

Ondrej Kyjanek, Oliver David Krieg
Tobias Schwinn, Achim Menges

Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau: Potentiale für die Vorfertigung

F 3180

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0461-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Universität Stuttgart



Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung

Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau: Potentiale für die Vorfertigung

ONDREJ KYJANEK, OLIVER DAVID KRIEG, TOBIAS SCHWINN, ACHIM MENGES

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.56)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU



Universität Stuttgart



Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung

Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau: Potentiale für die Vorfertigung

WISSENSCHAFTLICHER ABSCHLUSSBERICHT

Projektteam:

Universität Stuttgart

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) -

Keplerstraße 11, D-70174 Stuttgart

Ondrej Kyjanek

Oliver David Krieg

Tobias Schwinn

Prof. Achim Menges

In Kooperation mit

Müllerblau Stein Holzbau GmbH

Pappelauer Straße 51, 89134 Blaustein

Reinhold Müller, Geschäftsführer

KUKA Roboter GmbH

Zugspitzstraße 140, 86165 Augsburg

Frank Zimmermann, Market Segment Manager Education

Eckdaten

Gesamtkosten:	264.331,11 €
Anteil Bundeszuschuss:	142.200,16 €
Projektlaufzeit:	24 Monate



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU



Universität Stuttgart



Institut für Computerbasiertes
Entwerfen und Baufertigung

Kontakt:

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
70174 Stuttgart

+49 (0)711 685 81924
mail@uni-stuttgart.de
<https://icd.uni-stuttgart.de>

Kurzzusammenfassung

Das Forschungsprojekt untersucht neuartige Ansätze der Mensch-Robot Kooperation (MRK) im Montageprozess der Holzbau-Vorfertigung. Holzbau ist in der Regel Auftragsproduktion, d.h. er zeichnet sich durch stark variierende Bauteile oder ein geringes Volumen an Bauteilen (Losgröße 1) aus. Menschliches Know-How und Erfahrung sind deshalb essentiell. Im Gegensatz zur Vollautomatisierung, die im Holzbau aufgrund der Projektspezifität und KMU-Strukturen wenig Sinn macht, steht hier die mögliche Synergie von Robotik und Handwerk im Vordergrund. Die Mensch-Roboter-Kollaboration ist eine Kombination aus robotischer Präzision und Fertigungsgeschwindigkeit mit menschlicher Logik und Geschicklichkeit. Das Ziel ist folglich die Evaluierung der Potenziale von MRK in der Holzbauindustrie. Zunächst wurden deshalb bestehende Prozesse in der Holzproduktion und bestehende Ansätze der MRK analysiert und systematisiert. Darauf aufbauend wurden dann drei übergeordnete Mensch-Roboter-Kollaborationstrategien für die Holzbauindustrie vorgeschlagen und deren Umsetzungspotential evaluiert. In zwei Fallstudien wurden schließlich die beiden Strategien "Direkte Mensch-Roboter-Kooperation" und "Gelegentliche Koordination" und deren entsprechende technologische Ansätze in Zusammenarbeit mit Industriepartnern prototypisch umgesetzt und evaluiert. Das Forschungsprojekt zeigt auf wie neuartige Ansätze der Mensch-Roboter Kooperation auch für die Montage in der Holzbau-Vorfertigung ein höheres Maß an Automatisierung, Qualität und Wirtschaftlichkeit ermöglichen. Eine übergeordnete Erkenntnis des Forschungsprojekts ist, dass die Anwendung von Mensch-Robot Kooperation sowohl in einer höheren Produktivität bei gleichzeitig hohem Maß an Individualisierung resultieren kann, als auch in grundlegend neuen Anwendungsbereichen und Bausystemen im Holzbau.

Abstract

The research project investigates novel approaches of human-robot cooperation (HRC) in the assembly process of timber prefabrication. Timber construction is usually contract-based production, i.e. it is characterized by strongly varying components and/or a small volume of components (lot size 1). Human know-how and experience are therefore essential. In contrast to full automation, which makes little sense in timber construction due to project specificity and SME structures, the focus here is on the possible synergy of robotics and craftsmanship. Human-robot collaboration is a combination of robotic precision and production speed with human logic and skill. The aim consequently was to evaluate the potential of HRC in the context of the timber construction industry. Therefore, existing processes in wood production and existing HRC approaches were first analyzed and systematized. Based on the systematisation, three high-level human-robot collaboration strategies for the timber construction industry were proposed and their implementation potential evaluated. In two case studies, the two strategies "Direct human-robot cooperation" and "Occasional coordination" and their corresponding technological approaches were implemented and evaluated in cooperation with industrial partners. The research project shows how new approaches in human-robot cooperation also enable a higher degree of automation, quality and cost-effectiveness for assembly in prefabrication of timber construction. An overarching finding of the research project is that the application of human-robot cooperation can result both in higher productivity with a high degree of individualization, as well as in fundamentally new areas of application and building systems in timber construction.

Inhalt:

Einleitung	1
Ausgangslage	1
Projektaufbau	2
Arbeitsplan.....	2
Projektdurchführung	5
AP 1: Prozessanalyse	5
AP 1.1: Prozessanalyse: Vorfertigung im Holzbau	5
AP 1.2: Prozessanalyse: Modelle Mensch-Roboter-Kooperation.....	7
AP 2: Identifikation der Potentiale	11
AP 2.1: Identifizierung der Potenziale von MRK im Holzbau	11
Automatisierung von Fertigungsprozessen	11
Merkmale und Trends im Holzbau.....	11
Potenziale identifizieren.....	12
AP 2.2: Identifizierung verwandter robotergestützter technologischer Lösungen	15
Zur Kollaboration zwischen Mensch und Roboter.....	15
Klassifizierung der Kollaboration.....	16
Voraussetzungen für die Umsetzung der Mensch-Roboter-Kollaboration.....	17
Mensch-Roboter-Kommunikation	18
Strategien zur Umsetzung von MRK im Holzbau	20
AP 3: Systematisierung Anwendungsfelder und Auswertung	23
AP 3.1: Systematisierung der möglichen Vorfertigungsprozesse / Technologiekombinationen	23
AP 3.2: Aufarbeitung und Evaluierung	25
Level of Automation (LoA) und Flexibilität.....	25
Innovationspotenzial	28
AP 3.3: Kurz-, mittel- und langfristige Implementierungsstrategien.....	30
AP 4: Beispielhaftes Prototyping, Testung und Evaluierung.....	33
EXPERIMENT 1 - Collaborative Robotic Workbench	33
Kontext	34
Methoden.....	35
Implementierung.....	39
Demonstrator	43
Diskussion	44
Danksagung	45
EXPERIMENT 2 - Robotische Vorfertigung einer leichten Holzschale	46

Kontext	46
Methoden	48
Implementierung	51
Ergebnisse	54
Diskussion	56
Danksagung	56
Publikationsliste	57
Veranstaltungsliste	57
Abbildungsverzeichnis	57
Tabellenverzeichnis	59
Literaturverzeichnis	59

Einleitung

Ausgangslage

Der Holzbau gewinnt im Bauwesen stetig an Bedeutung. Holzbauweisen sind besonders gut geeignet, die Ziele der Ressourceneffizienz und Energieeinsparung wirtschaftlich zu erreichen. Zudem zeichnet sich der Holzbau durch ein hohes Maß an Vorfertigung aus. Dies ermöglicht Präzision, schnelle Bauzeiten und geringe Baulärmemissionen. Vorfertigung im Werk wird häufig mit Automation der Fertigung assoziiert. Im Holzbau ist dies jedoch bisher nicht der Fall. Zwar weist der Holzbau einen im Bauwesen vergleichsweise hohen Anteil an Vorfertigung auf, allerdings ist dabei lediglich die subtraktive Fertigung der Einzelteile durch CNC-Abbund, Plattenschneiden und Fräsen computergesteuert. Die Fügung der Einzelteile zu Baugruppen erfolgt weitestgehend durch händische Arbeit. Das Projekt verfolgt daher den Ansatz, auch die additive Fügung der Bauteile in vorgefertigte Baugruppen digital zu unterstützen.

Neuste Entwicklungen in der Robotik erlauben erstmals die direkte Kooperation von Mensch und Industrieroboter, die zuvor aus Sicherheitsgründen unmöglich war. Die Potentiale dieser Technologien und Methoden für ihre Anwendung im Holzbau sind jedoch weitestgehend unbekannt. Es bestehen verschiedene Soft- und Hardwareansätze, die die abwechselnde, gleichzeitige oder interaktive Nutzung des gleichen Arbeitsraums von Mensch und Maschine erlauben. Dies ermöglicht einen „gleitenden Automatisierungsgrad“, der eine Mischung zwischen rein manueller und vollautomatisierter Produktion durch die MRK ermöglicht und so die Kombination der Stärken von Mensch (Sensorik) und Roboter (Präzision, Arbeitsleistung) zusammenführen kann. Diese für andere Industriezweige entwickelten Technologien der Mensch-Roboter-Kollaboration werden auch für die Holzbauvorfertigung als besonders vielversprechend angesehen.

Die gegenseitige Unterstützung von Handwerker und Roboter beim Identifizieren, Handhaben, Platzieren und Fügen von Bauteilen, sowie deren Qualitätssicherung kann bestehende Prozesse optimieren und neuartige Fertigungsprozesse zulassen. Diese Potentiale sollen daher mit Industriepartnern aus Holzbau und Robotik untersucht, systematisiert, evaluiert und prototypisch getestet werden. Im Gegensatz zur Vollautomatisierung, die im Holzbau aufgrund der Projektspezifität und KMU-Strukturen wenig Sinn macht, steht hier die mögliche Synergie von Robotik und Handwerk im Vordergrund.

Zusammenfassung der Herausforderungen, Ziele und Potentiale:

- Holzbau ist in der Regel Auftragsproduktion. Er zeichnet sich durch stark variierende Bauteile oder ein geringes Volumen an Bauteilen aus. Menschliches Know-How und Erfahrung ist deshalb essentiell.
- Prozesse in der Holzproduktion sollen analysiert und systematisiert werden, um daraus Mensch-Roboter-Kollaborationstrategien für die Holzbauindustrie zu entwickeln und deren Potentiale abzuschätzen.
- Entwickelte MRK-Strategien sollen in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern in der Produktion getestet und evaluiert werden.
- Mensch-Roboter-Kollaboration ist eine Kombination aus robotischer Präzision und Fertigungsgeschwindigkeit mit menschlicher Logik und Geschicklichkeit. Dies kann in einer höheren Produktivität bei einem hohen Maß an Individualisierung resultieren.
- Ziel ist die Evaluierung dieser Potenziale von MRK in der Holzbauindustrie.

Projektaufbau

Das Projekt gliedert sich in vier Arbeitspakete, die jeweils Forschungsanteile im Holzbau und der Robotik aufweisen. Hierfür werden zwei wissenschaftliche Mitarbeiter eingesetzt, die Experten auf dem jeweiligen Gebiet sind. Ebenso gibt es je einen Industriepartner aus dem Holzbau und der Robotik.

Eine umfangreiche Prozessanalyse dient zunächst der Datenaufnahme im Austausch mit den Industriepartnern und weiteren führenden Holzbaubetrieben. Darauf aufbauend werden die Potentiale der MRK nach Vorfertigungsarbeitschritten gegliedert und mögliche Technologieansätze identifiziert, sowie ausgewertet und zur Synthese gebracht. Daraus ergeben sich Systematisierungen, Auswertungen und konkrete Implementierungsstrategien für die verbesserte Vorfertigung bestehender Bausysteme sowie für die Entwicklung neuer Holzkonstruktionen, die die Vorteile der MRK maximal nutzen. Abschließend werden beispielhafte Vorfertigungsprozesse entwickelt, getestet und evaluiert. Dieser Ansatz spiegelt sich entsprechend im Arbeitsplan wieder.

Arbeitsplan

AP 1 Prozessanalyse

AP 1.1 Prozessanalyse: Vorfertigung im Holzbau

- Fertigung Bauelemente/Bauteile (DIN 8580 Trennen) – Sägen, Fräsen, Abbund
- Fügung zu Baugruppen (DIN 8550 Fügen) – Positionieren, Einmessen, Montage
- Logistik Bauelemente, Bauteile, Baugruppen – Ablage, Erkennung, Handling
- Qualitätssicherung – Vermessen, Scannen, Dokumentation

AP 1.2 Prozessanalyse: Modelle Mensch-Roboter-Kooperation

- Zwei Kategorien der Kooperation:
Industrieroboter: Abwechselnde Nutzung des Arbeitsraumes (Safe Robotics Technology)
Leichtbauroboter: Gleichzeitige Nutzung des Arbeitsraumes (LWR)
- Automationsgrad, Sicherheitsanforderungen, Berufsgenossenschaftliche Anforderungen,
Investitionsbedarf, etc.

AP 2 Identifikation der Potentiale

AP 2.1 Identifikation der Potentiale für Roboter-Mensch-Kooperation im Holzbau

- Roboter-Mensch-Kooperation für präzises Platzieren / Fügen
Reduktion des Messaufwands, Erhöhung der Präzision, gleichbleibende Qualität
- Roboter-Mensch-Kooperation für Qualitätssicherung
Kontinuierliche Qualitätssicherung und Dokumentation
- Roboter-Mensch-Kooperation für sich wiederholende Tätigkeiten und Logistik
Erhöhung des Automationsgrads und der Flexibilität
- Roboter-Mensch-Kooperation für schwere und unangenehme Tätigkeiten
Erhöhung des Arbeitskomforts, Reduktion der Ermüdung und des Arbeitsrisikos

AP 2.2 Identifikation der dazugehörigen Roboter-Technologieansätze

- Potentielle Anwendungsfelder Robot Safe Technology
Industrieroboter-Mensch-Kooperation: Fügen, Qualitätssicherung, Automation, schwere Tätigkeiten

- Potentielle Anwendungsfelder LWR
LWR-Mensch-Kooperation: Fügen, Qualitätssicherung
- Best Practice Analyse von Beispielen aus anderen Industriezweigen

AP 3 Systematisierung Anwendungsfelder und Auswertung

AP 3.1 Systematisierung der möglichen Vorfertigungsprozesse / Technologiekombinationen

- Mit Hilfe der Kooperationspartner und erster praxisnaher Versuchsreihen

AP 3.2 Aufarbeitung und Evaluierung

- Evaluierung von Automationsgrad, Flexibilität und Innovationspotential

AP 3.3: Kurz-, mittel, und langfristige Implementierungsstrategien

- Integration des Technologiestandards unter Berücksichtigung zukünftigem Innovationspotential und Investitionsaufwand

AP 4 Beispielhaftes Prototyping, Testung und Evaluierung

AP 4.1 Integration von Entwurfs- und Fertigungsprozessen

- Entwicklung einer digitalen Schleife für eine vollständig automatisierte Fertigung

AP 4.2 Untersuchung der Praxisnähe durch Prototyping

- Evaluation ausgewählter Fertigungsprozesse in der Versuchshalle

AP 4.3: Bau von Demonstratoren für die Evaluation

- Testung kompletter Produktionsprozesse und Bau von Demonstratoren für die Evaluation und Demonstration des Innovationsgehalts

Projektdurchführung

AP 1: Prozessanalyse

AP 1.1: Prozessanalyse: Vorfertigung im Holzbau

Es gibt mehrere Möglichkeiten, einen Vorfertigungsprozess in der Holzbaubranche zu analysieren. Daher wurde ein System entwickelt, das die Vorfertigungsprozesse nach der Art des Prozesses und der Position innerhalb der Produktionskette analysiert.

Die Klassifizierung nach Typ wurde maßgeblich von zwei DIN-Normen geprägt: 1) DIN 8580, die die Hauptkategorien von Herstellungsprozessen beschreibt, und 2) VDI 2860, eine heute schon veraltete DIN-Norm, welche Prozesse der Handhabung und Montage beschreibt.

Die Prozesse wurden in drei allgemeine Kategorien eingeteilt: 1) Handhabung, 2) Bearbeitung und 3) Inspektion. Sie wurden später in spezifischere grundlegende Prozessschritte unterteilt, die zu größeren Produktionsabläufen zusammengefasst werden können (Abb. 1 und 2)

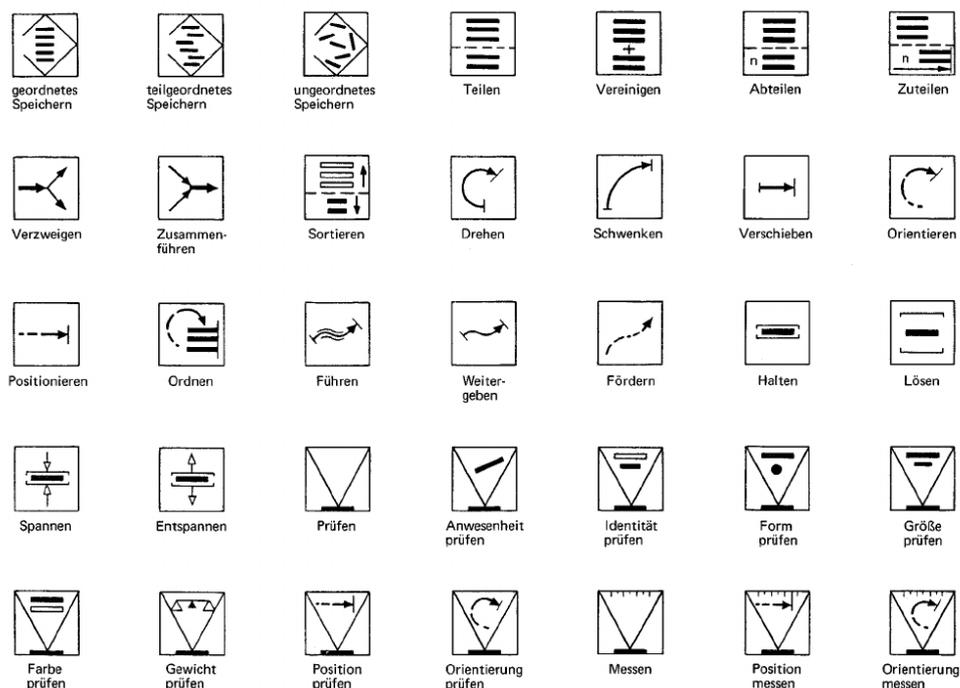


Abb. 1: Prozessstypen nach VDI 2860

Unter Berücksichtigung des Produktionsablaufs werden drei Hauptfertigungsschritte der Vorfertigung in der modernen Holzindustrie identifiziert. Zuerst wird das Rohmaterial, das direkt aus einem Sägewerk entnommen wird, und aus Brettern und Balken besteht, in der Vorbereitungsphase geschnitten und für die weiterführenden Produktionsschritte geformt. Diese Prozesse sind hauptsächlich subtraktiv und stark automatisiert. Anschließend folgt der Montageablauf, bei dem die geformten Teile zusammengefügt werden, um zweidimensionale, tragende Strukturen aus Wänden und Böden, einschließlich der thermischen Isolierung und Ummantelung, zu bilden. Abschließend folgt der Endbearbeitungsschritt, der das Hinzufügen von Türen und Fenstern sowie die Fassadenmontage und Innenauskleidung umfasst. Derartige hochgradig vorgefertigte Platten werden in der Regel anschließend auf die Baustelle transportiert, um vor Ort montiert zu werden.

Hauptgruppe

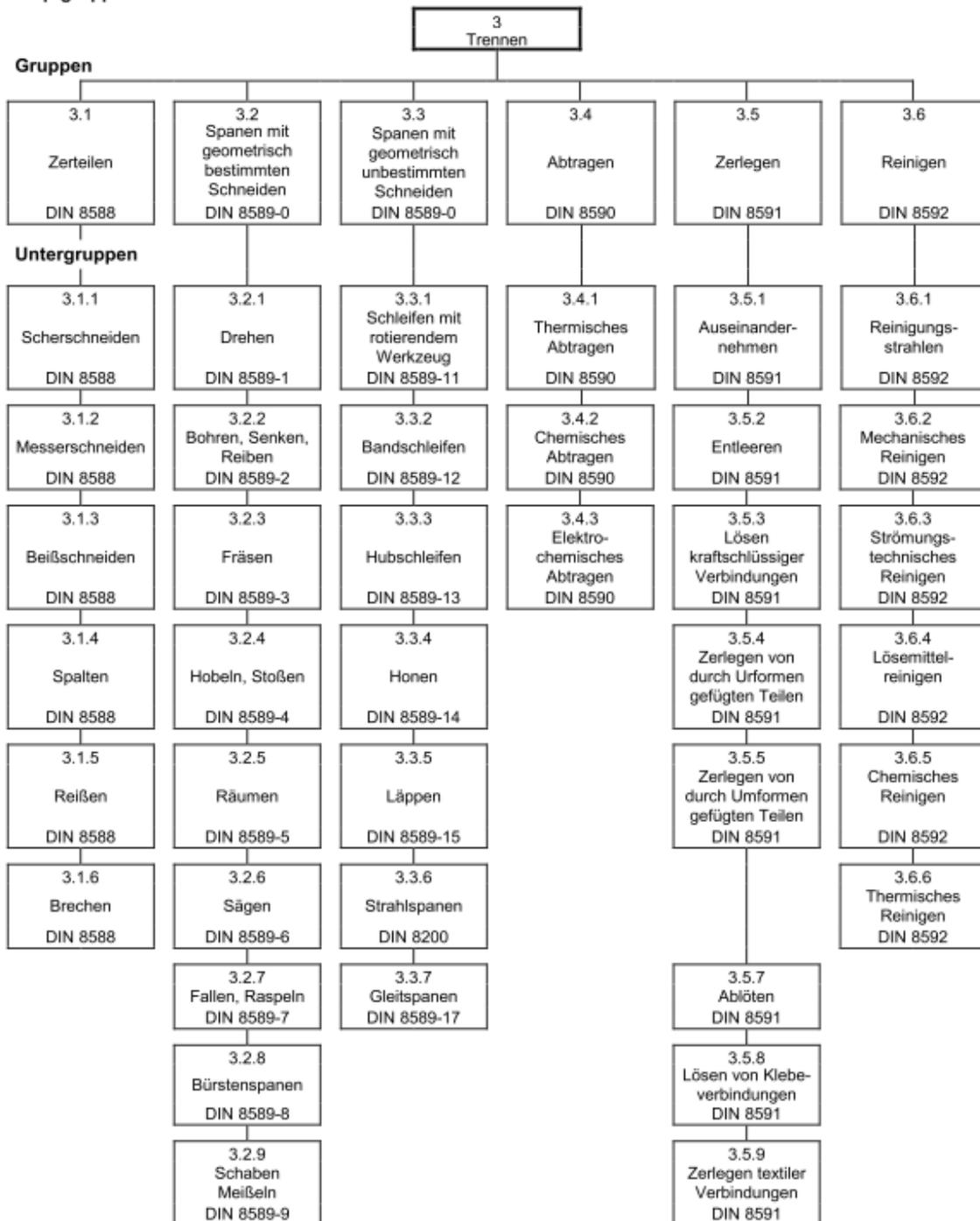


Abb. 2: Hauptkategorie Trennen im Herstellungsprozess nach DIN 8580.

Während der Analyse wurden mehrere Beobachtungen festgehalten. Zusammenfassend unterscheiden sich Prozesse und Routineabläufe während der Vorbereitung und Montage nur geringfügig, beginnen dann aber gegen Ende der Prozesskette je nach Produkt stark zu variieren. Nichtsdestotrotz gibt es spezifische Prozessschritte, wie zum Beispiel Einmessen, Nageln oder Schrauben, die über die gesamte Produktionskette hinweg häufig und in ähnlicher Form vorkommen (Abb. 3).

