders als der Hadrian X vollautomatisch eingesetzt werden. Das ermöglicht es, sie rund um die Uhr zu nutzen und die Arbeitskräfte, die durch die Roboter ersetzt werden, für andere Aufgaben freizustellen.

Es werden insgesamt 2933,54 m² tragendes Mauerwerk hergestellt. In herkömmlicher Bauweise würden auf einer Baustelle dieser Größe ca. 10 Arbeiter eingesetzt. Für das Herstellen des Mauerwerks bräuchten diese 26 Arbeitstage. Das entspricht einer Dauer von ca. einer Woche pro Vollgeschoss. Der Hadrian X benötigt bei einer täglichen Einsatzdauer von 8h lediglich 14 Arbeitstage. Das entspricht weniger als 4 Arbeitstagen pro Vollgeschoss. Während der Hadrian X Bereiche des Gebäudes mauert, kann in schon fertiggestellten Bereichen bereits weitergearbeitet werden. Im Anschluss an das Mauern müssen die Filigrandecken aufgelegt, bewehrt und verschalt werden. Da keine Arbeiter für das Mauern benötigt werden, können diese Arbeiten bereits nebenher erledigt werden.

Die Lohnkosten für das Herstellen des tragenden Mauerwerks belaufen sich auf 102.733€ Das entspricht in etwa einem Fünftel des erwarteten Anschaffungspreises des Hadrian X. Wird lediglich der bekannte Anschaffungspreis von 500.000€ der Wirtschaftlichkeitsrechnung zugrunde gelegt, erreicht der

Hadrian X bereits nach fünf Einsätzen in der Größenordnung des Beispielszenarios seinen Break-Even-Point. Auf die Gesamtkosten des Rohbaus bezogen entsprechen die entfallenden Lohnkosten einer Ersparnis von 3,3%. Durch diese Ersparnis kann entweder der Baupreis gesenkt oder die Gewinnmarge vergrößert werden.

5.3 Auswertung des Beispielszenarios

Der gemeinsame Einsatz von Robotern und Menschen im Beispielszenario hat gezeigt, dass bereits der Einsatz einzelner Roboter zu einer deutlich erhöhten Produktivität auf der Baustelle führt. Allein der Einsatz des Hadrian X hat zu einer Reduzierung der Bauzeit des Mauerwerks um fast 50% geführt. Zusätzlich konnten die Baukosten für den Rohbau um 3,3% gesenkt werden. Da zu anderen Robotern keine Leistungsdaten vorliegen, können Einsparungen, die aus dem Robotereinsatz resultieren, nicht konkret beziffert werden.

Weil die Zeit- und Kostenersparnis beim Bau davon abhängig ist, welche Arbeiten automatisiert verrichtet werden, wurde das Gebäude so geplant, dass ein Robotereinsatz für besonders zeit- und kostenintensive Arbeiten möglich war. In dem Beispielszenario zählen dazu vor allem die Mauerwerks- und Bewehrungsarbeiten. Um diese Bauprozesse zu automatisieren, wurden der Hadrian X sowie die Roboter IronBot und TyBot eingesetzt. Zusätzlich zu diesen Arbeiten wurden auch Transportaufgaben und die Qualitätskontrolle (teil-)automatisiert.

Der Einsatz des Hadrian X sowie des IronBot und TyBot erhöhte die Komplexität der Baustellenplanung nur wenig. Sie sind zwar mobil, halten sich jedoch in einem festgelegten Arbeitsbereich auf oder bewegen sich im Fall des Hadrian X während der Arbeit gar nicht. Um die MRZ zu ermöglichen, sind die Roboter mit Kameras ausgestattet, die es den Robotern erlauben, auf Menschen im Gefährdungsbereich zu reagieren oder im Falle des Hadrian X mit ihnen zusammenzuarbeiten.

Da diese Roboter Material nicht selbstständig aus dem Lager bestellen, findet keine Kommunikation zwischen Robotern und Lager statt. Die Roboter selbst verfügen über alle notwendigen Planunterlagen, um ihre Arbeit zu verrichten.