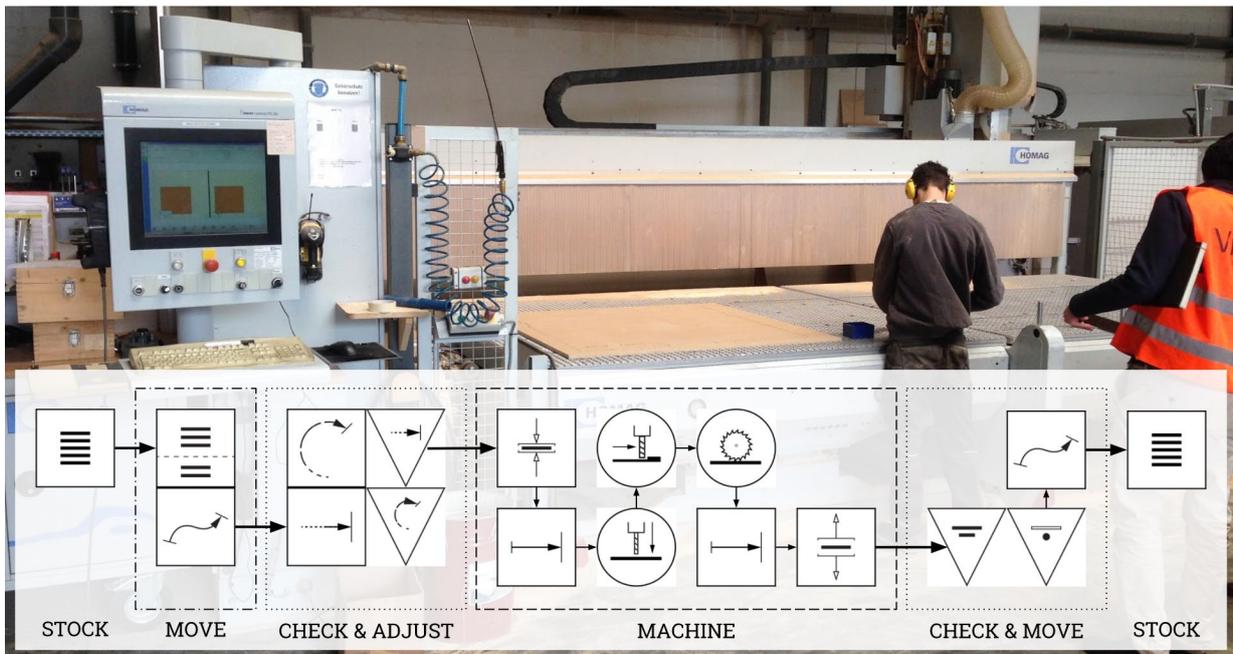


Abb. 3: Beispielhafte Prozesskette mit für den Holzbau angepassten Symbolen

Das dominierende Bausystem in Europa ist immer noch der Tafelbau, jedoch wächst der Anteil von massiven Holzbausystemen (z.B. Brettsperrholz-Wänden) schnell und wird voraussichtlich weiter wachsen. Die Menge an menschlicher Arbeit nimmt über die gesamte Produktionskette rapide zu, und insbesondere der letzte Endbearbeitungsschritt weist nur wenig oder gar keine Automatisierung auf.

Während der Analysephase in AP 1.1 wurden drei Besuche bei Holzbaubetrieben vorgenommen, um bestehende Arbeitsprozesse zu beobachten und in die einzelnen Arbeitsschritte zu gliedern. Die besuchten Betriebe waren:

- Georg Ackermann GmbH
Eine Schreinerei mit mehr als 120 Mitarbeitern, die mit einer Vielzahl an digitalen Fertigungsmethoden eine große Spannweite an Projekten vom Möbelbau bis Fassadenbau abdeckt. Die Projekte werden oft gebündelt an verschiedenen Maschinen ausgeführt.
- Schlosser Holzbau GmbH
Mit 75 Mitarbeitern ein typischer großer Holzbaubetrieb, der in zwei Haupthallen unterteilt ist. Das Unternehmen ist auf Auftragsarbeit vom Entwurf bis zur Lieferung spezialisiert und hat dazu ihre eigenen Bausysteme entwickelt.
- Müllerblastein HolzBauWerke GmbH
Das mit 60 Mitarbeitern kleinste der drei Unternehmen weist viele Ähnlichkeiten zu Schlosser Holzbau. Müllerblastein ist sowohl auf Sonderlösungen als auch Massivbau spezialisiert.

AP 1.2: Prozessanalyse: Modelle Mensch-Roboter-Kooperation

Die Mensch-Roboter-Kollaboration (nachstehend als MRK bezeichnet) ist ein schnell wachsender Bereich der Robotik, der sich auf die direkte Kooperation¹ zwischen Menschen

¹ Trotz der Tatsache, dass wir eine Differenzierung der Begriffe Kooperation und Kollaboration in der wissenschaftlichen Literatur, insbesondere in Bereichen wie Management oder Pädagogik (Roschelle & Teasley, 1995) finden können, werden sie für die Zwecke dieser Forschung als Synonyme bezeichnet.

und Robotern konzentriert. Der Hauptunterschied zu einer klassischen Roboterzelle im Bereich der Industrierobotik ist der immer geringer werdende Bedarf an sicherheitsbedingter Trennung von Mensch und Roboter. Aufgrund der fortschrittlichen Sensoren und der zugänglichen Rechenleistung ist es möglich, die physischen Barrieren einer Standard-Roboterzelle vollständig zu entfernen und die Sicherheitslogik zu überarbeiten. Somit werden die kognitive Leistungsfähigkeit und die schnelle Anpassungsfähigkeit des menschlichen Gehirns mit der Wiederholbarkeit und den langen Betriebszeiten des Robotersystems kombiniert.

Nach DIN EN ISO 10218 gibt es vier spezifische MRK-Kategorien (Abb. 4):

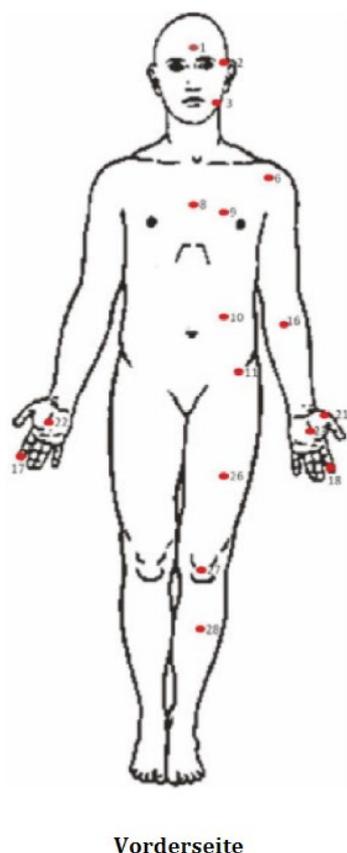
- Sicherheitsüberwachter Stopp: Der Roboter hält an, wenn der Arbeitsbereich verletzt wird. Diese Kategorie ist für eine wenig komplexe Kooperation gedacht.
- Geschwindigkeits- und Trennungsüberwachung: Arbeitet mit der Zonierung des Arbeitsbereichs. Der Roboter verlangsamt seine Bewegung auf die sichere Geschwindigkeit, wenn der Arbeitsbereich verletzt wird und stoppt vollständig, wenn die Trennungsdistanz unter ein bestimmtes Sicherheitsniveau fällt (Berechnung wird in ISO / TS 15066 beschrieben)
- Handführung: Wird normalerweise zum Einlernen des Pfades verwendet, der später in einem nicht kollaborativen Hochgeschwindigkeitsmodus ausgeführt wird. Es wird normalerweise ein Kraftmomentsensor am Roboter verwendet, der in der Nähe des Effektors montiert ist und die von einem menschlichen Bediener ausgeübten Kräfte abliest.
- Energie- und Kraftbegrenzung: Die heute fortschrittlichste Strategie für MRK. Im Gegensatz zu bisherigen Methoden erfordert es eine völlig neue Art von Roboterkonstruktion, die entworfen wurde, um mit Menschen zusammenzuarbeiten. Sie benötigen normalerweise keine zusätzlichen Sicherheitselemente.



Abb. 4: Die letzten zwei Kategorien der MRK mit direkter Mensch-Roboter Interaktion

Die MRK im Bereich der Industrierobotik kann leicht als eine spezifische Kombination von Sicherheitsmechanismen verstanden werden. Weitere wichtigen Regularien, die das Design der Sicherheit von kollaborativen Szenarien beschreiben, sind (1) ISO 13849, die die grundlegenden generischen Sicherheitsanforderungen von Maschinen festlegt, einschließlich der für eine Risikobewertung erforderlichen Leistungsstufen (LS); und (2) die neue ISO / TS 15066, die speziell die Sicherheitsanforderungen der kollaborativen Roboter einschließlich maximal

zulässiger Kräfte der Roboter auf den menschlichen Körper oder die Berechnung von Sicherheitsabständen beschreibt (Abb. 5).



Körperregion	Spezifischer Körperbereich		Quasistatischer Kontakt		Transienter Kontakt	
			Maximal zulässiger Druck ^a p_s N/cm ²	Maximal zulässige Kraft ^b N	Faktor für den maximal zulässigen Druck ^c P_T	Faktor für die maximal zulässige Kraft ^c F_T
Schädel und Stirn ^d	1	Stirnmitte	130	130	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
	2	Schläfe	110		Nicht anwendbar	
Gesicht ^d	3	Kaumuskel	110	65	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
Hals	4	Halsmuskel	140	150	2	2
	5	Siebter Halswirbel	210		2	
Rücken und Schultern	6	Schultergelenk	160	210	2	2
	7	Fünfter Lendenwirbel	210		2	
Brustkorb	8	Brustbein	120	140	2	2
	9	Brustmuskel	170		2	
Bauch	10	Bauchmuskel	140	110	2	2
Becken	11	Beckenknochen	210	180	2	2
Oberarme und Ellenbogengelenke	12	Deltamuskel	190	150	2	2
	13	Oberarmknochen	220		2	
Unterarme und Handgelenke	14	Speiche	190	160	2	2
	15	Unterarmmuskel	180		2	
	16	Armnerf	180		2	
Hände und Finger	17	Zeigefingerkuppe D	300	140	2	2
	18	Zeigefingerkuppe ND	270		2	
	19	Zeigefingerendgelenk D	280		2	
	20	Zeigefingerendgelenk ND	220		2	

Abb. 5: Zulässige Kräfte auf den menschlichen Körper nach TS 15066

Auf der Grundlage der Analyse können mehrere Schlussfolgerungen gezogen werden. Zunächst zeigen einige der gängigen Szenarien im Holzbau bereits Elemente einfacher Kollaborationsstrategien. Als ein Beispiel können die Holzrahmen-Arbeitsstationen gelten, die in der Tafelbau-Vorfertigung verwendet werden. Hier werden die einzelnen Balken und Träger vorübergehend geklemmt, während der menschliche Arbeiter sie mit Klammern oder Nägeln befestigt.

AP 2: Identifikation der Potentiale

AP 2.1: Identifizierung der Potenziale von MRK im Holzbau

Automatisierung von Fertigungsprozessen

Die ursprüngliche Bedeutung der Automatisierung, als Notwendigkeit, die Anzahl der Sondermaschinen in einer Produktion zu erhöhen, um die Produktivität zu steigern (Noble 2011), wuchs weit über den Kontext der Fertigung hinaus und wird heute nicht nur als die Automatisierung einer physischen, sondern auch einer kognitiven Arbeit beschrieben (Frohm, Lindström, Stahre & Winroth 2008). Diese Verschiebung ist besonders bemerkenswert mit Einführung der Industrie 4.0, wo Prozesse wie die Automatisierung der Wissensarbeit oder eine vorausschauende Instandhaltung eine entscheidende Rolle spielen. Automatisierung wurde so zu einem weit verbreiteten Begriff mit vielen verschiedenen Bedeutungen, die sich auf unterschiedliche Weise definieren lassen. Für die Zwecke dieser Forschung wird die Automatisierung nach der Definition von Parasuraman, Sheridan & Wickens (2000) beschrieben: eine Vorrichtung oder ein System, das eine Funktion erfüllt (teilweise oder vollständig), die zuvor von einem menschlichen Nutzer ausgeführt wurde oder möglicherweise ausgeführt werden könnte (teilweise oder vollständig).

Automatisierung ist eine Methode, die Produktivität zu steigern und die Kosten einer Produktion zu senken. Eine der Möglichkeiten, Herstellungsprozesse zu beschreiben, besteht daher darin, zu analysieren, inwieweit sie bereits automatisiert sind. Dieses Verhältnis der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine wird als Automatisierungsgrad (Level of Automation - LoA) bezeichnet. Auch wenn die Zunahme der Automatisierung ein allgemeiner universeller Trend ist, der in der Geschichte der industriellen Fertigung zu beobachten ist, bedeutet ein höheres Niveau nicht unbedingt eine automatische Steigerung der Produktivität. Einerseits ermöglicht die Automatisierung die Steuerung hochkomplexer Systeme, die nur für menschliche Anwender zu schwierig zu steuern wären, andererseits macht sie das System anfällig für Störungen und macht es unflexibel und starr. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die umgekehrte Korrelation zwischen dem LoA und der Möglichkeit, eine größere Mischung aus verschiedenen Produkten zu erzeugen (Windmark et al. 2012). Jeder Herstellungsprozess hat ein bestimmtes optimales Automatisierungsniveau, das Über- oder Unterschreiten ist kontraproduktiv (Gorlach und Wessel, 2008) (Abb. 6). Ein höherer LoA ist daher vor allem für Hersteller mit einer hohen Produktionsrate und einem geringen Grad an Anpassung des Endprodukts rentabel.

MRK und andere fortschrittliche Fertigungstechnologien können als eine mögliche Lösung für die Notwendigkeit verstanden werden, entweder eine Kleinserienproduktion oder eine Produktion von hochpersonalisierten Endprodukten zu optimieren.

Merkmale und Trends im Holzbau

Typische Projekte der Bauindustrie können als Einzelanfertigungen mit einer fragmentierten Lieferkette (d.h. viele verschiedene beteiligte Auftragnehmer) bezeichnet werden, die überwiegend vor Ort gefertigt werden (Meiling, 2010). Im Vergleich zu den Voraussetzungen für einen höheren LoA aus dem vorherigen Abschnitt (d.h. eine hohe Produktionsrate gleicher oder ähnlicher Produkte) ist es offensichtlich, dass diese Merkmale ein erhebliches Hindernis für die zunehmende Automatisierung in der Bauindustrie darstellen.

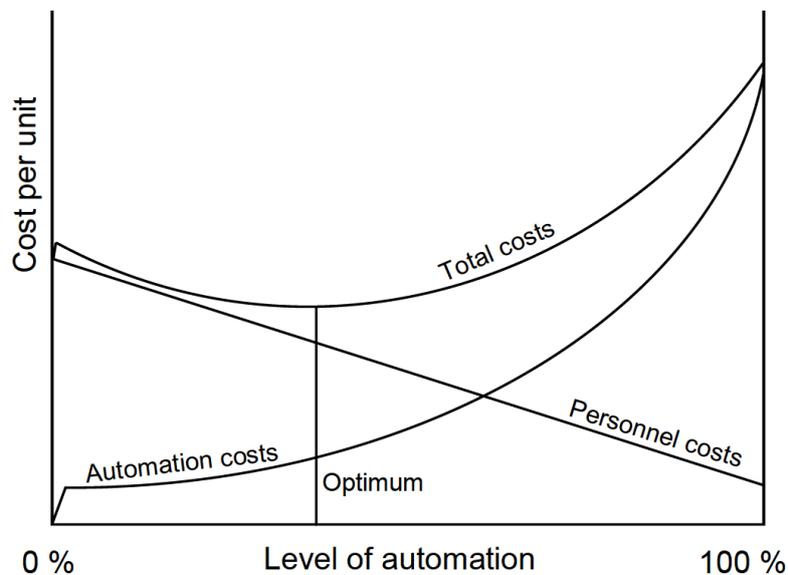


Abb. 6: Diagramm der Kosten im Vergleich zum Automatisierungsgrad

Die Holzbaubranche steht darüber hinaus mit einer weiteren Herausforderung gegenüber, die mit dem anisotropen und variantenreichen Werkstoffcharakter einhergeht und die Handhabung von Massivholz in Fertigungsprozessen besonders erschwert (Karlton, 2007). Es gibt jedoch einige Trends und Merkmale der heutigen Holzbaubranche, die entweder die oben genannten Barrieren aufheben oder neue Möglichkeiten der Automatisierung eröffnen. Zum Beispiel der Übergang vom Baustellenbau zur Vorfertigung in einer Fabrik. Da die einzige Größenbeschränkung der vorgefertigten Bauteile in der Regel die Transportbeschränkungen sind (Kolb, 2008; Deplazes, 2005), beschleunigt sie nicht nur die Montagezeit, sondern ermöglicht auch die Planung strukturierterer und kontrollierbarer Fertigungseinrichtungen, was Potenziale für eine höhere Automatisierung schafft.

Durch die Weiterentwicklung der Holzwerkstoffe haben sich die Holzbausysteme von linearen Trägerelementen (z.B. Holzrahmenplatten) auf eine planare (z.B. Kreuzlagenholz) umgestellt. Diese Plattentektonik (Deplazes, 2005) ermöglicht eine größere Designfreiheit und macht das Material homogener, was den Bedarf an komplexer Sensorik und Sensorintegration während der Produktion reduziert.

Potenziale identifizieren

Durch die Kombination der oben genannten Eigenschaften mit den Ergebnissen der Analyse aus dem Abschnitt 1.1 ist es möglich, zwei Hauptgruppen von Prozessen zu identifizieren, die durch eine geeignete Automatisierungsstrategie verbessert werden können:

1. Erstens werden Aufträge, die automatisiert werden sollen oder werden, häufig mit den drei Ds beschrieben: Dull, Dirty and Dangerous (stumpf, schmutzig und gefährlich). In einem ersten Schritt werden daher die Prozesse in der Holzherstellungskette herausgearbeitet, die sich entweder wiederholen, wie z.B. Schleifen oder Maschinenpflege, oder verschmutzt oder gefährlich sind, wie z.B. die manuelle Zuführung von Elektrowerkzeugen. Dieses vorherige Beispiel ist einer der Hauptgründe für Handverletzungen in der Holzverarbeitenden Industrie (Karlton, 2007) und gilt daher als eine Priorität der Automatisierung. Eine vierte Art von Arbeit, die in diese Kategorie aufgenommen werden kann, sind Operationen, von denen bekannt ist, dass sie Maschinen besser beherrschen und speziell für sie gebaut wurden (z.B. präzise



Abb. 7: Beispiel für CLT „Plattentektonik“.

Positionierung). Die Verfahren und Aufgaben in dieser Kategorie beziehen sich hauptsächlich auf den Umgang mit Zwischenprodukten in der Vorbereitungs- und Produktionsphase der Holzbau-Produktionskette.

2. Die zweite Gruppe umfasst Prozesse, die in der Regel in Abhängigkeit vom tatsächlichen Werkstück oder Projekt eine wesentliche Anpassung erfordern und daher eine Standardautomatisierung erschweren, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Ein Beispiel für solche Schritte wäre die Anbringung der Innenverkleidung oder der Veredelung vor Ort, die ein hohes Maß an Mobilität und Flexibilität erfordert. Um diese Schritte verbessern zu können, ist es notwendig, sie im Hinblick auf ihre atomaren Operationen, wie im Abschnitt 1.1 beschrieben, zu analysieren und diejenigen Teilprozesse zu finden, die einfache und überschaubare Aufgaben erzeugen, die derzeit über die gesamte Produktionskette wiederholt werden. Diese einfach genutzten Teilprozesse (z.B. Befestigen oder Bohren) können automatisiert werden, ohne den übergeordneten Prozess (z.B. eine Fassadenbekleidung) unflexibel zu machen. Folglich könnte diese Strategie in der Lage sein, das Ende der Produktionskette zu verbessern.

Anschließend ist es möglich, konkrete Potenziale im Holzbau gemäß dem Forschungsarbeitsplan zu analysieren und in vier Prozesse einzuteilen:

1. *Roboter-Mensch-Kooperation für präzises Platzieren / Fügen*

Nach DIN8593-0 ist das Fügen kein Synonym für Montage, sondern eines seiner Kernstücke zusammen mit Handhabungs- und Hilfsprozessen (DIN, 2003). Gleichzeitig verursacht die Montage etwa 80% der Herstellungskosten des Produkts und somit kann ihre Optimierung einen hohen Wettbewerbsvorteil bringen (Lohse et al., 2005). Die Roboterbaugruppe wurde in der Vergangenheit hauptsächlich in Produktionsanlagen mit hohem Durchsatz eingesetzt, wird aber zunehmend in flexiblen und vielseitigen Arbeitszellen eingesetzt (Hägele, Nilsson & Pires et al., 2016).

Neuere Forschungen haben die Möglichkeit der robotergestützten Positionierung und Fügung im Holzbau, auch in größeren Gebäudegrößen, nachgewiesen (Willmann et al., 2016). Dennoch sind solche Systeme relativ komplex und erfordern erhebliche Rüstinvestitionen. Wie Willmann et al. feststellten, beeinflusste dieser hoch automatisierte Prozess auch das Design des Montagesystems selbst. Infolgedessen war es notwendig, neuartige, nicht standardisierte Verbindungen zu entwickeln, um den Montageprozess der Roboter zu optimieren.

Ein hochmoderner Holzbau nutzt die automatisierte Positionierung nur selten. Typische Holzrahmen-Montagestationen wie FRAMETEQ von Homag verfolgen einen eigenen Ansatz, bei dem die Position der Innenbolzen durch numerisch gesteuerte Bolzen am Rahmen der Montagestation definiert wird: Während die Bolzen selbst vom Menschen gehandhabt und positioniert und anschließend automatisch mit Nägeln verbunden werden.

Mögliche MRK-Strategien im Holzbau zum Positionieren und Fügen lassen sich je nach Elementgröße in zwei Kategorien einteilen. Die erste Kategorie umfasst die Montage der Tragkonstruktion und beinhaltet daher die Manipulation von größeren und schwereren Holzelementen und damit eine schwerere Positionierung. Im Gegensatz zu den oben genannten Montagestationen würde eine MRK-erweiterte Rahmenmontage von Vorteil sein, wenn Bolzen oder Platten mit einem Roboterarm gehandhabt und positioniert und von menschlichen Mitarbeitern fixiert werden. Ein solcher Ansatz ermöglicht eine radikale Änderung der räumlichen Vorfertigungsanordnung, bei der dank der hohen Freiheitsgrade (Degrees of Freedom – DOF) des Roboterarms planare Bauelemente in vertikaler statt in horizontaler Position montiert werden können. Die zweite Kategorie umfasst die Montage von kleineren und leichteren Elementen wie Fassadenverkleidungen oder die Positionierung von Beschlägen. Solche Szenarien könnten die Möglichkeit nutzen, kleinere Roboterarme zu verwenden, die speziell für die Kollaboration mit Menschen entwickelt wurden

2. *Roboter-Mensch-Kooperation für Qualitätssicherung*

Die Qualitätssicherung im Holzbau wird vor allem durch die Sortierung des Bauholzes bestimmt. Die richtigen Festigkeitsklassen und Sortierungen sind dem Hersteller daher bekannt, da das Holz zuvor im Sägewerk sortiert wurde. Die übliche Größe der Bauteile und die vererbte begrenzte Maßhaltigkeit der Holzbauteile aufgrund der Anisotropie und Inkonsistenzen des Rohstoffs (Rindler, Vay et al., 2017) erfordern größere Toleranzen. Die hohen Standards der immer beliebter werdenden Brettschichtholz- und Leimverbindungen erfordern jedoch eine bessere Qualitätskontrolle. Automatische Qualitätskontrolle und Vermessung sind in anderen Industriezweigen, wie z.B. der Automobilindustrie, Standard. Dennoch bleibt der Nutzen von MRK für solche Prozesse fraglich. Ein gültiger Ansatz ist eine technologische Kombination mit Herstellungsverfahren wie Fügen oder Fräsen, bei denen das Sammeln von Bildern oder anderen sensorischen Daten wie Bildern oder Formerkennung gleichzeitig mit dem Herstellungsprozess stattfindet. Solche Lösungen profitieren jedoch nicht direkt von der MRK-Technologie.

3. *Roboter-Mensch-Kooperation für sich wiederholende Tätigkeiten und Logistik*

Wie bereits beschrieben, ist eine Automatisierung von langweiligen und sich wiederholenden Aufgaben eines der häufigsten und ältesten Szenarien, in denen Industrieroboter historisch stark eingesetzt werden. Ihre hohe Wiederholgenauigkeit (d.h. die Fähigkeit, die gleiche Bewegung mit minimaler Abweichung auszuführen) und

minimale Ausfallzeiten machen sie zu einem idealen Werkzeug für solche Aufgaben. Während die Automatisierung von sich wiederholenden Aufgaben in Hochdurchsatz-Produktionslinien mit Standard-Industrierobotern relativ einfach ist, ist eine schnelle Anpassungsfähigkeit für Produkte in kleinen Serien nach wie vor problematisch. Eine vielversprechende Lösung hierfür ist der Einsatz von kollaborativen Robotern mit Kraft-Drehmomentsensoren, die eine schnelle Programmierung durch Demonstration (PbD) ohne umfangreiche Programmierkenntnisse ermöglichen. Diese Technologie wurde bereits in anderen Industriebereichen mit Systemen wie rob@work (Helms et al., 2002) oder CoSTAR (Guerin et al., 2015) getestet.

Ein häufiges Beispiel für eine ermüdende und sich wiederholende Aufgabe in der Fertigung, die zunehmend kollaborative Roboter einsetzt, ist die Maschinenbedienung und die Teilesortierung. Im Holzbau kann man sich eine Automatisierung von stumpfen Aufgaben wie Befestigen (d.h. Nageln, Schrauben, Kleben) oder Maschinenpflege von Elektrowerkzeugen wie Tischsäge oder CNC-Fräse vorstellen.

4. *Roboter-Mensch-Kooperation für schwere und unangenehme Tätigkeiten*

Die Automatisierung gefährlicher und unangenehmer Aufgaben ist ein weiteres zentrales Ziel der Industrierobotik und eine produktive Möglichkeit, die Gefährdungen am Arbeitsplatz zu reduzieren. Eine der Hauptursachen für arbeitsbedingte Verletzungen ist die Manipulation von schweren und sperrigen Teilen. Eine effiziente Möglichkeit, solche Risiken zu reduzieren, ist der Einsatz von intelligenten Hilfsmitteln (IADs) in Form von Kompensatoren oder Aufzügen, die bereits zum Standard-Werkstattbestand in der Holzbaubranche gehören (z.B. Vakuum-Schlauchheber). So wertvoll sie auch sein mögen, sie haben nur eine unterstützende Funktion und haben daher nicht die Möglichkeit einer grundlegenden Autonomie im Vergleich zu Robotern. Die gemeinsame Manipulation mit Industrierobotern ist ein häufiges Szenario der zeitgenössischen Forschung im Bereich der physischen Mensch-Roboter-Interaktion (pHRI) (Haddadin et al., 2016), und obwohl sie noch weitgehend experimentell ist, ist sie eine vielversprechende Technologie, die in eine MRK-fähige Roboterzelle integriert werden kann, um ihre Flexibilität weiter zu erhöhen.

Die zweite größere Gruppe der Arbeitsgefahren im Holzbau ist die zuvor beschriebene Maschinenbedienung und Zuführung von Elektrowerkzeugen. Tatsächlich ist die manuelle Zuführung die Hauptursache für Handverletzungen in der holzverarbeitenden Industrie (Karlton, 2007) und gilt daher als eine Priorität der Automatisierung.

AP 2.2: Identifizierung verwandter robotergestützter technologischer Lösungen

Zur Kollaboration zwischen Mensch und Roboter

Eine Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), wie sie in der TS/ISO 15066 (ISO, 2016) beschrieben ist, ist eine Tätigkeit, bei der ein speziell entwickeltes Robotersystem (einschließlich des Werkstücks) und ein Mensch Aufgaben in einem definierten Arbeitsbereich gleichzeitig während des Produktionsbetriebs ausführen. Die ursprüngliche technische Beschreibung eines kollaborativen Roboters beschreibt eine Maschine, die eine direkte physische Kollaboration mit einer Person ermöglicht, indem sie leistungsstarke und potenziell gefährliche Stellglieder reduziert oder eliminiert (Colgate & Peshkin, 1997; Peshkin et al., 2001). Führende Industrieroboterhersteller beschreiben MRK häufig als ein Produktionskonzept ohne Trennung und Sicherheitszäune zwischen Mensch und Roboter. Alle oben genannten Beschreibungen von MRK legen einen Schwerpunkt auf den Sicherheitsaspekt der Fertigung. Mit anderen Worten charakterisieren sie kollaborative Roboter lediglich als ein

Robotersystem, das in unmittelbarer Nähe des Menschen arbeiten kann, ohne ihn zu verletzen.

Ein Beispiel für einen Prozess, der als kollaborativer Prozess angesehen werden könnte, ist ein durch Roboter verpacktes Produkt auf einem Förderband und ein daneben arbeitender Mensch, der die Qualitätssicherung durch Überprüfung der Verpackung und Ablegen beschädigter Produkte durchführt. Wenn der Mensch dem Roboter in die Quere kommt und auf seinen Arm trifft, stoppt er und setzt erst wieder ein, sobald der Weg wieder frei ist. Ansonsten gibt es keine andere Form der Interaktion zwischen den beiden "Agenten". Technisch gesehen kann dies als ein kollaborativer Prozess zwischen Mensch und Roboter betrachtet werden. Dieser Bericht deutet jedoch darauf hin, dass MRK mehr bieten kann als eine bloße Koexistenz der Akteure innerhalb desselben Raumes.

Klassifizierung der Kollaboration

Die Kollaboration wird häufig entweder als körperliche Koordination zwischen den beteiligten Akteuren oder in Bezug auf ihre mentalen Zustände und Absichten analysiert. Um verschiedene Arten der Kollaboration zu charakterisieren, kann für die Zwecke dieser Forschung der zweidimensionale Ansatz von Fiebich, Nguyen & Schwarzkopf (2015) als effektiver Rahmen dienen. Die Autoren schlagen vor, die Kollaboration anhand von zwei orthogonalen Dimensionen zu klassifizieren (Abb. 8):

- Verhaltensdimension, die die physikalischen Verhaltensmuster der Kooperation beschreibt. Damit eine kollaborative Aufgabe als verhaltensorientiert betrachtet werden kann, muss sie drei Voraussetzungen erfüllen: (1) es muss mindestens zwei Akteure einbeziehen, die ihr Verhalten in Raum und Zeit koordinieren, (2) von außen beobachtbar sein, um (3) eine Veränderung der Umwelt herbeizuführen (Sebanz et al., 2006). Die Achse der Verhaltensdimension ist unendlich, je komplexer und

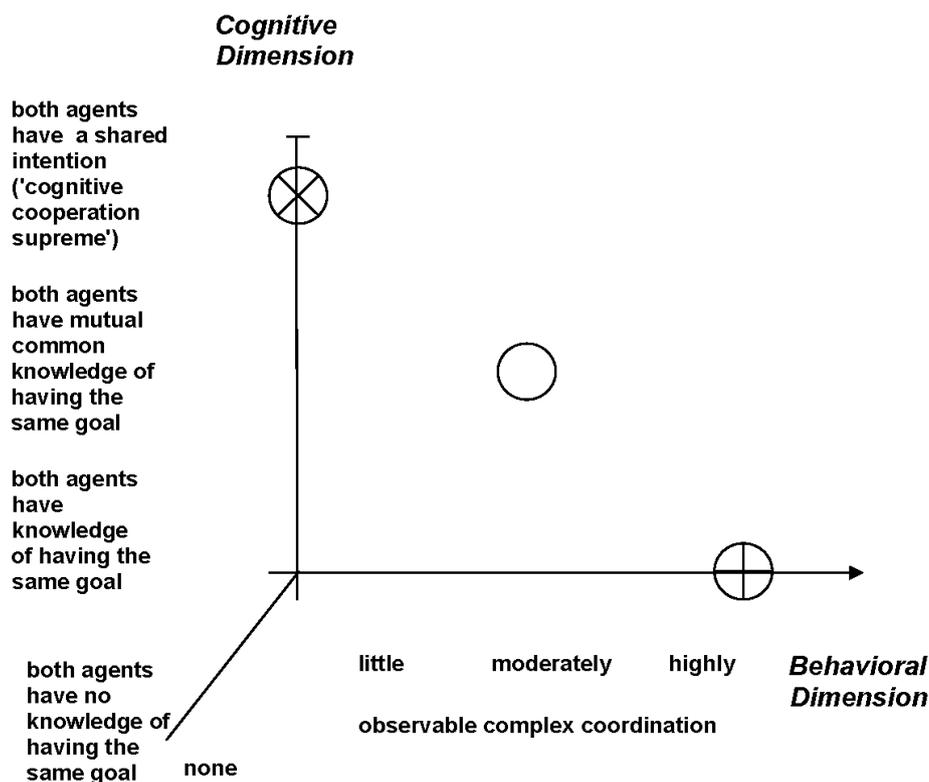


Abb. 8: Zwei Dimensionen der Kooperation

koordinierter das Verhalten nach außen hin erscheint, desto höher liegt es auf der Achse.

- Kognitive Dimension, die die kognitiven Zustände der beteiligten Akteure und ihre Absichten beschreibt. Ähnlich wie die oben genannte Verhaltens-Kooperation muss auch eine kognitive Kooperation erfolgen: (1) mindestens zwei Agenten einbeziehen, die Aktionen durchführen, um das gleiche Ziel zu verfolgen, und (2) die Agenten wissen lassen, dass sie das gleiche Ziel haben. Die maximale kognitive Kollaboration entsteht, wenn die beteiligten Akteure gemeinsame Absichten haben (Bratman, 1993), d.h. die Akteure haben ein gemeinsames Wissen über das gleiche Ziel und das gemeinsame Engagement, das gleiche Ziel zu verfolgen.

Eine Standardanwendung einer Mensch-Roboter-Kollaboration, wie im vorherigen Beispiel beschrieben, wäre daher als rein verhaltensorientiert anzusehen, da keiner der Agenten das gleiche Ziel kennt und ihre räumliche Koordination nicht besonders aufwändig ist.

Während Beispiele für komplexere Mensch-Roboter-Kooperationsverhalten in modernen industriellen Anwendungen von MRK nicht allzu schwer zu finden sind, sind Kooperationsaufgaben, die höher auf der kognitiven Achse liegen würden, immer noch selten. Dennoch zeigten Studien, dass eine Kooperation, die höher auf der kognitiven Achse liegt, nicht nur den Erfolg der Kooperation erhöht (Grigore et al., 2013), sondern auch für den Menschen vorzuziehen ist (Chan, Parker & Van der Loos et al., 2012). Das Erreichen einer grundlegenden kognitiven Ebene der Kollaboration zwischen Mensch und Roboter kann relativ einfach sein, entweder durch gemeinsame Aufmerksamkeit (Fiebich, Nguyen & Schwarzkopf, 2015; Lenz, Nair & Rickert et al., 2008) oder durch das Verständnis grundlegender Ziele wie die Freisetzung eines erfassten Objekts als Reaktion auf eine Lastübertragung (Chan, Parker & Van der Loos et al., 2012).

Voraussetzungen für die Umsetzung der Mensch-Roboter-Kollaboration

Zunächst ist es bemerkenswert, dass es für eine höhere kognitive Kollaboration nicht notwendig ist, das Robotersystem mit komplexer künstlicher Intelligenz auszustatten. Darüber hinaus ist eine häufige verwendete Methode, das Kooperationsverhalten im Voraus zu programmieren und eine Reihe von Regeln und Eingaben zu definieren, die sie auslösen. Ein gemeinsamer Ansatz zur Bestimmung der richtigen Eingaben und Eingabeschwellen besteht darin, zwischenmenschliche Verhaltensmuster zu beobachten und diese empirischen Daten auf die Mensch-Roboter-Interaktion anzuwenden (Fiebich, Nguyen & Schwarzkopf, 2015; Chan, Parker & Van der Loos et al., 2012). Ziel ist es, ein besseres Verständnis der menschlichen Absichten zu erreichen, um die richtigen Verhaltensmuster wählen zu können, sowie ein Modell für menschenähnlichere Verhaltensweisen des Roboters zu schaffen, damit er für die menschlichen Mitarbeiter berechenbarer und damit vertrauenswürdiger wird (Grigore et al., 2013; Miller & Parasuraman, 2007).

Zweitens, ein weiterer Schritt für eine erfolgreiche Umsetzung der MRK ist die Entwicklung einer geeigneten Kommunikationsschnittstelle zwischen einem Roboter und einem Menschen. Eine solche Schnittstelle wird in der Regel als Human-machine interface (HMI) angesehen und muss die Fähigkeit bieten: 1) den Roboter zu unterweisen und gleichzeitig 2) den menschlichen Bediener über die Zustände des Robotersystems informieren. Darüber hinaus muss diese Kommunikation auch bei komplexen Produktionssystemen einfach und intuitiv sein. Modernste Industrieroboter-Manipulatoren verwenden spezielle herstellereigene Computersprachen, um die Bewegungen des Armes zu programmieren. Die Sprachen sind meist sehr abstrahiert, um die Arbeit von Roboterprogrammierern zu erleichtern, die in der Regel zwar ein Verständnis für den Fertigungsprozess, aber nur begrenzte



Abb. 9: Beispiel für ein industrielles HMI-Panel

Programmierkenntnisse haben (Hägele, Nilsson & Pires et al., 2016). Häufig sind die Roboteranordnungen auch mit einem noch höheren Abstraktionsgrad in Form eines Bedienfeldes mit Bildschirmen ausgestattet, das die Zustände und Anzeigen grafisch darstellt, gekoppelt mit verschiedenen Tasten und anderen Schaltern, die den Prozess steuern können. Der menschliche Bediener erhält nur rudimentär Einblick in die Steuerung des Systems (Abb. 9).

Obwohl diese Schnittstelle in vielen festen Automatisierungsszenarien der De-facto-Standard ist, ist sie aufgrund ihrer begrenzten Rekonfigurierbarkeit und der Tatsache, dass der Bediener seinen Fokus zwischen dem Bedienfeld und der eigentlichen Aufgabe verlagern muss, für MRK-Szenarien ungeeignet. MRK erfordert Flexibilität und die Fähigkeit, an der Kollaboration teilzunehmen und gleichzeitig ein Systemfeedback zu erhalten.

Mensch-Roboter-Kommunikation

Wie zuvor beschrieben, muss eine korrekte Mensch-Roboter-Schnittstelle (HRI) intuitiv und anpassungsfähig sein. Diese Studie schlägt vor, mögliche HMI-Implementierungen in drei

Kategorien einzuteilen, basierend auf den beteiligten Kommunikationskanälen: auditiv, taktil und visuell.

Die Audio-Schnittstelle, bei der sowohl das Robotersystem als auch die menschlichen Teilnehmer Informationen und Befehle per Ton oder Sprache austauschen, ist eine intuitive und freihändige Lösung. Derzeit gibt es verschiedene Tools und Toolkits (z.B. mit.ai oder Open Source CMUSphinx), die die Entwicklung kundenspezifischer Lösungen mit natürlicher Spracherkennung und -synthese erleichtern. Die instabile Leistung in lauten Umgebungen begrenzt jedoch das Potenzial einer Holzwerkstatt im industriellen Umfeld. Dennoch kann es für den Empfang von Rückmeldungen vom Robotersystem geeignet sein, wenn der Bediener geeignete Kopfhörer verwendet, oder in einfacher Form kann es als Kommunikationsmittel dienen, indem es grundlegende Audiosignale implementiert.

Tastbare Interfaces wurden im vorherigen Kapitel bezüglich der haptischen und taktilen Interfaces der kollaborativen Roboter teilweise vorgestellt (Fiebich, Nguyen & Schwarzkopf, 2015; Grigore et al., 2013). Die Implementierung basiert häufig auf empirischen Datensätzen zwischenmenschlicher Interaktionen (Chan, Parker & Van der Loos et al., 2012). Dieser Ansatz basiert auf physischen Reizen, indem er einen mechanischen Druck zwischen den Körperteilen der beteiligten Agenten anwendet und darauf reagiert. Es ist zwar schwer zu implementieren für Roboterarme, die nicht mit Kraftdrehmoment- oder taktilen Sensoren ausgestattet sind, aber es ist ein entscheidendes Element in der direkten physischen Mensch-Roboter-Interaktion (pHRI).

Die visuelle Kommunikationsschnittstelle ist eine weit verbreitete Art von HMI, die sich in zwei Kategorien unterteilen lässt. Die erste ist die zunehmend wichtigere visuelle Interpretation von sozialen Hinweisen in der menschlich-menschlichen Interaktion wie Blick (Grigore et al., 2013) oder Körperhaltung (Strabala et al., 2013). Die zweite ist die direkte Visualisierung von Informationen in Form von Texten und Bildern. Während dieser Ansatz viele Hindernisse für eine erfolgreiche Implementierung der MRK mit sich bringt, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, bringt ein aktuelles Aufkommen von kommerziell erhältlichen Augmented Reality Headmounted Displays (ARHMDs), wie Microsoft HoloLens (Abb. 10) oder Meta, neue Möglichkeiten intuitiver Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine.

Augmented Reality (AR) ist eine Technologie, die Computergrafiken der realen Welt überlagert, anstatt sie über einen externen Bildschirm zu visualisieren (Green et al., 2008). Die Intuitivität von AR und die einfache Integration in modernste Spiele-Engines wie Unity oder Unreal Engine



Abb. 10: Microsoft HoloLens

machen es zu einer interessanten Gelegenheit für HRI und sind daher ein aktives Forschungsthema (Walker et al. 2018).

Eine Gesten- und Blickerkennung, die von einigen der ARHMDs angeboten wird, hat zusätzlich das Potenzial eine reziproke Kommunikation zwischen Mensch und Roboter zu ermöglichen.

Strategien zur Umsetzung von MRK im Holzbau

Um die in Abschnitt 2.1 skizzierte breite Gruppe von Prozessen im Holzbau erfolgreich umzusetzen (d.h. stumpf, schmutzige und gefährliche Prozesse und Prozesse mit hoher Variabilität), schlägt diese Forschung vor, drei allgemeine Strategien der Mensch-Roboter-Kollaboration innerhalb der Holzbaubranche zu etablieren: 1) gelegentliche Koordination, 2) Aufgabenübertragung und 3) direkte Kollaboration.

Die Strategien können sowohl einzeln als auch kombiniert in einem Prozess verwendet oder gleichzeitig eingesetzt werden.

Wie bereits beschrieben, muss ein typischer Holzbaubetrieb eine flexible Produktion aufrechterhalten, um auf dem Holzbau-Markt wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Fertigungseinrichtungen sind selten in Form einer Fließfertigung organisiert, sondern bestehen aus kompakten Arbeitsplätzen, die sich auf einen bestimmten Teilprozess spezialisiert haben und für verschiedene Bauprojekte einsetzbar sind. Der Fokus der 1) gelegentlichen Koordinierungsstrategie liegt hauptsächlich auf der Automatisierung jener Arbeitsplätze, die Aufgaben beinhalten, die monoton oder gefährlich für menschliche Mitarbeiter sind. Die Bewegung von Rohstoffen und Halbzeugen zwischen den Arbeitsplätzen wird somit von menschlichen Mitarbeitern gesteuert und begrenzt nicht den Prozessablauf, was ein Höchstmaß an Flexibilität ermöglicht. Um schwerere und größere Teile handhaben zu können, sind Standardindustrieroboter mit größerem Arbeitsbereich und höherer Nutzlast erforderlich, die standardmäßig nicht als sicher gelten. Daher ist es von grundlegender Bedeutung, geeignete Materialübergabe-Schnittstellen zwischen Roboter und Mensch mit der sicheren Funktionalität externer Geräte wie optoelektronische Schutzeinrichtungen (z.B. Laser, Vorhänge) oder physische Barrieren mit Verriegelungen zu gestalten. Die physische Mensch-Roboter-Interaktion ist selten oder nicht notwendig bei der technologischen Umsetzung des Roboterverhaltens, das in die Kategorie der sicherheitsüberwachten Stopp- oder Geschwindigkeits- und Trennungsüberwachung (wie im Kapitel 1.2 beschrieben) fällt und bei dem das kognitive Kooperationsniveau solcher Szenarien gering ist.

Sowohl Aufgabe 2) Delegation als auch 3) Direkte Kollaborationstrategien zielen auf Prozesse mit höherer Variabilität ab, indem sie ein mobiles, flexibles, kollaboratives Robotersystem verwenden, das bei Bedarf ad-hoc eingesetzt werden kann und in der Lage ist, direkte physische Interaktion mit menschlichen Mitarbeitern zu ermöglichen. Diese erfordern in der Regel eine komplexere Mensch-Roboter-Interaktion und eine höhere kognitive Ebene, wo ein hohes Maß an Kollaboration wünschenswert ist. Aufgrund der Notwendigkeit von gemeinsamen Arbeitsräumen und physischer Mensch-Roboter-Interaktion profitieren beide Strategien vor allem von der Technologie der kraft- und leistungsbegrenzten Roboter, die für das Arbeiten in unmittelbarer Nähe zum Menschen konzipiert sind und somit sicherer und geeigneter sind.

Die Strategie 2) Aufgabendelegation nutzt das Prinzip der Arbeitsverteilung zwischen den Agenten mit menschlicher Aufsicht, wobei kleinere, flexible Robotereinheiten eine Aufgabe von einem Menschen zugewiesen bekommen, der anschließend den Prozess überwacht und ein Leistungsfeedback erhält (Miller & Parasuraman, 2007). In diesem Szenario bleibt der menschliche Vorgesetzte vollumfänglich für den LoA des spezifischen Prozesses verantwortlich

und kann sich auf komplexere oder schwierigere Aufgaben konzentrieren. Ein einfaches Beispiel für eine solche Strategie wäre das autonome Bohren, bei dem ein Roboter unabhängig voneinander Löcher in ein normales Raster bohrt (z.B. für eine Fassadenverkleidung), während der menschliche Vorgesetzte nur die Unregelmäßigkeiten oder ganz unterschiedliche Aufgaben fokussiert.