Die Energieversorgung wurde durch den Anschluss an das Stromnetz sichergestellt und alle Kabel so verlegt, dass diese keine Sicherheitsgefahr darstellen.

Die Roboter bewegen sich nicht frei auf der Baustelle, was die Navigation vereinfacht. IronBot und TyBot sind auf ein Schienensystem montiert. Der Hadrian X wird stationär eingesetzt. Besondere Methoden zur Positionsbestimmung dieser Roboter sind daher nicht nötig.

Das teilautomatisierte Transportsystem, das die FTF, den automatisierten Turmdrehkran und den Lastenaufzug einschließt, erhöhte den Planungsaufwand für die Baustelle deutlich. Um einen teilautomatisierten Materialtransport zu ermöglichen, wurde ein spezielles Lagermanagement eingeführt. Hierfür wurde ein Lagerarbeiter eingesetzt, der gelagerte Baumaterialien, -elemente und Werkzeuge für entsprechende Bestellungen vorbereitet und in dafür eingerichtete Austauschzone bringt. Die FTF und der Turmdrehkran holen die vorbereitete Lieferung aus der Austauschzone ab und befördern sie an den Bestimmungsort.

Da es sich bei den FTF um frei bewegliche Roboter handelt, die sich einen Arbeitsraum mit Menschen teilen, sind FTF mit Kameras ausgestattet, die es ermöglichen, Menschen zu erkennen und ihre Sicherheit zu gewährleisten. Der Turmdrehkran hebt teils große Lasten und positioniert diese in der Nähe von Menschen. Daher ist er mit Kameras zur Positionsbestimmung der Menschen und der gehobenen Last ausgestattet. Für den automatisierten Lastenaufzug sind keine Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, die nicht auch für einen regulären Lastenaufzug gelten.

Eine Steuerzentrale wurde im Beispielszenario eingesetzt, um die Materialbestellungen zu verwalten und entsprechende Routen für die Transportroboter zu planen. Der Turmdrehkran kann von der Steuerzentrale durch die Eingabe von Koordinaten gesteuert werden.

Die Energieversorgung der batteriebetriebenen FTF wurde durch den Einsatz von Schnellladestationen gewährleistet. Diese wurden nahe der Lagerfläche eingerichtet, so dass die Roboter möglichst lange zwischen ihren Einsätzen geladen werden können. Turmdrehkran und Lastenaufzug werden durch einen Anschluss an das Stromnetz mit Energie versorgt.

Die FTF werden durch die Steuerzentrale mit geplanten Pfaden auf der Baustelle versorgt. Zum Zweck der Pfadplanung wurden für die Baupläne des Gebäudes Graphen erstellt, die eine exakte Navigation der mobilen Roboter zum Zielort erlauben. Die Positionsbestimmung außerhalb des Gebäudes erfolgt durch den Einsatz eines Differential-GPS-Systems. In Innenräumen werden Radarsensoren genutzt, um eine exakte Positionsbestimmung zu ermöglichen. Der Turmdrehkran erhält Informationen zu Positionen in Form von kartesischen Koordinaten.

Das Beispielszenario verdeutlicht, dass ein gemeinsamer Einsatz von Robotern und Menschen auf der Baustelle möglich ist, sofern die dafür notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden.

6. Schlussbetrachtung und Ausblick

Bereits heute existieren Roboter, die besonders zeit- und kostenaufwändige Arbeiten automatisiert ausführen. Roboter wie der Hadrian X können ein Vielfaches der Leistung von Menschen erbringen. Solche Roboter existieren für einige Aufgaben, die auf der Baustelle anfallen. Die Roboter sind dennoch auf den Menschen angewiesen, denn in der Regel handelt es sich bei Robotern für die Baustelle um Single-Task-Robots. Alle Arbeiten, die vom eigentlichen Einsatzzweck des Roboters abweichen, erfordern ein Eingreifen des Menschen oder die Anschaffung zusätzlicher Roboter. Bauunternehmen, die an einem umfassenden Robotereinsatz interessiert sind, müssten also für jede Arbeit einen speziellen Roboter anschaffen oder mieten, was mit erheblichen Kosten verbunden ist.