Der Schwerpunkt der Strategie der 3) direkten Kollaboration liegt auf Prozessen, die von der direkten Interaktion und Kollaboration zwischen Mensch und Maschine profitieren, wie z.B. kooperatives Heben und Tragen. Die Aufgabe in diesem Szenario ist entweder zu gleichen Teilen auf den Roboter und den Menschen verteilt (z.B. das Tragen eines schweren Werkstücks) oder nach den Fähigkeiten der Teilnehmer aufgeteilt (z.B. präzise Positionierung eines Roboters und Geschicklichkeit eines Menschen). Die Autonomie des Roboters kann von unterstützend (d.h. der Roboter ist nicht elementar für die Aufgabe) bis hochgradig kooperativ (d.h. eine gemeinsame Kontrolle über die Aufgabe) reichen. Aufgrund der intensiven Mensch-Roboter-Interaktion sind das gegenseitige Verständnis des gemeinsamen Ziels und das Vertrauen des menschlichen Teilnehmers entscheidend. Ein Beispiel für eine solche Strategie kann eine kollaborative Befestigung sein, wenn ein Roboter Holzelemente präzise an einer Fassade positioniert und ein menschlicher Arbeiter sie dann mit einer Nagelpistole befestigt.

AP 3: Systematisierung Anwendungsfelder und Auswertung

AP 3.1: Systematisierung der möglichen Vorfertigungsprozesse / Technologiekombinationen

Die im AP 2.1 vorgestellten Einsatzmöglichkeiten von MRK im Holzbau und die in AP 2.2 beschriebenen verwandten Arten der Automatisierungstechnik betrachteten meist nur einzelne Aufgaben oder Aufgabenkombinationen und deren technische Lösungen. Kombinationen aus den zuvor genannten Verfahren und technologischen Prinzipien sind jedoch nicht nur möglich, sondern können die Flexibilität der Fertigung weiter erhöhen. Um das Potenzial der MRK zu zeigen, ist es daher notwendig, die vielversprechendsten Kombinationen zu identifizieren und in größere Fertigungsstrategien einzubeziehen. Während der Kontext dieser Forschung rein auf die Fertigung bezogen ist, ist es auch entscheidend, sie mit anderen Forschungsthemen zu verbinden.

Im Folgenden werden zwei wesentliche technologische Kombinationen identifiziert, die anschließend im AP 4 prototypisch umgesetzt werden.

Der erste Ansatz basiert weitgehend auf der zuvor beschriebenen Strategie der "gelegentlichen Koordination". Die Interaktion zwischen Mensch und Roboter ist selten, wobei der Schwerpunkt auf der Übergabe von Material und Halbfabrikaten liegt. Da pHRI nicht erforderlich ist, ist es möglich, Standardindustrieroboter mit höherer Nutzlast einzusetzen. Ziel dieses Ansatzes ist es, den LoA des Fertigungsaufbaus zu erhöhen und gleichzeitig die Flexibilität des Materialflusses zu erhalten. In diesem Ansatz basiert die Zusammenarbeit auf dem Prinzip des Workspace-Sharing-Systems (Krüger, Lien & Verl, 2009), bei dem ein geschützter Kollaborationsraum innerhalb des Workspace des Roboters für eine Materialübergabe definiert wird. Die Zusammenarbeit kann nur am Anfang und am Ende des Produktionszyklus des jeweiligen Arbeitsplatzes erfolgen. Typischerweise gibt es vier verschiedene mögliche Situationen, die auftreten können (Abb. 11):

1. Der menschliche Arbeiter befindet sich nicht im von Bedienerschutz gesicherten Bereichen. Die Produktion läuft auf Hochtouren.
2. Der menschliche Arbeiter betritt den Kollaborationsraum, aber der Roboter ist außerhalb. Die Produktion wird mit einer reduzierten Geschwindigkeit basierend auf der Risikobewertung fortgesetzt.
3. Der menschliche Arbeiter betritt den Kollaborationsraum, während sich der Roboter darin befindet. Der Roboter wird gestoppt und die Bremsen werden betätigt. Der Prozess muss vom Bediener neu gestartet werden (STOP 0 oder STOP 1).
4. Der menschliche Arbeiter befindet sich im Kollaborationsraum, während der Roboter eintritt. Der Roboter wird an der Grenze des geschützten Raumes angehalten und ein sicherer Betriebsstopp durchgeführt (STOP 2). Der Roboter setzt den Betrieb fort, sobald der menschliche Arbeiter den geschützten Raum wieder verlassen hat.

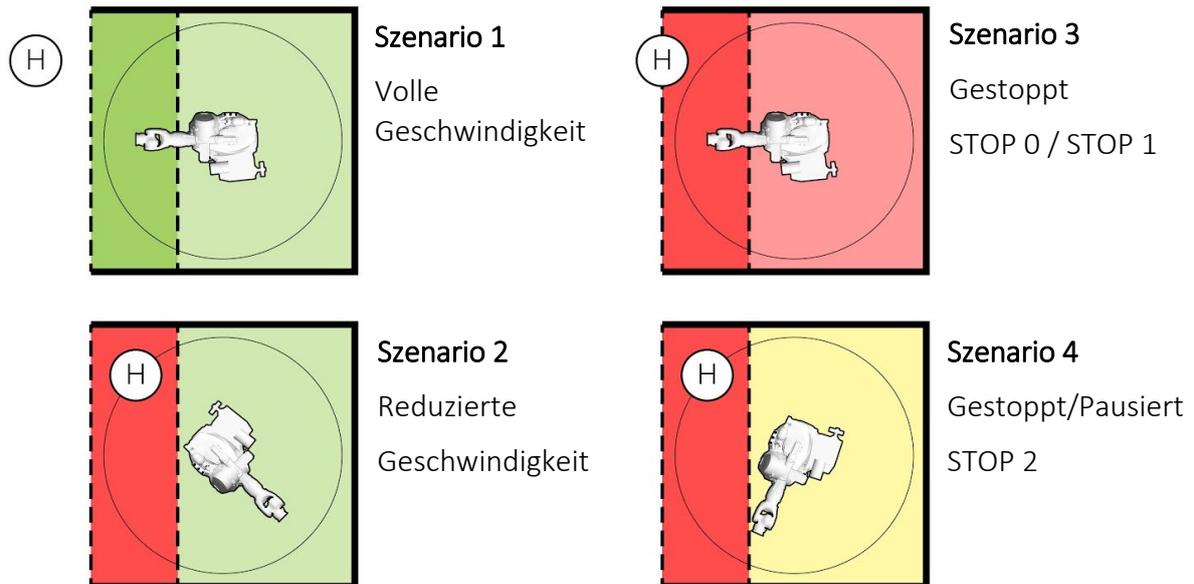


Abb. 11: Kooperative Sicherheitszenarien

Die oben genannten sicherheitstechnischen Lösungen folgen der in der AP 1.2 beschriebenen Strategie der sicherheitsüberwachten Stopp-, Geschwindigkeits- und Trennungsüberwachung, bei der die Position des menschlichen Arbeiters durch einen ausfallsicheren externen Sensor überwacht wird.

Der zweite vorgeschlagene Ansatz konzentriert sich auf die agile Fertigung und die "direkte Kollaboration" zwischen Mensch und Roboter, wie im AP 2.2 erläutert. Sie schlägt eine Lösung speziell für Kleinstunternehmen vor, die sich an die Mehrheit der deutschen Holzbau- und Zimmereiunternehmen mit weniger als 10 Beschäftigten richtet, die 80% des Marktes ausmachen (Holzbau Deutschland, 2018). Dennoch gibt es einige spezielle Herausforderungen, die für KMU und Kleinstunternehmen typisch sind:

- Sie muss sich ohne aufwändige Programmierung schnell an verschiedene Projekte anpassen können.
- Es muss für verschiedene Aufgaben einfach wiederverwendet werden können.
- Es muss auch in halb- und unstrukturierter Umgebung robust arbeiten.
- Es muss ausreichend leicht und mobil sein.

Solche Robotersysteme sind nicht neu und es gibt Beispiele in der Forschung und in der Industrie für deren zunehmende Popularität wie die oben genannten rob@work oder CoSTAR und ähnliche einfachere Systeme wie das Konzept des "Robot Farming" von Mercedes-Benz (Gibbs, 2016). Der Fokus dieses Ansatzes liegt jedoch nicht auf dem Roboter selbst, sondern auf einer nahtlosen Integration in den Holzbau-Workflow, bei dem ein Roboterarm ein entscheidender, aber nicht der einzige Schwerpunkt ist. Ziel ist es, ein universelles Werkstattassistenzsystem zu schaffen, das die einfach zu bedienende CAx (Computer-aided technologies)-Datenübertragung mit intuitiver Fertigung und Überwachung integriert.

Da die Komplexität dieses Systems ziemlich hoch ist, ist es auch notwendig, eine neuartige Art von HRIs zu entwickeln, die nicht-intrusive Technologien wie AR und Wearables verwenden (Abb. 12).

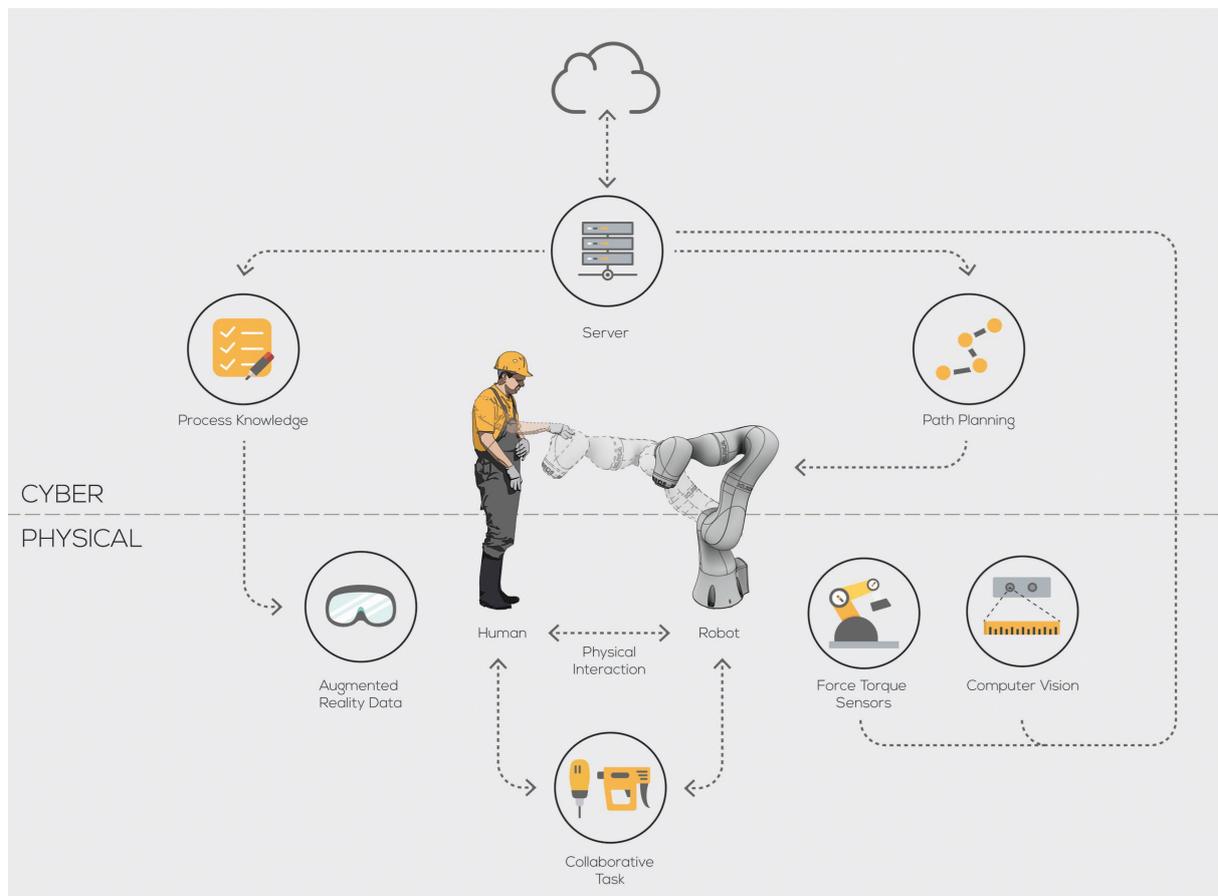


Abb. 12: von HRIs zu entwickeln, die nicht-intrusive Technologien wie AR und Wearables verwenden

AP 3.2: Aufarbeitung und Evaluierung

In diesem Kapitel werden die zuvor definierten Mensch-Roboter-Kooperationsstrategien der Gelegentlichen Koordination, Aufgabenübertragung und direkten Zusammenarbeit bewertet. Die Strategien werden im Hinblick auf zwei die übergeordnete Themen "Automatisierung vs. Flexibilität" und "Innovationspotenzial" bewertet.

Level of Automation (LoA) und Flexibilität

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, ist die Festlegung eines angemessenen Automatisierungsgrades ein kritischer Bestandteil eines gut funktionierenden, wirtschaftlich sinnvollen Systems. Gleichzeitig ist eine zunehmende Automatisierung oft direkt proportional zu einer steigenden Systemkomplexität, die wiederum die Flexibilität verringert und das System anfällig für Störungen macht (Gorlach & Wessel, 2008).

Eine hochautomatisierte Fertigung führt daher oft zu einem unflexiblen Einzweckproduktionssystem. Mit anderen Worten, um die Flexibilität des Produktionssystems zu erhöhen, muss man entweder seinen Automatisierungsgrad senken und menschliche Arbeiter mehr tun lassen oder seine Komplexität erhöhen, um den verschiedenen Möglichkeiten gerecht zu werden. Darüber hinaus kann selbst ein hochkomplexes Produktionssystem in der Regel nur eine Reihe von vordefinierten Möglichkeiten bewältigen,

nicht aber eine unerwartete oder bisher unbekannte Situation. Für den Zweck dieser Forschung werden wir die Flexibilität als umgekehrt proportional zu dem LoA betrachten.

Das Interesse an der Beziehung zwischen Automatisierung und manueller Arbeit besteht seit geraumer Zeit in vielen Forschungsbereichen von der Luftfahrt bis zur Telerobotik. Im Laufe der Jahre wurden viele Taxonomien entwickelt, um den LoA und die Aufgabenverteilung zu klassifizieren. Eine bemerkenswerte Taxonomie wurde von Sheridan und Verplanck (SV) vorgeschlagen, die eine zehnstufige Skala von manueller Arbeit bis zur Vollautomatisierung (Sheridan & Verplank, 1978) einführen. Die Taxonomie konzentriert sich auf die Entscheidungsfindung und deren Umsetzung. Diese Taxonomie wurde von Parasurman, Sheridan und Wickens (Parasurman, Sheridan & Wickens, 2000) weiter ausgebaut, um die verschiedenen Phasen im Mensch-Maschine-System zu berücksichtigen. Die vorgeschlagene Erweiterung klassifiziert die Automatisierung in vier vereinfachte Kategorien der menschlichen Informationsverarbeitung: Erfassung, Analyse, Entscheidung und Aktion.

Frohm et al. (Frohm, Lindström, Stahre & Winroth, 2008) argumentieren jedoch, dass sich die SV-Taxonomie und ihre Erweiterung hauptsächlich auf die kognitiven Aufgaben konzentriert und gleichzeitig die physischen Aufgaben, die für die Herstellung wichtig sind, beiseite lässt. Frohm et al. schlagen daher vor, die Taxonomie in zwei separate siebenstufige Referenzskalen aufzuteilen. Die erste Skala klassifiziert die Automatisierung physikalischer Aufgaben (Mechanisierung), während die zweite Skala sich auf die Automatisierung von Steuerung und Informationsverarbeitung (Computerisierung) konzentriert. Die Autoren argumentieren ferner, dass der LoA in der Regel kein absoluter statischer Wert ist, sondern ein Bereich, der durch die Grenzen der Automatisierung im Einzelfall definiert ist.

Obwohl nützlich für die Klassifizierung von LoA in der allgemeinen Fertigung, ist die von Frohm et al. vorgeschlagene Taxonomie für den Zweck dieses Projekts zu grob. Unter Beibehaltung der Zwei-Skalen-Abteilung schlagen wir vor, die ursprüngliche zehnstufige SV-Taxonomie für kognitive Aufgaben und eine neue fünfstufige HRC-zentrische Skala für körperliche Aufgaben zu verwenden. Die LoA-Skalen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Auswertung des LoA für jede der Kollaborationsstrategien ist in Tabelle 2 am Ende dieses Abschnitts zusammengefasst. Die Begründung der Bewertung wird im folgenden Abschnitt ausführlich beschrieben.

LoA: Gelegentliche Koordination

Im Falle einer gelegentlichen Koordination ist es vorteilhaft, eine höhere physikalische Automatisierung mit einer niedrigen bis mittleren kognitiven Automatisierung zu realisieren. Die Roboterkonfigurationen sollen schnell einsatzbereit und einfach zu warten sein, ohne dass eine erhebliche Softwareentwicklung und Investition erforderlich ist. Diese Strategie zielt darauf ab, die Wirkung von HRC in den aktuellen Arbeitsabläufen der Holzvorfertigung zu maximieren, die hauptsächlich größere und schwerere Werkstücke umfassen und daher stärkere und größere Roboterarme erfordern. Aufgrund der höheren Gesundheits- und Sicherheitsrisiken sollte der Arbeitsablauf einfach bleiben und der menschliche Bediener sollte für die wichtigen Entscheidungen und die Maßnahmenplanung verantwortlich bleiben. Auf der anderen Seite sollte der physikalische Prozess angepasst und hoch automatisiert werden und der menschliche Eingriff auf komplizierte Teile des Prozesses beschränkt werden.

Physisch		Kognitiv	
1	Vollständig manuell Der Mensch macht alles mit statischen Werkzeugen und Maschinen.	1	Der Mensch erledigt die ganze Arbeit.
		2	Computer hilft, indem er eine Reihe von Aktionen bestimmt und sie dem Menschen präsentiert, der Mensch wählt und startet eine von ihnen.
2	Roboterassistent Der Mensch übernimmt die kritischen Fertigungsaufgaben, der Roboter unterstützt die Optimierung der menschlichen Leistung.	3	Computer hilft, Optionen zu bestimmen und schlägt eine vor, der Mensch kann eine andere auswählen und starten.
		4	Der Computer wählt eine Aktion aus und der Mensch kann sie starten oder nicht.
3	Zusammenarbeit Mensch und Roboter konzentrieren sich beide auf die ihren Fähigkeiten am besten entsprechenden Aufgaben, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen, ein Rollenwechsel ist jedoch theoretisch möglich.	5	Der Computer wählt eine Aktion aus und startet sie, wenn der Mensch sie genehmigt.
		6	Computer wählt eine Aktion aus und gibt dem Menschen eine Frist für das Veto.
4	Humanassistent Der Roboter führt die kritischen Fertigungsaufgaben aus, der Mensch nur schwer zu automatisierende Aufgaben.	7	Der Computer erledigt die ganze Arbeit und sagt dem Menschen dann zwangsläufig, was er getan hat.
		8	Computer erledigt die ganze Arbeit und sagt dann dem Menschen, was er getan hat, nur wenn der Mensch ausdrücklich darum bittet.
5	Vollständige Automatisierung Der Roboter macht alles selbstständig, der Mensch verrichtet keine körperliche Arbeit.	9	Computer erledigt die ganze Arbeit und sagt dann dem Menschen, was er getan hat, nur wenn der Computer entscheidet, dass es notwendig ist.
		10	Der Computer erledigt die ganze Arbeit, wenn er entscheidet, dass er erledigt werden sollte, und wenn ja, sagt er dem Menschen, wenn er entscheidet, dass er informiert werden soll.

Tabelle 1: LoA-Skalen

LoA: Aufgabenübertragung

Die Strategie der Aufgabenverteilung zielt darauf ab, die Produktivität eines menschlichen Arbeiters zu vervielfachen. Die physische Automatisierung des Systems sollte mittel bis hoch sein, mit einem mittleren Grad an kognitiver Automatisierung. Die leichten kollaborativen Roboterarme mit geringer Nutzlast, die in dieser Strategie verwendet werden, ermöglichen jedoch auch eine sichere physische Interaktion. Der menschliche Bediener kann somit bei Bedarf sicher mit der normalerweise automatisierten Robotereinheit zusammenarbeiten. Der menschliche Bediener sollte klar definierte, einfache, übergeordnete Aufgaben entscheiden

und delegieren (z.B. Fassadenelemente mit Schrauben in einem bestimmten Muster befestigen), aber gleichzeitig ist es sinnvoll, dem Roboter zu ermöglichen, einfache Teilaufgaben selbstständig zu planen und auszuführen (z.B. wo und wie viele Schrauben er verwenden soll). Sie sollte jedoch im Falle einer autonomen Entscheidung immer dem menschlichen Betreiber Bericht erstatten. Ein menschlicher Bediener sollte die volle Kontrolle über das Gesamtziel behalten und gleichzeitig die Ausführung einfacher Teilaufgaben, die der Roboter entscheiden und ausführen kann, dem System überlassen.

LoA: Direkte Zusammenarbeit

Die direkte Zusammenarbeit hat das Ziel, die Arbeit eines einzelnen Mitarbeiters mit einem vielseitigen Roboterassistenten zu ergänzen. Es konzentriert sich auf eine direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter mit häufiger körperlicher Interaktion und der gemeinsamen Nutzung von Arbeitsbereich und Werkstück. Der intensive kollaborative Charakter der Arbeit funktioniert daher am besten zwischen den beiden Extremen der vollständig manuellen und der Vollautomatisierung. Das System sollte auch aus kognitiver Sicht eine Unterstützung bieten, indem es aktiv Lösungen vorschlägt und einfache autonome Entscheidungen trifft, die helfen, ein allgemeines Arbeitsziel zu erreichen. Letztendlich sollte es versuchen, die Absicht eines menschlichen Arbeiters zu erraten und ohne explizite Anweisung zu handeln, um einen reibungslosen Arbeitsablauf zu schaffen.

Strategie	Physisch	Kognitiv
Gelegentliche Koordination	4-5	1-4
Aufgabenübertragung	3-5	2-7
Direkte Zusammenarbeit	2-4	4-8

Tabelle 2: Auswertung des LoA

Innovationspotenzial

Eine technologische Innovation ist per Definition die Anwendung neuartiger technologischer Methoden bei der Herstellung oder Entwicklung neuartiger technologischer Produkte. Innovation wird von vielen als wesentlich für ein Wirtschaftswachstum angesehen, seit sie von Joseph Schumpeter Anfang des 20. Jahrhunderts eingeführt wurde (Schumpeter & Opie, 1934). Die Messung von technologischer Innovation und Innovationspotenzial ist jedoch schwierig und es gibt keine einheitlichen, allgemein anerkannten Richtlinien. Für die Zwecke dieser Studie werden wir uns lose an den von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung im Osloer Handbuch (OECD, 2000) festgelegten Rahmen halten, der weitgehend von der Sichtweise Schumpeters auf Innovation beeinflusst wird. Zuerst werden wir kurz die verschiedenen Arten von Innovationen beschreiben. Dann werden wir die Schwächen und Stärken der vorgestellten technologischen HRC-Innovationen, die in AP2 eingeführt wurden, mit Empfehlungen zu ihrer Verwendung aufzeigen.

Nach Schumpeters Theorie, die von der OECD übernommen wurde, innovieren Unternehmen, um sich einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen und Gewinn zu erzielen. Unternehmen, die innovativ sein wollen, haben zwei allgemeine Methoden, wie sie eine Innovation umsetzen können. Die erste Methode ist eine *Produktinnovation*, die es einem Unternehmen ermöglicht, den Gewinn zu steigern, indem es mit einem technologisch neuen oder verbesserten Produkt eine Monopolstellung einnimmt. Die zweite Methode ist eine *Prozessinnovation*, die die

Produktivität erhöht und somit die Herstellungskosten pro Stück senkt, oder die notwendig ist, um ein innovatives Produkt herzustellen.

Alle in diesem Projekt vorgestellten HRC-Technologiekombinationen würden in die Kategorie der Prozessinnovation fallen. Das ermöglicht nicht nur eine Steigerung der Produktivität, sondern erhöht auch das Innovationspotenzial des Unternehmens, das diese Technologie einsetzt. Wie in den in AP4 beschriebenen Experimenten zu sehen ist, kann es somit auch zur Umsetzung innovativer Produkte und damit zur weiteren Stärkung der Marktposition führen.

Im Folgenden werden die Chancen und Risiken der in Kapitel vier beschriebenen technologischen Innovationen des HRC beschrieben.

Potenzial: Gelegentliche Koordination

Die Gelegentliche Koordinierungsstrategie ist eine Prozessinnovation, die das Potenzial hat, die Effizienz bestehender Prozesse zu verbessern und sie gleichzeitig im Allgemeinen weitgehend intakt zu halten. Durch die Einführung eines relativ einfach zu implementierenden HRC-Roboterhandling für bestehende Maschinen können Qualität, Produktivität und Arbeitskomfort deutlich verbessert werden. Ein weiterer Vorteil dieser Innovation ist die relative Reife der beteiligten Basistechnologien, die einen schnelleren Einsatz der Technologie ermöglicht.

Andererseits wird eine solche Strategie selten zu einer eigenständigen Produktinnovation führen. So ist beispielsweise die im AP4 beschriebene innovative Holzkassettschale nicht direkt mit der HRC-Technologie selbst verbunden, sondern mit zusätzlichen, separat entwickelten technologischen Innovationen. Darüber hinaus verringert diese Strategie die Flexibilität des Prozesses und erfordert einen eigenen statischen Arbeitsbereich.

Wir sind der Ansicht, dass diese Strategie daher vor allem zur Verbesserung der Produktqualität, zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen oder zur Verkürzung des Produktionszyklus eingesetzt werden sollte.

Potenzial: Aufgabenteilung

Die Strategie der Aufgabenteilung als Prozessinnovation hat ein großes Potenzial, die Produktivität und Flexibilität eines einzelnen menschlichen Mitarbeiters zu steigern. Die Flexibilität und Konzentration auf die hierarchische Struktur der Mensch-Roboter-Beziehung kann zu weiteren Prozessinnovationen führen, die die Vorteile der Roboterfertigung wie Präzision oder Ausdauer nutzen.

Der Hauptnachteil dieses Ansatzes liegt jedoch in einem der Hauptvorteile: der Flexibilität. Bei der Konstruktion müssen die Robotereinheiten kleiner und leichter bleiben, um sie flexibel und einfach einzusetzen. Kleinere Roboteranlagen haben jedoch eine geringere Nutzlast und Reichweite und das Handling größerer und schwererer Werkstücke, wie sie im Holzbau üblich sind, ist daher problematisch. Eine Strategie, um dieses Hindernis zu überwinden, ist die Verwendung einer Roboter-Roboter-Kooperationsstrategie, z.B. eine Lastverteilung zwischen vielen Robotern als Team.

Wir empfehlen, die Strategie der Aufgabenteilung hauptsächlich zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen und der Produktionsflexibilität im Vergleich zur Standardautomatisierung oder gelegentliche Koordination zu nutzen.

Potenzial: Direkte Zusammenarbeit

Die Strategie der direkten Zusammenarbeit ist eine Prozessinnovation, die sich auf eine flexible Erweiterung eines einzelnen menschlichen Mitarbeiters konzentriert. Die beabsichtigte Flexibilität ist auch für kleine Unternehmen oder Einzelpersonen geeignet. In diesem Szenario

erhält ein Arbeiter einen intelligenten Roboterassistenten, der das Potenzial hat, die Qualität eines Produkts und den Produktionszyklus zu verbessern. Obwohl es nicht standardmäßig zur Entwicklung innovativer Produkte führt, erhöht es das Innovationspotenzial durch die Einführung einer flexiblen und intuitiven Roboterfertigung erheblich.

Die größte Schwäche dieser Strategie liegt in der Menge an neuartigen Basistechnologien, die benötigt werden, um ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Obwohl es möglich ist, diese Strategie schrittweise in mehreren Schritten umzusetzen, ist eine echte direkte Zusammenarbeit nach wie vor Gegenstand aktiver Forschung in Robotik und Mechatronik. Diese Strategie weist auch ähnliche Nachteile auf wie die bereits erwähnte Strategie der Aufgabendelegation in Bezug auf Größe und Nutzlast der verwendeten kollaborativen Roboter-Einheiten.

Unserer Ansicht nach ist diese Strategie jedoch am besten geeignet, um die Produktivität auch der kleinsten Unternehmen rundum zu verbessern. Obwohl es eine beträchtliche Investition erfordert, um deren volles Potenzial auszuschöpfen.

AP 3.3: Kurz-, mittel- und langfristige Implementierungsstrategien

In diesem Kapitel werden wir für jedes der zuvor beschriebenen HRC-Szenarien eine mögliche Implementierungsstrategie vorschlagen. Die Umsetzungsstrategie jedes Szenarios wird nach dem Zeitaufwand aufgeschlüsselt, der für die Umsetzung in drei Zeiträume erforderlich ist: kurz-, mittel- und langfristig.

Der kurzfristige Zeitraum liegt in der Regel zwischen 3-6 Monaten und konzentriert sich auf die sofortige Verbesserung der Fähigkeiten und Ausrüstung, ohne die bereits verwendeten Prozesse wesentlich zu verändern.

Der mittelfristige Zeitraum dauert bis zu 2 Jahre und konzentriert sich auf die Aktualisierung von Richtlinien und Prozessen, um die neue Technologie vollständig zu integrieren.

Der langfristige Zeitraum beträgt etwa 5 Jahre und beinhaltet wesentliche Änderungen im Produktionsablauf.

Gelegentliche Koordination

Kurzfristig - Prozessverbesserung und -nachrüstung

Automatisierung von relativ einfach zu automatisierenden gefährlichen oder unangenehmen Prozessen. Typisches Beispiel ist die Wartung von CNC-Maschinen oder die automatische Montage von tragenden Elementen mit Befestigung durch den Menschen. Der Fokus liegt auf der Erweiterung und Verbesserung bereits vorhandener Maschinen und Arbeitsplätze, anstatt neue zu schaffen.

Mittelfristig - Arbeitsplatzfertigung

Wechsel hin zur arbeitsplatzbezogenen Produktion mit Material- und Halbzeugfluss. Sowohl die Montage als auch die Bearbeitung erfolgen automatisiert in eigenständigen Arbeitsstationen, die sich leicht miteinander kombinieren lassen, um die gewünschte Fertigungsflexibilität zu erreichen. Jede Station verfügt über einen vordefinierten Kollaborationsraum für die Übergabe von Rohmaterial und Halbfertigprodukten. Der Transfer von Rohstoffen und Halbfabrikaten zwischen den Stationen erfolgt durch menschliche Mitarbeiter, die sich leicht an veränderte Arbeitsabläufe anpassen können.

Langfristig - Workflow-Integration

Hinzufügen einer passiven Intelligenz zu Rohstoffen und Halbfertigprodukten. Das Hinzufügen von maschinenlesbaren und verfolgbaren Markierung ermöglicht es, den Fertigungsablauf in der gesamten Produktionskette zu verbessern. Die Tags speichern entweder Metadaten, die einen vollständigen Befehlssatz für die Montage und Bearbeitung eines Betonbauteils zu einer größeren Baugruppe bereitstellen, oder sie speichern eine eindeutige Kennung für jedes Teil und die erforderlichen Daten können aus einer zentralen Datenbank abgerufen werden. Ein solches System vereinfacht die Identifizierung und die gemeinsame Nutzung von Bauplänen, da es den Maschinen ermöglicht, Produktionsdaten selbstständig abzurufen und so Zeit für den menschlichen Bediener zu sparen.

Aufgabenübertragung

Kurzfristig - Isolierte Prozessautomatisierung

Automatisierung von isolierten, einfach zu wiederholenden Prozessen. Implementierung der Programmierung durch Demonstration, die eine Anwendungsbereitstellung beschleunigt und gleichzeitig keine umfangreichen Kenntnisse der Roboterprogrammierung erfordert. Der Prozess, den die Robotereinheit durchführen muss, wird daher von einem menschlichen Bediener in seiner Gesamtheit demonstriert, und die Robotereinheit wiederholt anschließend einfach die demonstrierten Bewegungen. In einer typischen Anwendung ist ein menschlicher Bediener in der Lage, einfache Aufgaben an mehrere Robotereinheiten zu delegieren. Jeder Roboter führt dann die Aufgabe vollständig selbst aus und erstattet dem Bediener Bericht, sobald die Aufgabe abgeschlossen ist.

Mittelfristig - Autonome Teilprozessausführung

Erhöhung der kognitiven Autonomie der Roboterflotte. Die Programmierung des Roboters wechselt von der Vollprogrammierung durch Demonstration bis hin zu übergeordneten Fertigungszielen, die durch notwendige atomare Prozesse definiert sind. Ein menschlicher Bediener delegiert daher übergeordnete Befehle an die Roboterflotte, ohne jeden Fertigungsschritt im Detail zu spezifizieren. Um die delegierten Fertigungsziele zu erreichen, wählt der Roboter aus einer Datenbank mit Lösungsansätzen selbstständig eine geeignete Implementierung der erforderlichen atomaren Prozesse aus. Im Falle eines Prozesses, der für einen Roboter schwer durchführbar ist, oder im Falle einer Unklarheit wird ein menschlicher Vorgesetzter zur Hilfe gerufen.

Langfristig - Datenintegration

Verbesserung der Kommunikation zwischen dem menschlichen Bediener und der Roboterflotte sowie Anpassung der Prozesse zur Verbesserung der Leistung der Roboter. Eine Entwicklung neuartiger Mensch-Roboter-Schnittstellen wie Augmented Reality oder Wearables. Die Fertigungsschritte und Produktionsabläufe werden so angepasst, dass sie die Roboterfertigung unterstützen und die notwendigen menschlichen Eingriffe minimieren.

Direkte Zusammenarbeit

Kurzfristig - Prozessablauf

Die Umsetzung dieser Strategie konzentriert sich von Anfang an auf die Mensch-Roboter-Schnittstelle. Das Robotersystem ist in die Produktion integriert und beeinflusst dort direkt die Prozesse. Prozesse, die eine präzise Positionierung kleinerer Elemente oder eine präzise Markierung erfordern, eignen sich am besten für die Umsetzung dieser Strategie in der Frühphase. Der Roboter kann den menschlichen Arbeiter sowohl in Bezug auf die Arbeitsgeschwindigkeit als auch auf die tatsächliche Präzision leicht übertreffen. Ein einfacher Echtzeit-Fertigungsablauf mit ARHMD- und CAD-Software ermöglicht die nahtlose Übertragung

der digitalen Pläne in Roboterbewegungen, die zur Erreichung des vorgegebenen Ziels erforderlich sind. Anschließend wird der Roboter in Echtzeit über eine Augmented-Reality-Schnittstelle gesteuert.

Mittelfristig - Roboterassistentin

Anpassung eines physischen Layouts des Arbeitsbereichs, um die Fähigkeiten des Robotersystems zu verbessern. Um die Orientierung des Robotersystems zu verbessern und die Umwelterkennung zu erleichtern, sind Werkzeuge und Materialien gut organisiert und in Reichweite des Armes. Hinzufügen von maschinenlesbaren Tags und Markierungen, um die Erkennung von Werkzeugen und Material weiter zu erleichtern. Das System verwendet andere sensorische Daten wie 2D- und 3D-Vision. Die Fähigkeiten des Robotersystems werden durch zusätzliche Unterstützungsaufgaben wie Werkzeug- und Materialmanagement (z.B. Abholen der richtigen Werkzeuge) erweitert. Das Robotersystem beginnt auf einfache soziale Hinweise wie die gemeinsame Aufmerksamkeit zu reagieren.

Langfristige - kognitive Zusammenarbeit

Verbesserung der kognitiven Seite der Zusammenarbeit. Das Robotersystem schlägt die Implementierung von Verfahren und Prozessen vor und entscheidet in einfachen Fällen selbstständig (z.B. welche schneller zu nutzen sind). Erkennen einfacher menschlicher Absichten (z.B. Objektübergabeanforderung) und Handeln darauf (z.B. ein Objekt in eine offene Handfläche legen). Die für das Erreichen dieses Stadiums erforderliche Entwicklung befindet sich noch in der fortgeschrittenen wissenschaftlichen Entwicklung, und es ist schwer abzuschätzen, wie schnell die Robotik-Entwicklung das erforderliche Niveau erreichen kann.

AP 4: Beispielhaftes Prototyping, Testung und Evaluierung

Die beiden in AP 3.1 erwähnten allgemeinen Strategien wurden in AP 4 prototypisch umgesetzt. Den Kontext für die Umsetzung lieferten zwei Realisierungsprojekte (Experimente) mit unterschiedlichen Fertigungsszenarien anhand derer die Strategien implementiert, getestet und evaluiert werden konnten.

Zielstellungen, die im Rahmen der beiden Experimente verfolgt wurden, sind (1) die Entwicklung einer digitalen Schleife für eine vollständig automatisierte Fertigung mittels MRK (AP 4.1), (2) die Untersuchung der Anwendbarkeit von MRK für die Industrie durch Prototyping (AP 4.2), sowie (3) die Testung kompletter Produktionsprozesse und der Bau von Demonstratoren durch MRK als Demonstration des Innovationsgehalts (AP 4.3). Dieses Kapitel ist daher nach Experimenten gegliedert.

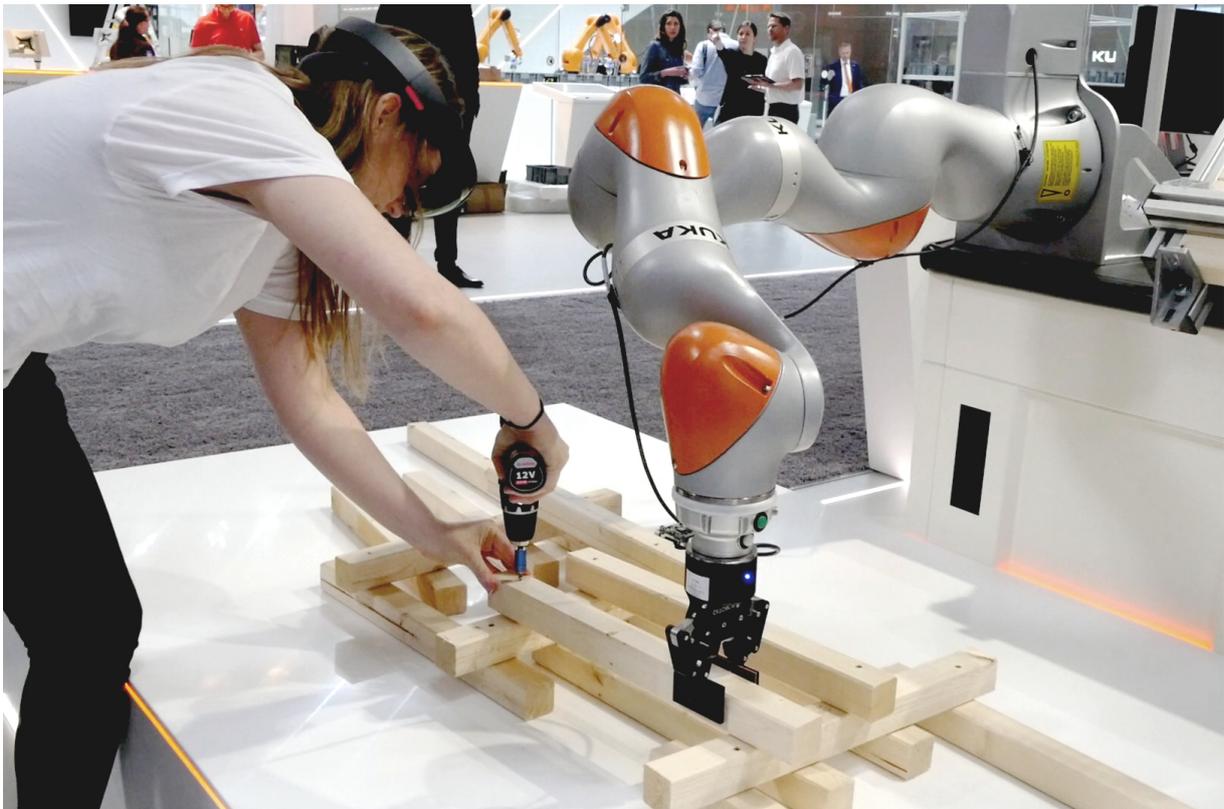


Abb. 13: Collaborative Robotic Workbench

EXPERIMENT 1 - Collaborative Robotic Workbench

In diesem Experiment wurde eine in AP3.1 beschriebene Fertigungsstrategie mit einem kleineren kollaborativen Roboterarm als universellem Holzwerkstattassistenten untersucht.

Im Hinblick auf die oben genannten Zielstellungen war das das Ziel dieses Experiments, die folgenden MRK-Features zu entwickeln und zu testen:

- Intuitive Kommunikationsschnittstelle: Einfach zu bedienende Benutzeroberfläche, die die Verwendung fortschrittlicher Roboterfertigung ohne komplexe Programmierung für Benutzer mit begrenzten Programmierkenntnissen ermöglicht.
- Physische Mensch-Roboter-Interaktion: Nutzung einer Zusammenarbeit durch einen direkten, sicheren Körperkontakt mit dem Roboter.

- Integration in die Produktionskette: Das Robotersystem ist integraler Bestandteil eines breiteren Konstruktionssystems, das einen durchgängigen digitalen Workflow von der Planung über die Produktion bis zur Endmontage und eine kontinuierliche Überwachung des Prozesses ermöglicht.

Kontext

Um das Potenzial von Augmented-Reality-Schnittstellen für die Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau zu verdeutlichen, wurde ein kollaboratives Fertigungssystem entwickelt, das anschließend auf der Hannover Messe 2018 ausgestellt wurde. Die Herausforderung war, eine Holzkonstruktion aus 400 standardisierten 45x45x500mm Fichtenstreben herzustellen, die in einer komplexen räumlichen Anordnung angeordnet sind. Die Streben sollten mit handelsüblichen Holzschrauben verbunden werden. Das Szenario umfasste alle Phasen von der Planung über die Montage bis hin zur endgültigen Errichtung der Struktur und so wurde eine vollständige, aber dennoch vereinfachte Holzfertigungskette aufgebaut. Aufgrund des beschränkten Arbeitsraums des gewählten Roboterarms wurde die endgültige Struktur in 5 Unterbaugruppen unterteilt. Jede der Unterbaugruppen wurde einzeln als eigenständiges Stück kollaborativ montiert und später zu einer endgültigen Struktur zusammengefügt.

Kernstück des Prozesses ist die Montagephase, in der ein Roboterassistent die Holzstreben präzise platziert und ein menschlicher Arbeiter sie anschließend mit einem Elektroschrauber und Holzschrauben befestigt. Der Fokus des Experiments liegt daher auf der Augmented-Reality-Schnittstelle zwischen dem Roboterassistenten und dem menschlichen Bediener.

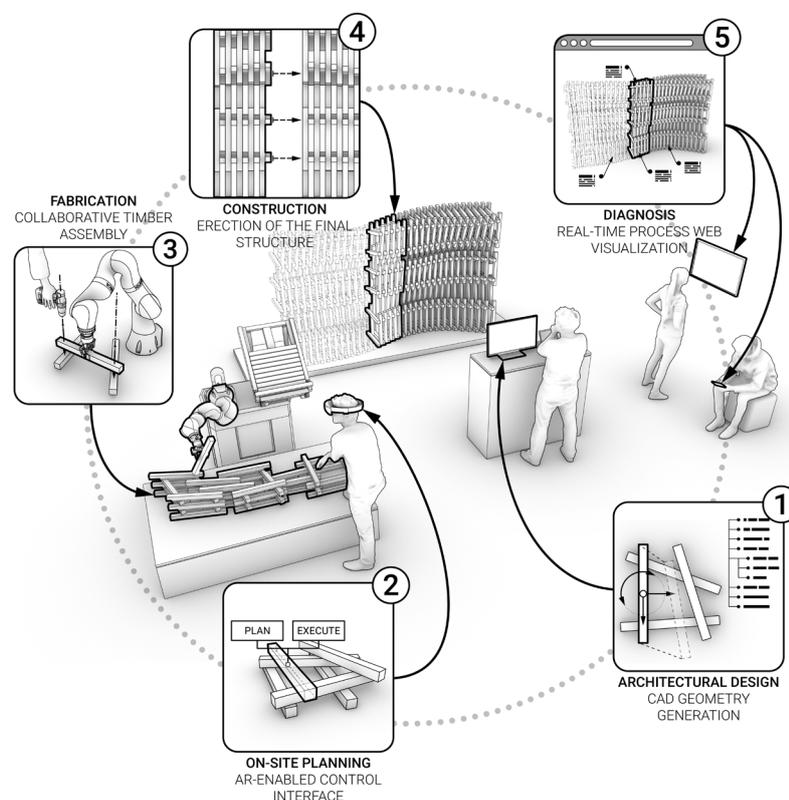


Abb. 14: Prozessübersicht

Methoden

Systemfunktionen

Um das Ziel der Gestaltung einer intuitiven Konstruktionsplattform zu erreichen, muss das System die folgenden vier Hauptfunktionen unterstützen:

1. *Planung*: Die erste Funktionsebene stellt eine Entwurfs- und Planungsoberfläche für den Bauprozess dar. Es ist verantwortlich für den anfänglichen architektonischen Entwurf sowie für eine Fertigungsstrategie und die Ziele der gesamten Systemfertigung auf globaler Ebene. Die Planungsebene ist nicht auf Echtzeitinformationen angewiesen, um die Entkopplung von Planungs- und Ausführungsphase zu ermöglichen (d.h. eine Offline-Vorplanung ist möglich). Es sollte jedoch in der Lage sein, die Pläne und Entwürfe bei Bedarf in Echtzeit anzupassen.
2. *Kontrolle*: Diese Funktionsebene ermöglicht eine direkte Kontrolle über das System in Echtzeit. Sie dient der Planung und Anpassung der nächsten Fertigungsschritte just-in-time. Sie steuert den richtigen Zeitpunkt der Fertigungsschritte und ermöglicht dem menschlichen Bediener die Interaktion mit dem Robotersystem. Sie ermöglicht die Planung der konkreten Fertigungsschritte, um die in der Planungsschicht definierten Ziele zu erreichen.
3. *Ausführung*: Diese Funktionsebene stellt die notwendige Funktionalität für den Betrieb des physikalischen Robotersystems zur Verfügung. Diese Schicht enthält das Robotersystem und andere physikalische Komponenten.
4. *Aufsicht*: Diese Funktionsebene dient als Feedback-Informationsschleife. Sie ist verantwortlich für die Präsentation und Verwaltung aller relevanten Prozessinformationen, die interessierten Teilnehmern zur Laufzeit zur Verfügung stehen. Die bereitgestellten Informationen sind sowohl in Echtzeit (z.B. aktuelle Roboterposition) als auch statisch (z.B. die Konstruktion).