Wie das Beispielszenario zeigt, steigt die Produktivität durch den Einsatz einzelner leistungsfähiger Roboter auf der Baustelle. So konnte der Einsatz des Hadrian X die Baukosten des Rohbaus um 3,3 % reduzieren und die Bauzeit verkürzen. Dennoch müssen für eine effiziente Mensch-Roboter-Zusammenarbeit Herausforderungen bewältigt werden, die durch den Robotereinsatz entstehen.

Um Roboter effizient einzusetzen, müssen erhöhte Planungsstandards, wie die 5D-BIM-Planung auch in der Praxis zum Einsatz kommen. Für eine detaillierte 5D-BIM-Planung muss jedoch der Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Akteuren und deren Planungssoftware optimiert werden, damit Informationsverluste vermieden werden. Durch eine verbesserte Planung ist es möglich, genauere Informationen zum Bauablauf bereits vor Baubeginn zu erhalten. Diese Informationen könnten in Zukunft genutzt werden, um den Einsatz von Robotern auf mehreren Baustellen zu planen. Die Planung muss auch genaue Informationen beinhalten, wie die Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern stattfindet und welche Vorkehrungen getroffen werden müssen, damit eine Zusammenarbeit sicher und effizient möglich ist.

Um die Sicherheit in einem MRZ-Szenario zu gewährleisten, muss getestet werden, wie die vorhandenen Bauroboter umgerüstet werden können, damit sie besser mit Menschen zusammenarbeiten. Lösungen zur Nachrüstung von Robotern für die MRZ werden bereits von mehreren Herstellern angeboten. Roboter werden dafür mit zusätzlichen haptischen Sensoren ausgestattet. Diese Sensorik erlaubt es, Berührungen zwischen Menschen und Robotern festzustellen. Wird eine Berührung erkannt, leitet die KI einen Notstopp des Roboters ein. Da im Bauwesen meist schwere Lasten gehoben werden, müssen Roboter große Kräfte aufbringen, um die Last zu bewegen. Es sollte untersucht werden, ob sich die großen Kräfte auf die Dauer zwischen der Einleitung des Notstopps und dem Stillstand des Roboters auswirken.

Das Beispielszenario verdeutlichte, dass das Automatisieren sich bei einigen Aufgaben, wie zum Beispiel dem Materialtransport, schwieriger gestaltet als bei anderen. Daher muss in realen Szenarios geprüft werden, ob sich eine Automatisierung beim aktuellen Stand der Technik lohnt. Gegen eine vollständige Automatisierung spricht der hohe Aufwand, der betrieben werden müsste, um ein Lagermanagementsystem einzuführen, das einen automatisierten Materialtransport ermöglichen würde. Zu untersuchen ist auch, ob sich eine teilautomatisierte Transportlösung, wie sie im Beispielszenario angewendet wurde, besser für Projekte eignet, bei denen die Transportfahrzeuge große Strecken zurücklegen. Besonders bei Infrastrukturprojekten wie dem Straßenbau sind die Wege zwischen Lager und Einsatzort häufig weiter als im Wohnungsbau.

Der Einsatz mobiler Roboter für den Materialtransport wirft auch die Frage auf, ob beim aktuellen Stand der Batterietechnik ein Einsatz im Bauwesen überhaupt möglich ist. Da große Lasten bewegt werden, sind die Anforderungen an Transportroboter für die Baustelle hoch. Es muss untersucht werden, wie sich die Anforderungen an die Leistung des Roboters auf deren mögliche Einsatzdauer auswirken.

In dieser Arbeit wurde der Graph, der für die Navigation der mobilen Roboter genutzt wird, händisch erzeugt. Grundlage für den Graphen war das vorhandene 3D-Modell des zu errichtenden Gebäudes. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten untersuchen, ob die im 3D-Modell enthaltenen Informationen genügen, um Graphen auch automatisiert zu erzeugen. Für die automatisierte Erzeugung des Graphen ist vor allem wichtig, wie das vorhandene 3D-Modell und der Graph entsprechend dem Baufortschritt angepasst werden können.

Neben der Bewältigung technischer Herausforderungen wird auch die Auseinandersetzung mit rechtlichen Fragen in Zukunft von großer Relevanz sein. Wenn Roboter immer verantwortungsvollere Aufgaben, wie zum Beispiel die Qualitätskontrolle, auf der Baustelle übernehmen, muss geregelt sein, in welchen Fällen der Hersteller oder der Betreiber haftbar sind.

Obwohl keine vollständige Automatisierung der Baustelle möglich war, zeigt das Beispielszenario dennoch, dass die Zusammenarbeit von Menschen und Robotern auf der Baustelle zu einer beachtlichen Senkung der Baukosten sowie der Bauzeit führt. Neben einer deutlichen Produktivitätssteigerung verspricht die Kooperation zwischen Menschen und Robotern im Bauwesen, den schon heute beklagten Fachkräftemangel zu beheben.

7. Literaturverzeichnis

3Dnatives. (2018). Yhnova als erstes 3D-gedrucktes Haus von Familie bezogen -

3Dnatives. Retrieved January 4, 2020, from

<https://www.3dnatives.com/de/yhnova-3d-gedrucktes-haus-130720181/>

Ackerman, E. (2014). Korean Shipbuilder Testing Industrial Exoskeletons for Future

Cybernetic Workforce. Retrieved September 26, 2019, from IEEE Spectrum

website: [https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-](https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/korean-shipbuilder-testing-industrial-exoskeletons-for-future-cybernetic-workforce)

[robots/korean-shipbuilder-testing-industrial-exoskeletons-for-future-](https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/korean-shipbuilder-testing-industrial-exoskeletons-for-future-cybernetic-workforce)

[cybernetic-workforce](https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/korean-shipbuilder-testing-industrial-exoskeletons-for-future-cybernetic-workforce)

ACR. (2019). Construction Robotics | ACR | Pittsburgh, United States. Retrieved

January 13, 2020, from <https://www.acrbots.com/>

Advanced Industrial Science and Technology. (2018). Development of a humanoid

robot prototype, HRP-5P, capable of heavy labor. Retrieved September 16,

2019, from

https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2018/20181116/en20181116.html

Autodesk. (2019). This Bricklaying Robot Is Changing the Future of Construction.

Retrieved September 19, 2019, from

<https://www.autodesk.com/redshift/bricklaying-robot/>

Baugewerbe-Magazin. (2018). IT am Bau: Roboter auf dem Bau – geht das? -

Baugewerbe Unternehmermagazin ONLINE. Retrieved January 6, 2020, from

<https://www.baugewerbe-magazin.de/it-am-bau/robo-ter-auf-dem-bau---geht-das-.htm>

Bauindustrie. (2019a). Anteil am Bruttoinlandsprodukt - Die Deutsche

Bauindustrie. Retrieved February 6, 2020, from

<https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/statistik-anschaulich/bedeutung-der-bauwirtschaft/anteil-am-bruttoinlandsprodukt/>