Systemarchitektur

Die Systemarchitektur basiert auf dem bekannten Client-Server-Modell mit Publish-Subscribe-Nachrichtenmuster. Die vorgeschlagene Architektur basiert auf sechs spezifischen Systemkomponenten mit jeweils eigener Systemrolle. Mit Ausnahme des Mediators beinhaltet jede Komponente eine oder mehrere Funktionsebenen, die im vorherigen Kapitel vorgestellt wurden. Die Komponenten und Rollen sind:

1. *Mediator*: Die Architektur konzentriert sich auf eine zentrale Mediator-Komponente, die Informationen zwischen den verschiedenen Teilen des Systems vernetzt und vermittelt. Seine Aufgabe ist es, die Informationen zu serialisieren und in verschiedene Protokolle zu deserialisieren. Neben der Funktion als untergeordneter Kommunikationsanbieter ist er auch dafür verantwortlich, Befehle mit einer höheren Abstraktionsebene in untergeordnete zu zerlegen. Der Mediator ist daher dafür verantwortlich, die Fertigungsbefehle des menschlichen Bedieners in die tatsächlichen Weg- und Geschwindigkeitsbefehle zu übersetzen, die für ein angeschlossenes Robotersystem verständlich sind.
2. *Digital Twin*: Der Digital Twin ist dafür verantwortlich, sowohl die Echtzeit- als auch die statischen Informationen zu speichern und so eine Reihe von ständig aktualisierten virtuellen Darstellungen der physischen Objekte und Prozesse zu erstellen. Das

Ergebnis ist eine abstrahierte digitale Kopie der realen Welt, daher der Name Digital Twin (Lee et al. 2015). Die wichtigsten virtuellen Darstellungen sind:

- a. Das Robotersystem: Echtzeit-Dynamik und Kinematik des Roboterarms (Position, Geschwindigkeit und Drehmoment) sowie IO-Status.
 - b. Strukturelemente: Lage und Ausrichtung der Bauelemente (Holzstreben)
 - c. Umgebung: Relative Positionen und Orientierungen der physikalischen Elemente in der Szene, einschließlich der Basis des Roboterarms, der Position der ARHMD und der bereits gebauten Elemente auf dem Fertigungstisch.
 - d. Prozess: Abstrakte Prozessvariablen, die den gesamten Fertigungszustand beschreiben. Insbesondere, aber nicht ausschließlich, die Fertigstellung einer laufenden Baugruppe, die Fertigstellung der Endstruktur und der aktuelle Fertigungsschrittstatus.
3. *Designer*: Die Designerkomponente ist für die Gestaltung des ersten architektonischen Entwurfs verantwortlich. Sie definiert die Position und Ausrichtung der Bauelemente. Mehrere Designerkomponenten können gleichzeitig nebeneinander existieren.
 4. *Bediener*: Die Bedienkomponente ist verantwortlich für die Befehlsausgabe an das Robotersystem, die Planung der Fertigungssequenz und das Auslösen von Fertigungszuständen. Es ist wichtig, das Single Point of Control (SPOC)-Paradigma beizubehalten, in dem nur ein einziger menschlicher Bediener Befehle erteilen kann. Neben der Möglichkeit, das Robotersystem zu steuern, muss der Bediener auch relevante Informationen zur Gebäudetechnik darstellen und visualisieren.
 5. *Arbeiter*: Die Arbeitskomponente stellt den physischen Roboterarm und andere physische Vorrichtungen dar, die am Fertigungsprozess beteiligt sind. Es empfängt untergeordnete Befehle und sendet Systemzustände in Echtzeit zurück.
 6. *Beobachter*: Diese Komponente ist für die Visualisierung und Präsentation der Daten für interessierte Teilnehmer zuständig. Es schafft einen Simplex-Kommunikationskanal mit dem Mediator und fungiert somit nur als Empfänger (d.h. es kann keine Befehle erteilen oder das System in irgendeiner Weise beeinflussen). Das System muss in der Lage sein, eine große Anzahl von Vorgesetzten zu unterstützen.

Systemkomponenten

Robotersystem

Der Prototyp verlangte ein angemessenes Maß an Interaktion mit dem Roboterarm, daher war es notwendig, einen Arm zu wählen, der nicht nur eine sichere physische Interaktion auf niedrigerer Ebene ermöglicht (z.B. Stopps, wenn er dem menschlichen Arbeiter nahekommt), sondern auch eine messbare Krafrückmeldung liefert. Eine der gemeinsamen technologischen Lösungen, die bereits auf dem Markt sind, sind Roboterarme, die mit einem Kraft-Drehmomentsensor in den Robotergelenken ausgestattet sind, der es ermöglicht, die auf die Roboterarm-Werkzeugspitze oder den ganzen Körper aufgebrachte Kraft darzustellen (abhängig von der Anzahl und Position der Sensoren). Eine Krafrückführung nicht nur als binärer oder skalarer Ausgang, sondern als Vektor mit Länge ermöglicht es, nicht nur genauer zu reagieren, sondern auch eine bestimmte Kraft in eine bestimmte Richtung aufzubringen.

Ein Beispiel für ein Robotersystem mit einer solchen Funktionalität ist das für dieses Experiment verwendete KUKA LBR iiwa Robotersystem. Der KUKA LBR iiwa ist ein industrieller 7-DOF Roboterarm, der speziell für kollaborative Aufgaben entwickelt wurde und für den Einsatz in unmittelbarer Nähe zum Menschen zertifiziert ist (SGS-TÜV Saar GmbH 2016). Der

Arm ist mit zweikanaligen Kraft-Drehmomentsensoren in jedem Gelenk ausgestattet, die es ermöglichen, die externen Drehmomente sowohl im Gelenk als auch im kartesischen Koordinatenraum zu schätzen. Diese Funktion wird genutzt, um die Holzbalken vorübergehend zu sichern, bevor sie dauerhaft befestigt werden.

Der LBR iiwa Roboterarm wird über einen kompakten Schaltschrank mit der proprietären KUKA Sunrise.OS Systemsoftware angetrieben und gesteuert, die Bewegungsplanung, Sicherheit und Prozesssteuerungsfunktionalität kombiniert (KUKA AG 2019). Die On-Board-Sicherheitsvirtualsteuerung ARGUS bietet eine zweikanalige (zwei Instanzen auf separaten CPU-Kernen) Sicherheitsüberwachung von konfigurierbaren sicherheitsrelevanten Variablen wie maximal zulässige Geschwindigkeit oder Drehmoment und gibt bei Überschreitung ein Stoppsignal aus.

Die Programmierung des Roboters erfolgt über eine Java Application Programming Interface (API). Neben einer Bewegungsprogrammierung des Roboterarms im Gelenk- oder kartesischen Koordinatenraum durch eine Modifikation von kinematischen Variablen wie Soll-Position und Geschwindigkeit stellt die API auch Verfahren zur Beeinflussung der Dynamik durch überlagerte Kräfte und Momente zur Verfügung. Dies ermöglicht eine präzise Steuerung der Kraft, die der Manipulator auf seine Umgebung (z.B. Werkstück) ausüben kann.

Ein großer Vorteil der Standardprogrammiersprache Java im Vergleich zu anderen proprietären Robotersprachen wie KUKA Robot Language (KRL) oder ABB Rapid ist die Möglichkeit, auf andere verfügbare Java-Bibliotheken zu verweisen und diese zu nutzen und damit die möglichen Integrationsstrategien und den Einsatz des Manipulators zu erweitern.

Greifer

Um mit seiner Umgebung interagieren und diese manipulieren zu können, wurde der Arm mit einem Greifer-Endeffektor ausgestattet, der Objekte greifen kann. Im Vergleich zu

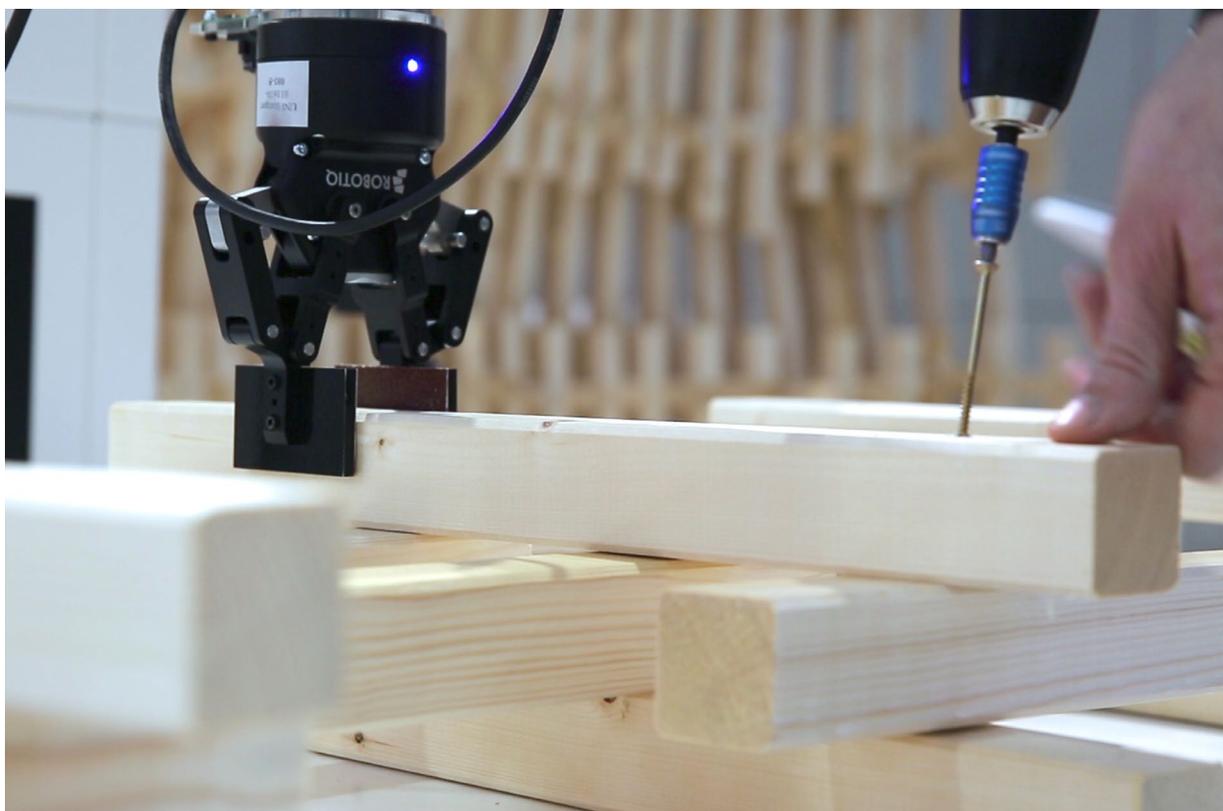


Abb. 15: Kollaborative Befestigung der Balken

herkömmlichen industriellen Parallelgreifer ist der 2-Finger-Greifer Robotiq in der Lage, die Zielposition, die Geschwindigkeit der Bewegung und die auf das erfasste Objekt ausgeübte Kraft zu variieren, wodurch eine zusätzliche Kontrolle über das Erfassungsverhalten entsteht. Der Greifer ist in der Lage, über das Echtzeit-Ethernet für Steuerungsautomatisierungstechnik (EtherCAT)-Feldbussystem mit der Roboteranwendung zu kommunizieren.

Microsoft HoloLens

Wie bereits beschrieben, bietet Augmented Reality eine der intuitivsten Mensch-Maschine-Schnittstellen, die nicht nur Informationen als Heads-Up-Display anzeigen kann, sondern auch 3D-Hologramme auf realen räumlichen Objekten überlagern kann. Der Einsatz von ARHMDs im Bauwesen hat jedoch zwei wesentliche Anforderungen: physikalische Systemanbindung und Lokalisierung.

Während es möglich wäre, ein vernetztes Headset für eine kleine Anwendung (z.B. lokale Werkbankmontage) zu verwenden, handelt es sich im Bauwesen in der Regel um ziemlich große Werkstücke, weshalb eine ungehinderte Bewegung der Arbeiter auf großer Fläche erforderlich ist. Großflächige Arbeitsbereiche stellen noch eine weitere Herausforderung dar, nämlich die Lokalisierung des Benutzers im Raum.

Microsoft HoloLens ist ein Augmented Reality Headmounted Display, das seit 2015 auf dem Markt erhältlich ist. Das Headset ist eigenständig und beinhaltet eine zentrale Verarbeitungseinheit (CPU), eine grafische Verarbeitungseinheit (GPU) und eine Microsoft-kundenspezifische Holographic Processing Unit (HPU). Das Frontvisier aus Glas ist getönt und beinhaltet ein Paar flache Lichtwellenleiter-Kombinierer. Das Gerät ist außerdem mit folgenden Sensoren ausgestattet: Tiefenkamera, vier Graustufen-Kameras, eine hochauflösende RGB-Kamera, eine Trägheitsmesseinheit (IMU), ein Umgebungslichtsensor und ein Vier-Mikrofon-Array (Zeller et al. 2018). Das Headset verwendet ein Microsoft Windows 10 Betriebssystem.

Das Gerät ist in der Lage, mit anderen Geräten über eine WLAN- und Bluetooth-Technologie zu kommunizieren, was es zu einem vollständig eigenständigen Gerät macht, das keine zusätzliche Kabelverbindung benötigt. Darüber hinaus ist es in der Lage, eine stabile Lokalisierung im Referenzkoordinatensystem durch Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) unter Verwendung der Umgebungskameras zusammen mit der IMU durchzuführen, was eine Hochfrequenz-Kopfpositionsbestimmung (Kress and Cummings 2017) ermöglicht.

Robot Operating System (ROS)

Robot Operating System ist ein Open-Source-Meta-Betriebssystem, das auf dem GNU/Linux-Betriebssystem läuft und Funktionen wie Low-Level-Kontrolle, Interprozesskommunikation oder Hardware-Abstraktion bietet (Dattalo 2018). Es bietet einen lose gekoppelten Satz von Softwarewerkzeugen und stellt die erforderliche Kommunikation untereinander sowie die Hierarchie und Topologie sicher. Die Kernfunktionalität der Peer-to-Peer-Kommunikation basiert auf einem Subscriber-Publisher-Pattern zur Unterstützung der Skalierbarkeit.

Jeder unabhängige Prozess, der die Berechnung durchführt, wird als Knoten bezeichnet und kommuniziert mit anderen Knoten über Nachrichten mit einer stark typisierten Datenstruktur. Jeder Knoten kann Nachrichten zu einem Thema veröffentlichen oder ein Thema abonnieren, um Nachrichten zu erhalten, die von einem anderen Knoten veröffentlicht werden. Die Themen basieren auf einem Many-to-Many-Datenmodell und sind daher nicht strikt an einen einzelnen Abonnenten oder Publisher gebunden. ROS unterstützt auch ein One-to-One Request Response Message-Passing-System über synchrone Dienste und asynchrone Aktionen (Quigley et al. 2009).

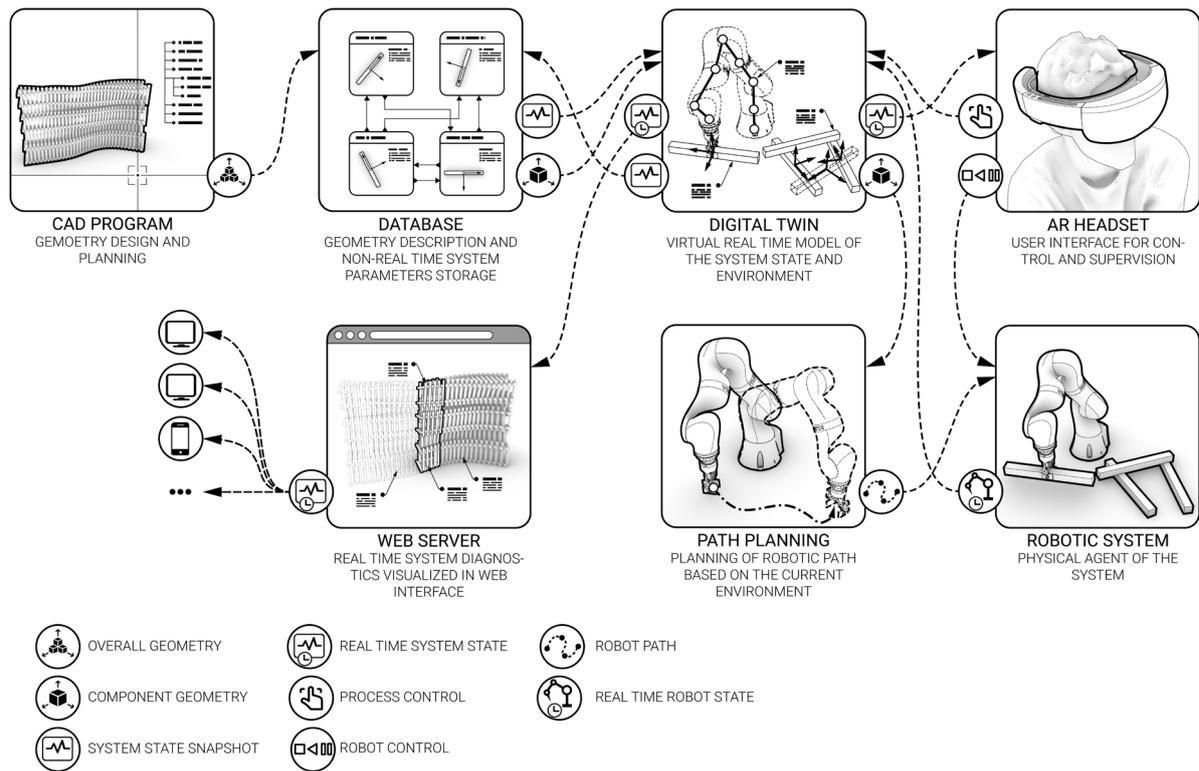


Abb. 16: Systemübersicht

Aufgrund seines skalierbaren Designs und seiner Open-Source-Eigenschaft wurde ROS zu einem weit verbreiteten und beliebten Framework in der Roboterforschung und wird auch in dieser Forschung als Kern-Framework eingesetzt.

Implementierung

Es gibt zahlreiche und unterschiedliche Anforderungen und Einschränkungen für jede Komponente des Systems und deshalb wird es auf verschiedenen Hardwareplattformen und unter verschiedenen Betriebssystemen ausgeführt. Die verschiedenen Geräte wurden bereits teilweise in der Hardwareübersicht beschrieben. Die wohl schwierigste Aufgabe war es, eine Kommunikation zwischen ihnen herzustellen. Der Kern des Systems wurde daher mit Hilfe des oben genannten Robot Operating System Frameworks (ROS) entworfen. Aufgrund der spezifischen Anforderungen von ROS waren jedoch nicht alle Systemkomponenten vollständig in den internen Kommunikationsrahmen von ROS integrierbar. Die Kommunikation mit Geräten außerhalb der ROS-Kommunikation wurde daher mit dem ROS-Paket `rosbridge_suite` hergestellt, das für solche Szenarien weit verbreitet ist. Einzige Ausnahme war die Kommunikation mit der Robotersteuerung, die auf den hochperformativen Protokollpuffern (`protobuf`) basiert.

Im Folgenden wird eine Übersicht über die eingesetzte Hardware und entsprechende Implementierung gegeben.

ROS-Server:

Der ROS-Server ist ein Standard-PC mit einem Ubuntu-Varianten eines GNU/Linux-Betriebssystems. Alle ROS-Knoten laufen als Instanzen auf diesem Server. Ziel ist es, so viel wie möglich von den Systemkomponenten und der Logik innerhalb des ROS-Systemrahmens auszuführen. Deshalb integriert der Server mehrere im vorherigen Kapitel beschriebene

Systemkomponenten. Die beiden wichtigsten, vollständig im ROS-Rahmen implementierten Systeme sind der Mediator und der Digital Twin.

1. *Mediator Implementierung*: Wie bereits erwähnt, ist der Hauptteil der Mediator-Komponente, der `rosbridge_suite` ROS-Knoten, mit einem Webbrowser-Client, der die Funktionalität der Supervisor-Komponente implementiert, sowie mit der Bedienkomponente, die auf der Microsoft HoloLens-Plattform läuft und die Designer-Komponenten bietet, verknüpft. Die gesamte Kommunikation basierte auf dem Client-Server-Muster, wobei `rosbridge_suite` als WebSocket-Server diente. Die ausgetauschten Informationen wurden serialisiert und in ein JSON-basiertes Rosbridge-Kommunikationsprotokoll deserialisiert. Ein wichtiger Pfad der Mediatorsystemkomponente ist auch der Pfadplanungs-ROS-Knoten. Das Ziel einer Bahnplanung eines holonomen Roboterarms ist es, den Arm in eine Zielposition zu bewegen, indem die Bewegung in einen diskreten geordneten Satz kleinerer Bewegungen zerlegt wird, die jeweils die Armkonfiguration beschreiben, indem ein Satz Achswerte angegeben wird. Ohne eine solche Lösung kann sich ein Roboterarm nur in einfachen Bewegungen wie Geraden oder Bögen zu einem Zielort bewegen. Die Bewegung des Roboterarms wird in diesem Experiment vor allem durch die schwer vorherzusagende Form der halbfertigen Baugruppe eingeschränkt. Vor jeder neuen Armbewegung muss daher der Weg unter Berücksichtigung der Umwelthindernisse (bereits vorhandene Elemente) sorgfältig geplant werden. Für diese Aufgabe wird ein Open-Source-ROS-basiertes Bewegungsplanungs-Framework MoveIt! verwendet. Das MoveIt! Framework ist eine Sammlung von Werkzeugen zur Weg- und Bewegungsplanung, Steuerung und Navigation für hauptsächlich gelenkige Roboter (Sucan and Chitta 2011). Für die Wegplanung verwendet es im Backend die Open Motion Planning Library (OMPL), die einen Satz modernster stichprobenbasierter Bewegungsplanungsalgorithmen enthält und pflegt. In diesem Projekt wurde der RRT-Connect Single-Abfrage-Algorithmus aufgrund seiner guten Performance für 7-DOF-Roboterarme wie den KUKA LBR iiwa eingesetzt (Kuffner and LaValle 2000). Das Ergebnis der Bewegungsplanung ist ein Satz Achswerte, der anschließend über den Protobuf-Mechanismus serialisiert und über eine TCP/IP-Kommunikation an die Robotersteuerung gesendet wird.
2. *Digital Twin Implementierung*: Die Umweltinformationen (z.B. Position des Roboterarms und der Bauelemente) werden in der digitalen Twin-Systemkomponente gespeichert. Der digitale Zwilling sammelt und synthetisiert alle verfügbaren Informationen, die von den verschiedenen Komponenten und Geräten gesendet werden, zu einer digitalen Darstellung. Die Informationen können zwei Arten von Informationen sein:
 - a. *Flüchtig*: Darstellung der schnell wechselnden Zustände in Echtzeit, die nur einen sehr kurzlebigen Wert haben. Diese Informationen werden nicht dauerhaft gespeichert und gehen beim Ausschalten des Systems verloren. Die als flüchtig gespeicherten Informationen sind z.B. Roboter-Gelenkwerte oder ARHMD-Pose.
 - b. *Ausdauernd*: Stellt Systemzustände dar, die sich langsam ändern und nicht leicht abrufbar sind. Die Informationen sind persistent. Beispiele für diese Art Information sind die Pose der Bauelemente oder der Fertigstellungsgrad.

Während die flüchtigen Informationen einfach im Arbeitsspeicher des Computers gespeichert werden, werden die persistenten Informationen kontinuierlich auf der Festplatte des Computers mit Hilfe einer dokumentorientierten Datenbank MongoDB gespeichert und aktualisiert.

Design-Schnittstelle:

Als Designerkomponente dient eine Instanz eines 3D-Modellierungs-CAD-Programms Rhinoceros 3D. Eine Kommunikation mit dem Mediator wird durch eine benutzerdefinierte Komponente in einem grafischen Algorithmeneditor Plugin Grasshopper hergestellt. Die Kommunikation ist bidirektional und somit ist es möglich, nicht nur neues Design hochzuladen, sondern auch ein aktuelles Design abzufragen und zu aktualisieren, das als Teil der digitalen Zwillingdarstellung existiert. Neben der Designfunktion ist es auch möglich, Echtzeit-Systemdaten wie die Roboterposition abzufragen und im Programm-Viewport darzustellen. Das Programm kann daher auch als Supervisor dienen.

Augmented Reality HMI:

Die oben genannte Microsoft HoloLens ARHMD wird verwendet, um die visuelle Mensch-Maschine-Schnittstelle zu beherbergen und darzustellen. Die Benutzeroberfläche ist in der Programmiersprache C# programmiert und mit der Unity Game Engine gerendert, die zur Zeit der Entwicklung dieses Projekts die einzige unterstützte Engine war. Das Headset beherbergt die Komponente des Bediensystems, die sich zwischen der Steuerungs- und Überwachungsschicht befindet und drei Hauptmerkmale aufweist:

1. *Heads Up Display (HUD)*: Die Grundlagen eines HUD wurden im Kapitel 2.2 erläutert. Das Heads-Up-Display befindet sich auf dem nutzbaren AR-Bereich der Microsoft HoloLens und zeigt dem menschlichen Bediener die allgemeinen persistenten Prozessinformationen als Kombination aus weißer Zeichenkette und Zahlenwerten. Es zeigt konkret die Nummer der aktuellen Baugruppe, die aktuelle Bauteil-ID und den Gesamtfertigungsgrad der Endkonstruktion.
2. *Mixed-Reality-Display*: Die Mixed-Reality-Anzeige ist für die Darstellung der Systeminformationen verantwortlich, die eng mit den realen Objekten verbunden sind. In diesem Projekt dient es dazu, sowohl persistente als auch flüchtige Informationen hervorzuheben und zu visualisieren. Insbesondere hebt es hervor:
 - a. Bauelemente
 - i. Bereits gebaut: grün
 - ii. Mögliche Optionen: blau
 - iii. Ausgewähltes Element: gelb
 - iv. Aktuell gegriffen: rot
 - b. Achsmomente
 - i. Als absoluter Zahlenwert
 - ii. Bunter Ring von grün (Minimum) bis rot (Maximum erlaubt)
 - c. Roboterarm geplante Strecke
 - i. Vor der eigentlichen Bewegung kann der Mensch den geplanten Armweg im 3D-Raum vorab betrachten.
3. *Mixed Reality Control Benutzeroberfläche*: Basierend auf dem Prinzip der Mixed-Reality-Displays in Kombination mit der Blick- und Commit-Interaktion von HoloLens ist es möglich, eine virtuelle Steuerung wie Drucktasten oder Radiobuttons zu erstellen. Die

Schaltfläche kann durch eine "gaze-and-commit" aktiviert werden, die direkt im Microsoft HoloLens SDK unterstützt wird. Die virtuelle Taste (oder ein anderes Oberflächenelement) kann durch Ausrichten des "Field of View" (FOV) des Headsets mit der 3D-Virtualform ("Gaze") angedeutet und dann durch eine Handtippgeste ("Air tap") aktiviert werden. Die Mixed Reality Control UI wird in diesem Projekt verwendet, um:

- a. Befehle an das Robotersystem zu erteilen:
 - i. Plant die nächste Roboteraktion ein
 - ii. Aktion ausführen
- b. das Verhalten der AR-Schnittstelle zu ändern, indem mehr oder weniger Informationen angezeigt und somit interaktiv das Informationsgehalt angepasst werden kann.

Robotersteuerung:

Die Arbeitskomponente ist für die eigentliche Roboterbewegung verantwortlich und wird daher direkt auf der KUKA Sunrise Steuerung eingesetzt. Die Programmierung der Steuerung erfolgt mit der Sunrise Workbench Software, die auf der weit verbreiteten Open Source Eclipse Integrated Development Environment (IDE) basiert. Die Kommunikation mit dem ROS-System wird als eine Reihe von zyklischen Hintergrundaufgaben über die KUKA-API programmiert. Die empfangenen Befehle werden anschließend mit der Hauptroboteranwendung ausgetauscht, die die Roboterbewegungen ausführt. Der Sunrise-Schrank steuert sowohl den Roboterarm über die proprietäre Systemschnittstelle als auch den adaptiven MRK-Greifer über die EtherCAT-Schnittstelle. Beide Komponenten verfügen über eigene Kommunikationskanäle für den Befehlsaustausch und einen hochfrequenten Systemstatusstrom. Der Kommunikationskanal des Befehlsaustauschs basiert auf einem Request Response Client-Server Muster unter Verwendung des TCP/IP-Protokolls. Um den Rechenaufwand zu

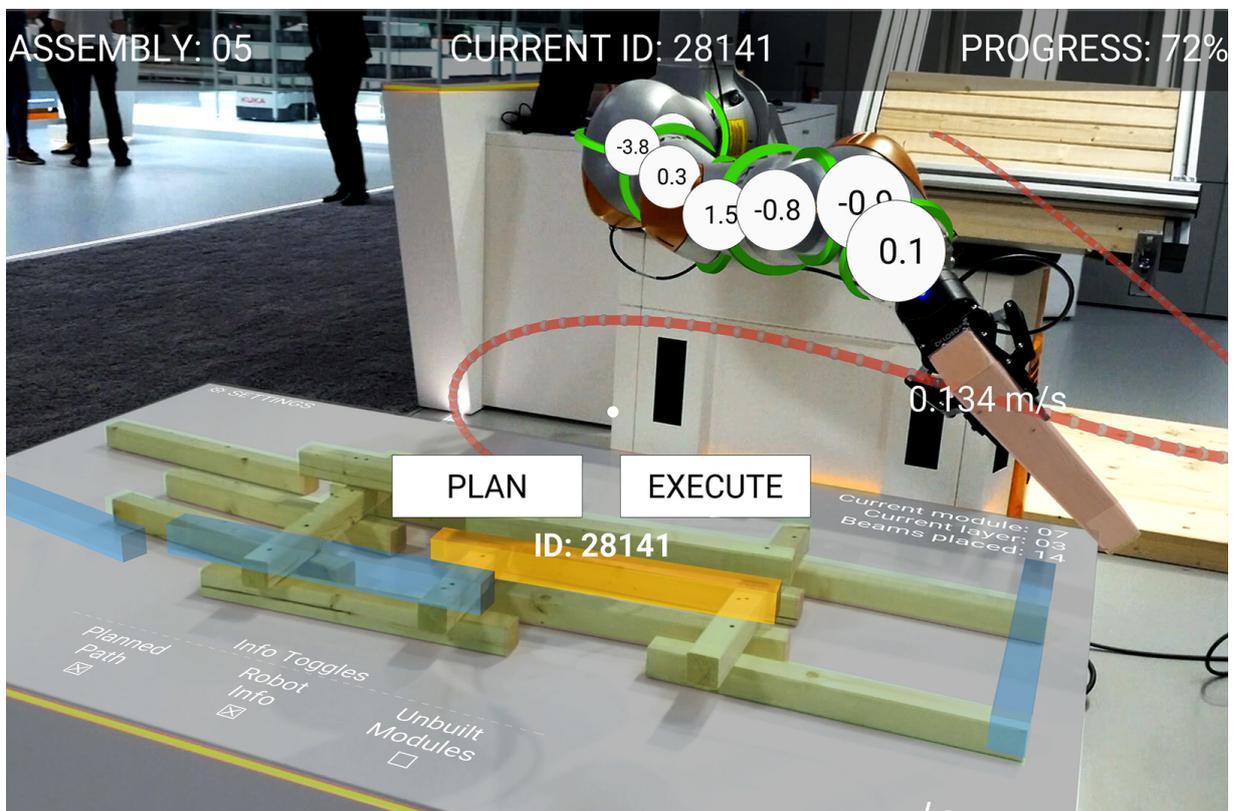


Abb. 17: Augmented Reality First-Person-Ansicht

reduzieren, verwendet der hochfrequente (250Hz) State Server Stream, ein unidirektionaler Kommunikationskanal, das UDP-Protokoll. Diese Architektur entkoppelt die beteiligten Komponenten und ermöglicht so eine höhere Skalierbarkeit und einfachere Entwicklung.

Webbasierte Benutzeroberfläche:

Obwohl die AR-Schnittstelle zahlreiche Vorteile gegenüber anderen visuellen Darstellungen bietet, ist sie eng an eine bestimmte Hardware (in diesem Fall Microsoft HoloLens) gebunden und daher schwer skalierbar. Um diese Schwierigkeit zu überwinden, bietet das System eine Implementierung der Supervisor-Komponente mit einer webbasierten Benutzeroberfläche, die in jedem modernen Browser ausgeführt werden kann (Autodesk Inc. 2019). Die Benutzeroberfläche verfügt über einen 3D-Viewer, der mit der von Autodesk entwickelten JavaScript-Bibliothek Forge Viewer programmiert wurde. Der Forge Viewer ermöglicht die 3D- und 2D-Wiedergabe von Objekten in einem Standard-Webbrowser unter Verwendung der Web Graphics Library. Neben der Kommunikation mit dem dedizierten Webserver, der die statischen JavaScript- und Html-Dateien bedient, stellt der Browser des Benutzers auch eine unidirektionale Websocket-Verbindung mit dem ROS-Paket `rosbridge_suite` her. Dies ermöglicht es, den aktuellen Fertigungsstatus aus der persistenten Datenbank zu laden sowie verschiedene Echtzeitthemen des ROS-Frameworks zu abonnieren. Der Anwender kann so den aktuellen Bauzustand sowie die Roboterposition und den gesamten Baufortschritt in Echtzeit einsehen.

Demonstrator

Auf der Hannover Messe 2018 wurde der Prototyp als Demonstrator implementiert und als einer von fünf Finalisten des KUKA Innovationspreis 2018 präsentiert. Im Rahmen der Ausstellung wurde die Collaborative Robotic Workbench innerhalb einer Woche in Live-Demonstrationen präsentiert, die der Öffentlichkeit zugänglich waren.

Im Verlauf der Demonstration wurden eine Reihe von Werkzeugen erfolgreich etabliert und getestet, die das Potenzial haben, eine effiziente Mensch-Roboter-Zusammenarbeit im Holzbau zu ermöglichen. Einer der wohl größten technischen Beiträge war die Kommunikation zwischen ROS und Microsoft HoloLens, die im Stand der Technik bisher nur begrenzt erreicht worden war, und zwischen ROS und dem Sunrise-Steuerungssystem.

Obwohl es bereits Tools für die Kommunikation und Steuerung von ROS-LBR iiwa gibt, basieren diese auf zusätzlichen KUKA-Paketen und wurden für verschiedene Zwecke entwickelt. Zwei bemerkenswerte weit verbreitete Werkzeuge sind die Echtzeit-Kommunikationsbibliothek Generic Robotics Library (grl) (athundt et al. 2017), die das KUKA Fast Robot Interface (FRI)-Technologiepaket und der `iiwa_stack` (Hennersperger et al. 2017), der auf dem KUKA Servoing-Technologiepaket basiert. Der in diesem Projekt entwickelte Kommunikations- und Steuerungsstapel ist jedoch völlig unabhängig von zusätzlichen KUKA Technologiepaketen und ermöglicht es, einen ganzen gelenkbasierten Bewegungsblock effektiv zu streamen.

Das Projekt zeigte nicht nur ein erfolgreiches MRK-Szenario, sondern auch einen flexiblen Fertigungsablauf, bei dem die Konstruktion durch Fertigungsbedürfnisse oder andere Interessengruppen informiert und in Echtzeit angepasst werden kann.



Abb. 18: Demonstrator

Diskussion

Obwohl das Experiment in vielerlei Hinsicht ein erfolgreicher Proof-of-Concept für MRK im Holzbau war, lohnt es sich, einige Aspekte zur Diskussion zu stellen.

Die ungebundene ARHMD, die eine uneingeschränkte Bewegung des Menschen erlaubte, erwies sich als wichtiger Vorteil im Umfeld einer Live-Demonstration auf der Hannover Messe. Die geringe Batteriekapazität (ca. 2h) und die lange Ladezeit sowie die relativ geringe Rechenleistung, die eine Priorisierung und schwierige Optimierung der Benutzeroberfläche erforderten, waren jedoch eine unnötige Erschwernis in einem Proof-of-Concept-Projekt. Darüber hinaus basiert das Inside-Out-Tracking des Microsoft HoloLens auf einer Umweltraumkartierung, die sich in einem hochdynamischen Umfeld wie einem überfüllten Messestand mit ständig wechselnden Besuchern als Herausforderung erwies. Eine gültige Lösung wäre daher die Kopplung des Headsets mit einem niederfrequenten Outside-In-Tracking oder Umweltmarkern, die den gelegentlichen Lokalisierungsdrift des Headsets korrigieren würden.

Wie bereits erwähnt, verwendete der Roboterpfadplaner den OMPL, der in der ROS-Schnittstelle MoveIt! keine Kostenoptimierung unterstützt. Die Trajektorie war daher ein zufälliger möglicher Weg ohne Optimierung. Während der Mangel an Kostenoptimierung die Rechengeschwindigkeit deutlich verbessert, bedeutet dies auch, dass ein einmal geplanter Weg praktisch nicht reproduzierbar ist, da jeder Versuch eine zufällige mögliche Lösung ergibt. Eine Implementierung einer einfachen Kostenfunktion (z.B. gemeinsame Anstrengungen oder kartesische Trajektorienlänge) würde der Anwendung sehr zugute kommen.

Der vorgestellte Demonstrator war auf die Bedürfnisse und Anforderungen der Hannover Messe angepasst. Der Einsatz eines Robotersystems mit so geringer Reichweite wäre jedoch im Kontext der heutigen Holzvorfertigung, bei der die Werkstücke tendenziell viel größer sind,

fragwürdig. Eine Untersuchung verschiedener Strategien, wie man den Arbeitsbereich des Armes vergrößern kann, wäre daher eine weitere Forschung wert.

Schließlich war das technologisch erfolgreiche Kollaborationsszenario nur ein einfaches Beispiel, das wenig unterschiedliche Möglichkeiten der Zusammenarbeit mit dem Robotersystem bot. Unserer Meinung nach sollte eine weitere Forschung eine höhere kognitive Kooperationsstrategie wie Joint Attention sowie pHRI in Form von einfachen taktilen Gesten wie Push oder Pull integrieren, die während eines kollaborativen Fabrikationsszenarios intuitiver sein könnten.

Danksagung

Für die Zusammenarbeit während des Experiments geht unser Dank an Bahar Al Bahar, Lauren Vasey, Benedikt Wannemacher. Für die Unterstützung bei der Umsetzung außerdem an Rebecca Duque und Samuel Leder, sowie an die KUKA Roboter GmbH für die Bereitstellung des KUKA LBR iiwa Robotersystems.

EXPERIMENT 2 - Robotische Vorfertigung einer leichten Holzschale



Abb. 19: Roboterzelle

Das zweite Experiment konzentrierte sich auf eine vollautomatische Vorfertigung von 376 einzigartigen räumlichen Holzkassetten der Bundesgartenschau 2019 Holzpavillon in Heilbronn. Obwohl das ursprüngliche Ziel des Projekts darin bestand, eine vollautomatische Roboter-Vorfertigungszelle zu entwickeln, erwies sich ein vollautomatischer Prozess mit einem flexiblen Umgang mit dem Material und den fertigen Kassetten als nicht machbar innerhalb der Zeit- und Kostenvorgaben des Projekts. Daher war es notwendig, eine klare und sichere Übergabeschnittstelle zwischen automatisiertem Prozess und manuellem Arbeitsablauf zu gestalten. Dieses Szenario bot eine ideale Grundlage für das Testen fortgeschrittener MRK-Strategien.

Ziel des Experiments war es, die folgenden Features zu entwickeln und zu testen:

- Gelegentliche Zusammenarbeit: seltene Zeit- und Arbeitsbereiche Mensch-Roboter-Zusammenarbeit auf der Grundlage eines überwachten Kooperationsbereichs.
- Industrietauglich: Einsatz von Standardkomponenten, die bereits auf dem Markt sind.
- Praxistauglichkeit: Feldtest der entwickelten Verfahren

Kontext

Die Anwendung umfasst die Montage und Bearbeitung von räumlichen Holzkassetten mit zwei Industrierobotern. Jede Kasette ist vollständig aus Furnierschichtholz (LVL) gefertigt und besteht aus drei Schichten: 1) einer Bodenplatte mit einer Dicke von 21 mm, 2) einer Deckplatte mit einer Dicke von 33 mm und 3) zwischen Kantenbalken mit einer Dicke von 106 mm und einer variablen Tiefe. Jede Kasette hat eine einzigartige Form und Größe, wobei die größte Kasette einen Durchmesser von bis zu 2,7 m und 120 kg erreicht.

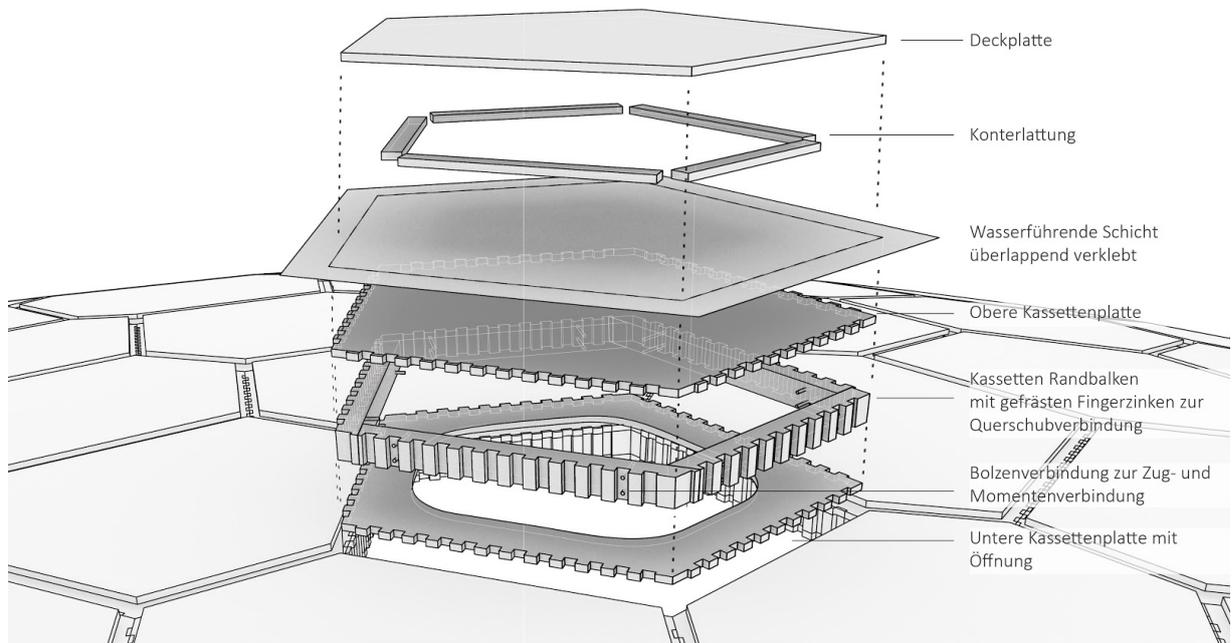


Abb. 20: Holzkassettenstruktur

Die Herstellung erfolgt in vier unabhängigen Stufen:

1. **Vorformatierung:** Die rohen LVL-Platten und -Träger werden zunächst auf eine bestimmte Größe und Form vorformatiert. Die entstandenen Teile werden gleichzeitig beschriftet und sortiert.
2. **Montage:** Jede Kassette wird anschließend aus den im vorherigen Absatz genannten vorformatierten Teilen zu einer Baugruppe zusammengesetzt. Die Teile werden mit einem Polyurethankleber mit einer Montagezeit von 60 Minuten verklebt. Die Montage ist ein vollautomatischer Prozess mit zwei Eingängen und einem Ausgang: geordneter Stapel von Ober- und Unterplatten, geordneter Stapel von Randträgern und geordneter Stapel von fertigen Kassetten.
3. **Pressen:** Drittens werden die montierten Kassetten zusammengepresst, damit sich der PU-Kleber absetzen kann. Ein kontrollierter mechanischer Druck wird ausgeübt, um eine hochwertige Klebestelle zu schaffen. Die Bedienung der mechanischen Presse erfolgt manuell.
4. **Fräsen:** Abschließend werden die geklebten Kassetten mit einem 7-Achsen-CNC-Setup in die gewünschte Form gefräst. Dieser automatisierte Prozess hat einen Eingang und einen Ausgang: einen geordneten Stapel geklebter Kassetten und einen geordneten Stapel fertig formatierter Kassetten.

Die Produktion ist in Chargen mit variabler Losgröße organisiert. Während diese Größe in der Regel flexibel durch die Anforderungen der Maschinenauslastung in der Montagephase bestimmt wird, ist sie eng an die Montagezeit des PU-Klebstoffs und die Anzahl der verfügbaren Pressen gebunden. Die Presse muss innerhalb der Leimmontagezeit von 60 min geschlossen werden; insgesamt stehen nur zwei Pressen zur Verfügung. Daher kann mit der Leimfixierzeit von 4 Stunden jede Presse in einer Standard 8-Stunden-Schicht nur zweimal geschlossen werden. Die Optimierung des Montagezyklus ist daher entscheidend. Ein korrektes Design von Mensch-Roboter-Material und Produktübergabeschnittstellen sind einer der kritischsten Aspekte einer solchen Optimierung.

Das Forschungsproblem aus der Sicht der MRK im vorgestellten Projekt besteht darin, wie man die Mensch-Roboter-Übergabeschnittstellen optimiert, um die Geschwindigkeit des Montagezyklus zu verbessern.

Methoden

Systemkomponenten

Robotersystem

Die Fertigungsroboterzelle basiert auf zwei 6-DOF Industrieroboterarmen KUKA KR 500 R2830 mit einer maximalen Nutzlast von 500 kg und einer Reichweite von 2,83 m und einem externen 2-DOF-Positionierer KUKA DKP-400. Zusammen bilden sie ein synchronisiertes 14-DOF Roboter-Setup. Jeder der Roboterarme ist mit einer speziellen KUKA KR C4-Steuerung verbunden, die sowohl die Stromversorgung als auch die Datenverbindung zum Steuersignal bereitstellt.