- Bauindustrie. (2019b). Löhne und Lohnzusatzkosten im Bauhauptgewerbe - Die Deutsche Bauindustrie. Retrieved February 6, 2020, from https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild/loehne-und-lohnzusatzkosten-im-bauhauptgewerbe_bwz/
- Bauletter. (2020). Sprünge nach oben bei den Auftragseingängen ... im Bauletter am 24.1.2020. Retrieved February 6, 2020, from <http://www.bauletter.de/archiv/2020/2020-01-24.php>
- Baumarkt. (n.d.). Maßtoleranzen - was ist erlaubt, was muss geduldet werden? Retrieved February 11, 2020, from <https://www.baumarkt.de/ratgeber/a/masstoleranzen-was-ist-erlaubt-was-muss-geduldet-werden/>
- BKK Dachverband. (2019). BKK Dachverband – Interessenverband der Betriebskrankenkassen - Monatlicher Krankenstand. Retrieved January 7, 2020, from <https://www.bkk-dachverband.de/gesundheit/statistiken/monatlicher-krankenstand/>
- Blanco, J. L., Fuchs, S., Parsons, M., & Ribeirinho, M. J. (2018). • Capital Projects & Infrastructure. *McKinsey & Company*, (April), 1–8
- BMWi. (2019). BMWi - Strategie gegen Fachkräftemangel in der Bauwirtschaft. Retrieved February 6, 2020, from <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2019/20190313-strategie-gegen-fachkraeftemangel-in-der-bauwirtschaft.html>
- Bock, T.-A. (1988). Robot-Oriented Design. *Proceedings of the 5th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 135–144. <https://doi.org/10.22260/isarc1988/0019>
- Bock, T. (2016). Construction robotics. *Journal of Robotics and Mechatronics*. <https://doi.org/10.20965/jrm.2016.p0116>
- Boston Dynamics. (2019). Atlas The World's Most Dynamic Humanoid.
- Chu, B., Jung, K., Lim, M. T., & Hong, D. (2013). Robot-based construction

- automation: An application to steel beam assembly (Part I). *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.016>
- Construction Robotics. (2019). Home - center construction robotics. Retrieved January 5, 2020, from <https://construction-robotics.de/>
- DFAB. (n.d.). IN SITU FABRICATOR – DFAB HOUSE. Retrieved January 4, 2020, from https://dfabhouse.ch/de/in_situ_fabricator/
- DGUV. (2015). *DGUV Information 209-074*. Retrieved from <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/209-074.pdf>
- DLR. (2019). DLR - Institut für Robotik und Mechatronik - LBR III. Retrieved February 9, 2020, from <https://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-12464/#gallery/29165>
- Ehrler, W., & Huth, M. (2000). Körperliche Leistungsfähigkeit 43- bis 45-Jähriger und 62- bis 64-Jähriger im Vergleich. In P. Martin, K. U. Ettrich, U. Lehr, D. Roether, M. Martin, & A. Fischer-Cyrulies (Eds.), *Aspekte der Entwicklung im mittleren und höheren Lebensalter: Ergebnisse der Interdisziplinären Längsschnittstudie des Erwachsenenalters (ILSE)* (pp. 220–234). https://doi.org/10.1007/978-3-642-51100-4_15
- Faber, M., Bützler, J., & Schlick, C. M. (2015). Human-robot Cooperation in Future Production Systems: Analysis of Requirements for Designing an Ergonomic Work System. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.215>
- FBR. (2018). Hadrian X | Outdoor Construction & Bricklaying Robot from FBR. Retrieved September 19, 2019, from <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x>
- FBR. (2019). End of Year Update. Retrieved December 28, 2019, from <https://www.fbr.com.au/view/blog-articles/end-of-year-update-20191219043232>
- Foitzik, B. (2018). Im Überblick: Sicherheitskonzepte für kollaborative Roboter
Sichere Kollaboration: Vom Sensor bis zur Schutzhaut - Automationspraxis.

- Retrieved November 26, 2019, from
<https://automationspraxis.industrie.de/cobot/sichere-kollaboration-vom-sensor-bis-zur-schutzhaut/>
- Frantzen, C., & Brücken, W. (n.d.). *Baustellenautomatisierung im Straßenbau Die digitale Baustelle -multidimensional -modellbasiert*. Retrieved from
https://www.buildingsmart.de/kos/WNetz?art=File.download&id=3978&name=1B-1_Frantzen%28Topcon%29_Straßenbau_bS-Anwendertag-14.pdf
- GCR. (2015). SAM the bricklaying robot could be yours for \$500,000 - News - GCR. Retrieved January 16, 2020, from
<http://www.globalconstructionreview.com/news/sam-bricklaying-r7o7b7ot-could-be-yours-500000/>
- Handwerk Digital. (2019). Robonet 4.0 | Handwerk-Digital. Retrieved January 6, 2020, from <https://www.handwerk-digital.org/index.php/robotik-im-handwerk>
- Holzinger, K., Mak, K., Kieseberg, P., & Holzinger, A. (2018). Can we trust Machine Learning Results? Artificial Intelligence in Safety-Critical decision Support. *ERCIM NEWS*, (112), 42–43. Retrieved from <https://ercim-news.ercim.eu/en112/r-i/can-we-trust-machine-learning-results-artificial-intelligence-in-safety-critical-decision-support>
- Hyperion Robotics. (2019). Hyperion Robotics. Retrieved January 4, 2020, from <https://hyperionrobotics.com/>
- Inc. (n.d.). Robotics - Encyclopedia - Business Terms | Inc.com. Retrieved February 8, 2020, from <https://www.inc.com/encyclopedia/robotics.html>
- Institut für Modernes Japan. (2015). *Familienpolitik in Japan und Deutschland zwischen Womenomics und Doing Family*.
- IWD. (2019). *Krankenstand in Deutschland stabil - iwd*. Retrieved from <https://www.iwd.de/artikel/krankenstand-in-deutschland-stabil-426328/>
- Jia, Y., Zhang, B., Li, M., King, B., Meghdari, A., & Corporate, A. B. B. U. S. (2018). *Human-Robot Interaction. 2018*.

- Kazemian, A., Yuan, X., Davtalab, O., & Khoshnevis, B. (2019). Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction. *Automation in Construction*, 101(January), 92–98.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.022>
- Li, L., Xie, L., Li, W., Liu, Z., & Wang, Z. (2018). Improved deep belief networks (IDBN) dynamic model-based detection and mitigation for targeted attacks on heavy-duty robots. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(5).
<https://doi.org/10.3390/app8050676>
- Li, R. Y. M. (2018). Robots for the Construction Industry. In *An Economic Analysis on Automated Construction Safety* (pp. 23–46). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5771-7_2
- Li, R. Y. M., & Ng, D. P. L. (2018). Wearable robotics, industrial robots and construction worker's safety and health. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60384-1_4
- Linner, T. (2013). *Automated and Robotic Construction: Integrated Automated Construction Sites*. 229.
- Lockheed Martin. (2018). Fortis Exoskeleton.
- Maeda, J. (1994). Development and Application of the SMART System. *Automation and Robotics in Construction Xi*, 457–464. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-82044-0.50064-3>
- McKinsey. (2017). McKinsey-Studie: Produktivität der Baubranche in Deutschland stagniert | McKinsey & Company. Retrieved February 6, 2020, from <https://www.mckinsey.com/de/news/presse/mckinsey-studie-produktivitat-der-baubranche-in-deutschland-stagniert>
- McKinsey Global Institute. (2018). How will automation affect jobs, skills, and wages? *McKinsey & Company*, (March). Retrieved from <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/how-will-automation-affect-jobs-skills-and-wages>

- Meyer, C. (2016). Kollaborierende Robotersysteme. *Technische Sicherheit*, 6(11–12), 40–43.
- Mitka, E., Gasteratos, A., Kyriakoulis, N., & Mouroutsos, S. G. (2012). Safety certification requirements for domestic robots. *Safety Science*.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.009>
- Mitsch, N. (2018). *Technologiebetrachtungen zur Prozessoptimierung der Lieferkette vorgefertigter Bauelemente*.
- Mitsch, N. (2019). *Sicherheits- und Gesundheitsschutz gemäß geltender Arbeitsschutzbestimmungen einer Fertigungsstrecke für großformatige Hohlblocksteine*.
- Odico. (2019). 03 Technologies - Odico. Retrieved January 4, 2020, from <https://www.odico.dk/en/technologies#factory-on-the-fly>
- Pan, M., Linner, T., Pan, W., & Bock, T. (2018). Proceedings of the 21st International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate. *Proceedings of the 21st International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, (January).
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-6190-5>
- PWC. (2018). *Will robots really steal our jobs? An international analysis of the potential long term impact of automation Key findings : impact of automation*.
- Rao, A., Likens, S., Baccala, M., & Shehab, M. (2019). 2019 AI Predictions: Six AI priorities you can't afford to ignore. *Pwc*. Retrieved from https://www.pwc.com/us/en/services/consulting/library/artificial-intelligence-predictions-2019?WT.mc_id=CT13-PL1300-DM2-TR1-LS4-ND30-TTA5-CN_ai2019-ai19-digpul-1&eq=CT13-PL1300-DM2-CN_ai2019-ai19-digpul-1
- Robotik-Produktion. (2017). Roboterpositionierung - ROBOTIK UND PRODUKTION. Retrieved January 27, 2020, from <https://www.robotik-produktion.de/allgemein/praezise-durch-radar/>
- Şahhanoglu, A.-M. V., Călbureanu, M. X., & Smid, S. (2016). Automated and Robotic

- Construction – a Solution for the Social Challenges of the Construction Sector. *Revista de Stiinte Politice*, (50), 211–220. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/1807533609?pq-origsite=gscholar>
- Spektrum. (n.d.). Differential-GPS - Lexikon der Geowissenschaften. Retrieved January 27, 2020, from <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/differential-gps/3238>
- Statistisches Bundesamt. (2018). Stadtbevölkerung steigt bis 2030 weltweit um eine Milliarde - Statistisches Bundesamt. Retrieved October 4, 2019, from https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/07/PD18_253_91.html
- Statistisches Bundesamt. (2019a). Demografischer Wandel - Statistisches Bundesamt. Retrieved October 4, 2019, from https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/_inhalt.html
- Statistisches Bundesamt. (2019b). Krankenstand - Statistisches Bundesamt. Retrieved January 7, 2020, from <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Qualitaet-Arbeit/Dimension-2/krankenstand.html>
- Stäubli. (2019). TX2-60 industrieller Roboterarm | Stäubli. Retrieved November 26, 2019, from <https://www.staubli.com/de-de/robotics/produktprogramm/roboterarme/6-achs-roboter/tx2-60/>
- Sünderhauf, N., Brock, O., Scheirer, W., Hadsell, R., Fox, D., Leitner, J., ... Corke, P. (2018). The limits and potentials of deep learning for robotics. *International Journal of Robotics Research*, 37(4–5), 405–420. <https://doi.org/10.1177/0278364918770733>
- VDMA. (2016). *VDMA-Positionspapier "Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Kollaboration."* Retrieved from http://robotik.vdma.org/documents/105999/4217702/VDMA_Positionspapier_

MRK-Sicherheit_DE.pdf/ac66460e-4661-4675-885e-f8069d0f7abb

- Weber, M.-A. (2017). *Mensch-Roboter-Kollaborationen (MRK)*. Retrieved from https://www.arbeitswissenschaft.net/fileadmin/Downloads/Angebote_und_Prprodukte/Publikationen/ifaa_BA_230_Mensch-Roboter-Kollaboration.pdf
- Weitz, H. (2019). Fachkräftemangel - Die Deutsche Bauindustrie. Retrieved October 4, 2019, from https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild/fachkraeftemangel_bwz/
- Weller, R. (n.d.). Industrieroboter - Definition nach VDI 2860. Retrieved February 8, 2020, from <http://www.forum-sondermaschinenbau.de/seiten/Industrieroboter.htm>
- Yan, R. J., Kayacan, E., Chen, I. M., Tiong, L. K., & Wu, J. (2019). QuicaBot: Quality Inspection and Assessment Robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *16*(2), 506–517. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2829927>

8. Anhang

Thesen:

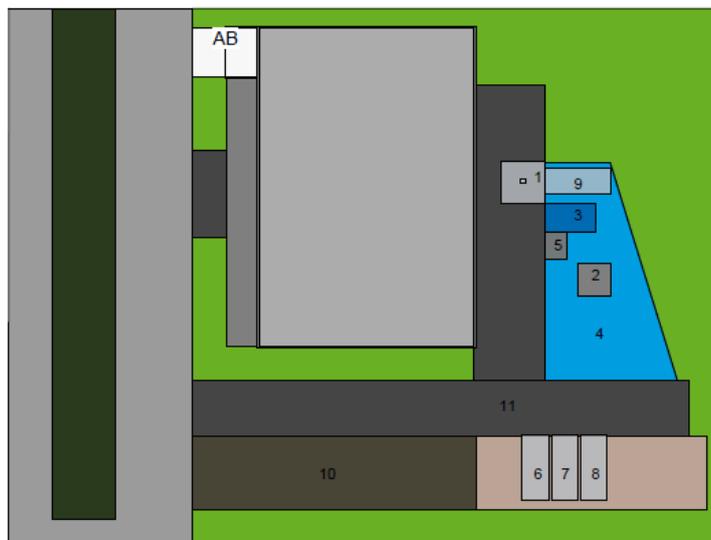
1. Ein gemeinsamer Einsatz von Robotern und Menschen kann dem Fachkräftemangel im Bauwesen entgegenwirken.
2. Roboter, die einzelne Bauarbeiten automatisiert verrichten, erzielen bereits heute hohe Arbeitsleistungen.
3. Roboter sind beim aktuellen Stand der Technik auf Menschen angewiesen, die schlecht standardisierbare Arbeiten verrichten.
4. Durch die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit entstehen Herausforderungen, die einen gemeinsamen Einsatz von Robotern und Menschen auf Baustellen erschweren.
5. Der Einsatz von Robotern für verantwortungsvolle Aufgaben wirft rechtliche Fragen auf.
6. Um die Sicherheit der Menschen bei einer Mensch-Roboter-Zusammenarbeit zu gewährleisten, müssen Vorkehrungen getroffen werden.
7. Sicherheitsvorkehrungen für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit erhöhen die Komplexität der Baustellenplanung.
8. Die Anforderungen an die Bauplanung werden durch die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit auf der Baustelle erhöht.
9. Die Navigation von mobilen Robotern auf der Baustelle wird erschwert, da sich die befahrbaren Wege abhängig vom Baufortschritt verändern.

Berechnung der maximalen Roboterkosten

Tätigkeit	Kennwerte - Plümecke	Angepasste Kennwerte heute
Mauern	29,89	35,0208989
Außenputz	28,56	33,46259192
Innenputz	13,86	16,23919902
Schalungsarbeit	16,38	19,19178066
Bewehren (Stabstahl)	1932	2263,645924
Bewehren (Mattenstahl)	672	787,355104
Betonieren	46,2	54,1306634
Allgemeine Lohnkosten	42	49,209694

Tätigkeit	Arbeitsleistung / h	Maximale Leistung / Jahr
Mauern	1,43	2944,4
Außenputz	1,47	3027,6
Innenputz	3,03	6272,4
Schalungsarbeit	2,56	5294,8
Bewehren (Stabstahl)	0,022	15,76
Bewehren (Mattenstahl)	0,062	98,96
Betonieren	0,909	1860,72

Roboter für Tätigkeit	Arbeitsleistung	Maximale Kosten / 8 Jahre
Mauern (Allgemein)	1,43	2499987,88
Mauern (Hadrian X)	26	45454325,1
Außenputz	1,47	2455565,305
Innenputz	3,03	2456302,27
Schalungsarbeit	2,56	2452617,448
Bewehren (Stabstahl)	0,022	2486026,5
Bewehren (Mattenstahl)	0,062	2436895,541
Betonieren	0,909	2456302,27



1. Turmdrehkran
2. Lagerkran
3. Zentrallager
4. Austauschzone
5. Schnellladestation
6. Aufenthaltscontainer
7. Bauleitercontainer
8. Sanitärcontainer
9. Werkzeugcontainer
10. Abstellplatz für Roboter u. Baumaschinen
11. Verkehrsfläche

Projekt Modellbaustelle	
Bauherr Nicolas Mitsch	
Plan Lageplan	
1 : 500	Projektname Diplomarbeit Plannummer A108

14.02.2020 00:50:23