Die relativ große Differenz zwischen dem Gewicht der Kassette und der maximal zulässigen Roboter-Nutzlast (120kg / 500kg) ermöglicht eine höhere Präzision des Roboterfräsens durch eine höhere Steifigkeit und damit geringere Vibrationen des Roboterarms.

Die KRC 4-Steuerung verfügt über eine integrierte Sicherheitssteuerung für einfachere Aufbauten oder sie kann mit dem KUKA.SafeOperation-Paket über das PROFINET-basierte Feldbusprotokoll PROFIsafe in erweiterte Sicherheitsaufbauten integriert werden.

Endeffektoren

Jeder Roboterarm war mit einem speziell angefertigten Endeffektor ausgestattet. Während die Roboterarme identisch sind, wird ihre Funktion nur mit dem Endeffektor bestimmt. Die verschiedenen Funktionen der Compound-End-Effektoren werden mit folgender Hardware ausgeführt:

1. Endeffektor - Handling
 - a. Parallelgreifer
 - i. 2x Festo Parallelgreifer HGPL mit einem Hub von 80 mm, ausgestattet mit einem kundenspezifischen Finger.
 - ii. Bewegung von linearen Elementen (Randstrahlen)
 - b. Vakuumgreifer
 - i. 2x Schmalz Vakuum-Flächengreifer SBX-C versorgt von einer Schmalz-Vakuumpumpe EV-TR 140 mit einem maximalen Saugvermögen von 154m³/h
 - ii. Bewegung von ebenen Elementen (Ober- und Unterplatte und fertige Kassette)
2. Endeffektor - Fertigung
 - a. Kleben
 - i. Leimkopf FAS300 verbunden mit Niemes N-PUR 100 Dosiersystem für einkomponentigen PUR-Leim
 - ii. Leimauftrag
 - b. Nageln
 - i. 44 LignoLoc Nagelpistole mit komprimierten Buchenholznägeln
 - ii. Zwischenbefestigung der verklebten Elemente
 - c. Fräsen
 - i. HSD ES951 Elektrospindel
 - ii. Besäumen von geklebten Kassettenbaugruppen in die gewünschte Form

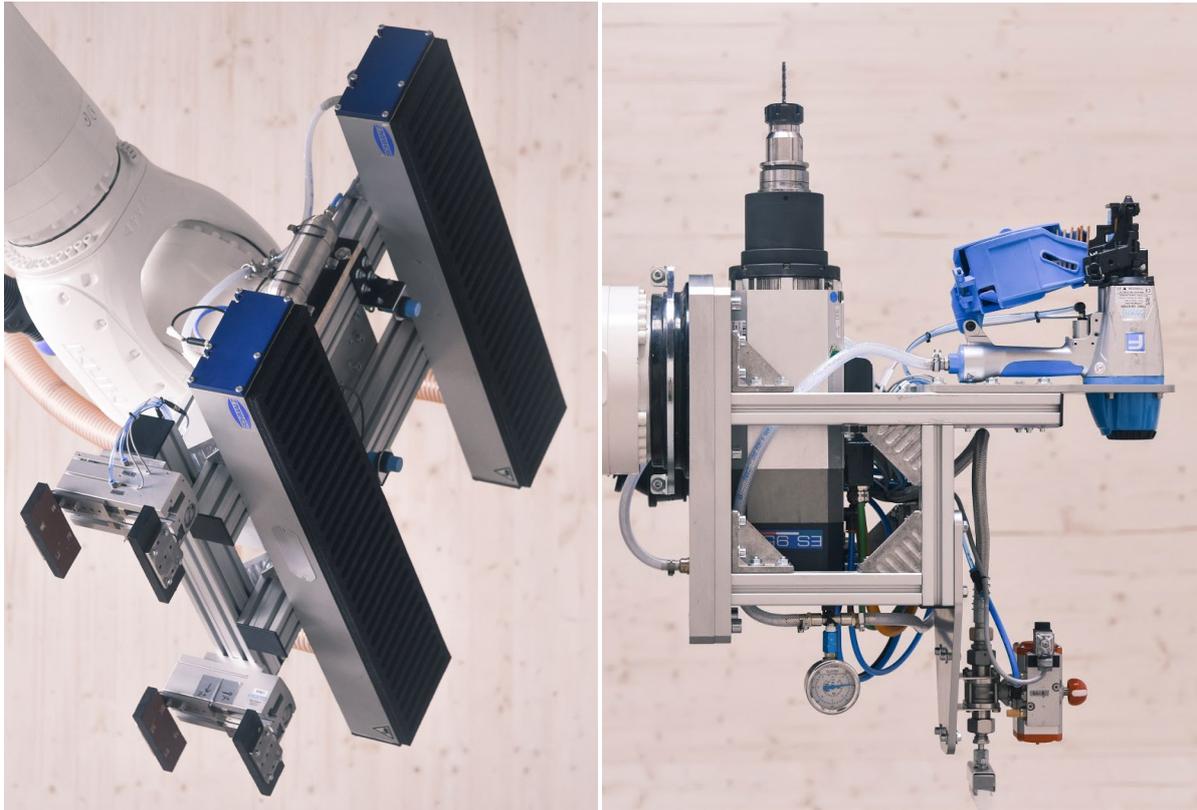


Abb. 21: Roboter- Endeffektoren

Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Auch wenn die KUKA KRC4-Steuerung eine einfache Prozesssteuerungsfunktionalität beinhaltet, ist es schwierig, komplexere Arbeitsabläufe zu programmieren, wie sie in diesem Projekt vorgestellt werden. Zur Steuerung des vorgestellten Systems wurde eine Hochleistungs-SPS Phoenix Contact RFC 470S PN 3TX gewählt. Der Controller hat folgende Funktionen, die für die Durchführung dieses Forschungsprojektes wichtig sind:

1. Unterstützt ein PROFINET-Feldbusprotokoll, das eine einfache Anbindung an die KUKA Steuerungen KRC 4 sowie an die Leimdosiermaschine und Remote-IO-Koppler ermöglicht.
2. Enthält eine Sicherheitssteuerung, die ein PROFINET-basiertes Sicherheitsfeldbusprotokoll PROFIsafe für performative Sicherheitsaufbauten unterstützt.

Die SPS ist mit dezentralen Profinet-Kopplern verbunden, die die erforderliche IO-Funktionalität zur Steuerung von physikalischen Systemvorrichtungen (z.B. Pneumatikventile) und zum Empfangen von Eingangssignalen von Sensoren (z.B. Näherungssensoren) bereitstellen. Die RFC 470S PN 3TX SPS unterstützt die Programmierung nach IEC 61131-3 Standard durch die firmeneigene Phoenix Contact Engineering-Software PC Worx und Safetyprog.

Presse

Die Kassettenpresse für die montierten Kassetten ist eine einfache mechanische Presse, die aus dicken achteckigen Platten besteht, die zwischen den fertig montierten Kassetten eingefügt werden, um die Presskraft gleichmäßig zu verteilen. Nachdem die letzte Platte

platziert wurde, wird die gesamte Presse mit 6 Gewindestangen auf ein bestimmtes Moment angezogen, das die erforderliche Presskraft erzeugt. Die Stangen sind mit einem oberen und unteren Stahlkreuz verbunden. Das untere Kreuz wird auf Räder gelegt, die auf Schienen rollen können, um die Presse zu bewegen.

Sicherheitseingabegeräte

Um die Sicherheit von Menschen zu gewährleisten und Verletzungen zu vermeiden, werden in der Sicherheitstopologie mehrere Sicherheitsvorrichtungen verwendet. Diese Vorrichtungen überwachen die Bewegung von menschlichen Arbeitskräften und melden sich bei der Sicherheitssteuerung. Alle Geräte sind als zweikanaliges Sicherheitssignal ausgeführt. Die für dieses Forschungsprojekt verwendeten Funktionen und Geräte zur Sicherheitsüberwachung sind:

1. Eingangsgateüberwachung: 2x magnetischer berührungsloser Sicherheitsschalter Sick RE13
2. Überwachung des Ausgangstores: 1x magnetischer berührungsloser Sicherheitsschalter Sick RE13
3. Zugangsüberwachung des Eingangsbereichs: 1x optoelektronisches Send-/Empfangslichtschranke Sick M2000 Standard mit vier Infrarot-Lichtstrahlen
4. Zugriffsüberwachung des Roboterarbeitsplatzes: 1x Sicherheits-Laserscanner Sick S3000 Standard mit einer maximalen Reichweite von 4m, verbunden mit der Sicherheitssteuerung über ein Sick EFI-Gateway.
5. Not-Aus: 3x Not-Aus-Piltaster mit einer Selbsthaltefunktion (d.h. Dreh-zu-Entriegelungsmechanismus) in Serie geschaltet.

Mensch-Roboter-Übergabe

Um eine sichere und effiziente Übergabeschnittstelle zwischen den menschlichen Mitarbeitern und dem Robotersystem zu erreichen, müssen sichere gemeinsame kollaborative Arbeitsbereiche entwickelt werden. Im Rahmen dieses Projekts wird der Umgang mit Material und Produkten von menschlichen Mitarbeitern durchgeführt, so dass es entscheidend ist, zwei Haupträume zu bestimmen, in denen die menschliche Anwesenheit notwendig ist. hs.

Der erste Bereich ist ein Eingabebereich für das vorformatierte Material. Der Raum hat zwei bestellte Stapel; der erste Stapel ist für die Randträger und der zweite Stapel für die vorformatierten Ober- und Unterplatten. Die menschliche Anwesenheit im Eingangsbereich ist nur sporadisch notwendig. Genauer gesagt, ist es nur zwischen den Zyklen erforderlich, da die Stapel genügend Material aufnehmen können, damit alle Kassetten für einen Zyklus produzieren können.

Der zweite Raum ist der Ausgaberaum für die fertig montierten Kassetten, die direkt auf die Zwischenplatten gelegt werden, dieser Raum hat nur einen bestellten Stapel. Allerdings müssen die Zwischenplatten zusammen mit einer Kunststoffplane auf jede fertige Kassette gelegt werden, bevor die nächste Kassette eingesetzt werden kann. Daher muss die gesamte Presse bei jedem Kassettenzyklus in die Fertigungszelle ein- und ausgefahren werden.

Um die Anzahl und Dauer der Stillstandszeiten der Montage zu minimieren, wird ein Entwurf eines sicheren Kooperationsraums vorgeschlagen, in dem die Anwesenheit eines menschlichen Arbeiters während des automatischen Montageprozesses erlaubt ist. Die während des automatischen Fräsprozesses implementierte Sicherheit enthielt keine explizite MRK-Funktion, sondern eine Standard-Maschinensicherheit, da nicht oft genug mit dem Robotersystem interagiert werden musste, um den Einsatz zu rechtfertigen.

Sicherheit

Das vorgeschlagene Sicherheitskonzept basiert auf einer einfachen endlichen Maschine (FSM), bei der die verschiedenen Zustandsübergänge mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen sicheren Eingabegeräten ausgelöst werden. Die Zustände werden durch verschiedene sichere Zustände der Roboterarme dargestellt. Die relevanten Sicherheitsmaßnahmen (z.B. sichere Stopps) werden durch die Zustandsübergänge ausgelöst. Aufgrund der unterschiedlichen Prozessanforderungen hat das Sicherheitskonzept zwei verschiedene Sicherheitsstrategien, die als verschiedene Zweige des FSM-Diagramms dargestellt werden: Montagesicherheit und Frässsicherheit.

Implementierung

Hardware-Implementierung

Das physikalische Layout der Fertigungsroboterzelle zusammen mit dem physikalischen Standort der Sicherheitseinrichtungen ist in Abbildung 22 dargestellt. Das Sicherheitskonzept wurde mit drei Systemkomponententypen umgesetzt:

1. *Sicherheitssteuerung*: Die Sicherheitssteuerung läuft auf der zuvor vorgestellten SPS. Die Steuerung stellt die Verbindung zu externen Ein- und Ausgängen her und implementiert die Sicherheitslogik.
2. *Eingaben*: Vertreten durch die bereits beschriebenen Sicherheitseingabegeräte und die beiden KRC4-Steuerungen durch das Technologiepaket KUKA.SafeOperation.
 - a. Das System verfügt über vier physikalische Zweikanaleingänge:
 - i. Eingangssignal, das durch zwei in Serie geschaltete Sicherheitsmagnetschalter ausgelöst wird. Der Eingang ist high, wenn das Tor geschlossen ist und sich der aktive und passive Teil ausrichten (NC-Signal).
 - ii. Ausgangssignal, das durch einen Sicherheitsmagnetschalter ausgelöst wird. Die Funktionalität ist die gleiche wie bei der vorherigen Eingabe.
 - iii. Not-Aus-Signal, ausgelöst durch drei in Reihe geschaltete Drucktasten. Der Eingang ist hoch, wenn die Tasten nicht gedrückt werden (NC-Signal).
 - iv. Zugangssignal für den Eingangsbereich, das durch das Lichtgitter mit einer Hardwareverriegelung ausgelöst wird. Das Signal ist hoch, wenn das Gate nicht ausgelöst wird. Um das Tor auszulösen, muss mindestens einer der Strahlen unterbrochen werden. Das Lichtgatter geht dann in einen Fail-Safe-Modus über und das Signal bleibt niedrig, bis der Strahlengang frei ist und der Zustand durch ein externes Signal bestätigt wurde (Wiederanlaufsperrprinzip).
 - b. Das System besteht aus zwei Komponenten mit einem oder mehreren Sicherheitseingängen, die über die Sicherheitsschnittstelle PROFIsafe verbunden sind:
 - i. Zugriff auf den Eingang des Roboterarbeitsplatzes, ausgelöst durch den Sicherheitslaser. Das Signal ist hoch, wenn die definierte Abtastung nicht belegt ist. Die Wiederanlaufsperrung ist in der Sicherheitssteuerung implementiert. Der Scanbereich, die Abtastauflösung und andere Parameter können konfiguriert werden.

- ii. Die Zustandssicherheitseingänge des Robotersystems werden von den beiden KRC4-Steuerungen ausgelöst. Es gibt 64 Eingänge, die zyklisch zwischen den KRC4-Steuerungen und der Sicherheitssteuerung ausgetauscht werden. Die wichtigsten Inputs, die in dem vorgestellten Projekt verwendet werden, sind:
 - Lokaler Not-Aus-Eingang, ausgelöst z.B. durch einen Not-Aus-Taster am Programmierhandgerät.
 - Automatikbetrieb aktivierter Eingang ausgelöst durch Setzen des Betriebsmodus auf automatisch
 - Peri-Freigabesignal, das ausgelöst wird, wenn der Roboterarm bereit ist, sich zu bewegen oder zu bewegen und die Sicherheit des Bedieners bestätigt wird.
 - Alarmraumsignal ausgelöst, wenn der Werkzeugmittelpunkt (TCP) einen vordefinierten Bereich verlässt. Wird für Diagnosezwecke und Signale verwendet.
- c. *Ausgänge*: Die Ausgänge werden durch vier Hardwarekomponenten dargestellt:
 - i. Zwei KRC4-Steuerungen, die über die PROFIsafe-Feldbusschnittstelle mit mehreren 64 Sicherheitsausgängen verbunden sind (ähnlich den bereits erwähnten Sicherheitseingängen). Die von diesem Projekt verwendeten Ergebnisse sind:
 - Externer Not-Aus-Ausgang, ausgelöst durch Drücken der Not-Aus-Taster. Das Signal stoppt den Arm mit einem Sicherheits-STOP 1.
 - Sicherheitsausgang Bediener ausgelöst, wenn alle Tore für das gegebene Sicherheitskonzept (Montage/Fräsen) gesichert sind und die Sicherheit vom Bediener bestätigt wird.
 - Sicherheitsausgang STOP 2 ausgelöst, um den Arm mit einem STOP-2-Verhalten zu stoppen (Antriebe bleiben aktiv und Bremsen werden nicht betätigt).
 - d. Der Spindel-Frequenzumrichter ist mit einem zweikanaligen Sicherheitsausgang mit der Sicherheitssteuerung verbunden. Wenn Sie das Signal auf niedrig setzen, wird eine Sicherheitsfunktion für das sichere Safety Torque Off (STO) im Wechselrichter ausgelöst.
 - e. Die Leimdosiermaschine, die über eine Standard-PROFINET-Schnittstelle angeschlossen ist, stoppt die Leimabscheidung bei einem plötzlichen Stopp des Roboterarms. Dieser Ausgang ist nicht ausfallsicher, da die Klebstoffabscheidung keine Schäden oder Verletzungen verursachen kann.

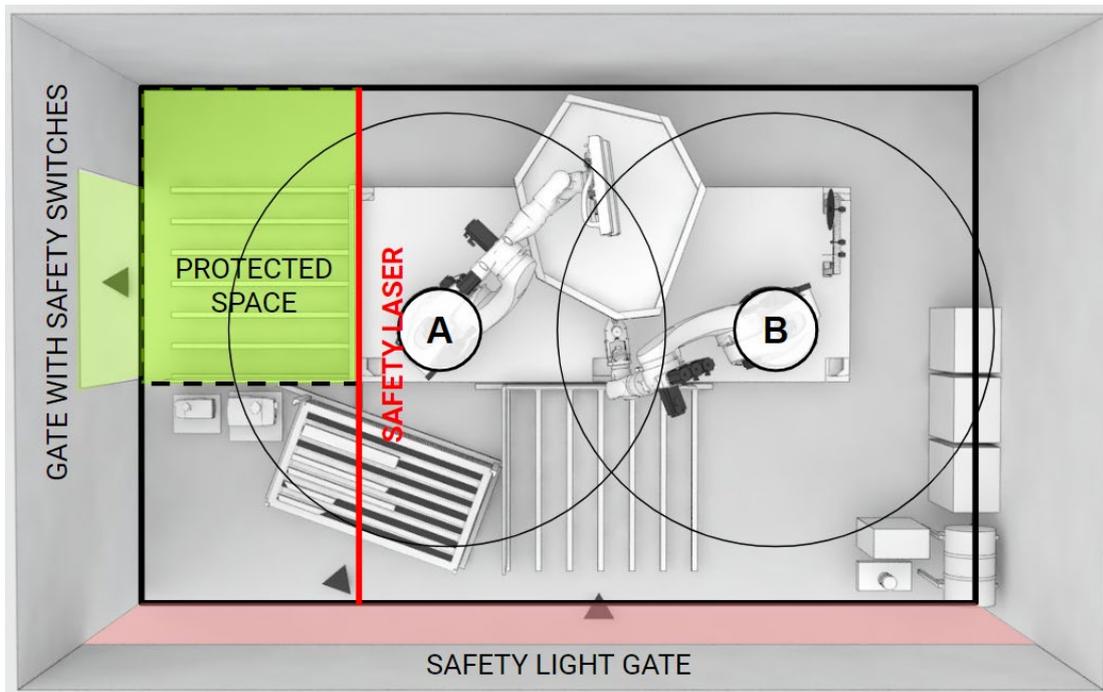


Abb. 22: Sicherheits-Setup-Übersicht

Logikprinzip

Die möglichen Zustände und deren Auslöser sind in der Abbildung 23 räumlich visualisiert. Das Diagramm zeigt die Belegung und den Kollaborations- und Gefahrenraum sowie die Roboterarmreaktion. Die vier verschiedenen Zustände für die Montage, die nach dem Zustand der beiden Roboter benannt sind, sind (Abb. 23 von links oben im Uhrzeigersinn):

A. Aktiv-Aktiv:

Voraussetzung:

- Der Kollaborationsraum ist nicht durch eine Person belegt.
- Der Gefahrenbereich ist nicht durch eine Person belegt.

Zustand:

- Beide Roboterarme bewegen sich mit voller Geschwindigkeit.

B. STOP1-Aktiv:

Voraussetzung:

- Der Kollaborationsraum ist durch eine Person belegt.
- Der Gefahrenbereich ist nicht durch eine Person belegt.
- Roboter A ist im Kollaborationsraum.

Zustand:

- Roboter A stoppt mit STOP 1 (Bedienersicherheit beeinträchtigt)
- Roboter B bewegt sich mit voller Geschwindigkeit.

C. STOP1-STOP1:

Voraussetzung:

- Der Gefahrenbereich ist durch eine Person belegt.

Zustand:

- Beide Roboter stoppen mit STOP 1 (Bedienersicherheit beeinträchtigt).

D. STOP2-Aktiv:

Voraussetzung:

- Montagevorgang aktiv
- Der Kollaborationsraum ist durch eine Person belegt.
- Der Gefahrenbereich ist nicht durch eine Person belegt.
- Roboter A ist nicht im Kollaborationsraum.

Zustand:

- Roboter A stoppt mit STOP 2 (Effektive Bewegungspause).
- Roboter B bewegt sich mit voller Geschwindigkeit.

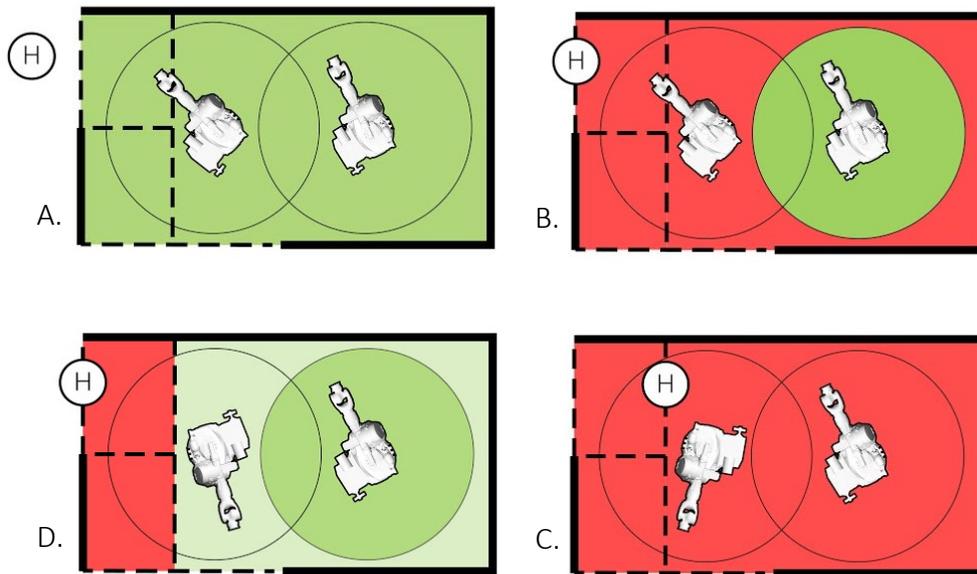


Abb. 23: Sicherheitsfunktionsdiagramm - vier mögliche Zustände in Abhängigkeit von Mensch (H) und Roboter.

Der Fräsprozess ist vergleichsweise viel einfacher und beinhaltet nur zwei Zustände. Die Sicherheitsschaltung der verschiedenen Zweige des FSM erfolgt beim Schließen des Tores des Eingangsbereichs. Während des Montageprozesses muss dieses Tor offenbleiben, um die kollaborative Funktionalität zu erhalten.

Ergebnisse

Im Laufe der Herstellungsdauer wurde der Prozess sowohl mit als auch ohne die MRK-Features getestet. Die vergleichende Analyse hat mehrere wichtige Punkte hervorzuheben:

Sicherheit

Der Prozess ohne die implementierten MRK-Funktionen erforderte zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen, um die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen zu erfüllen. Es gibt zwei Möglichkeiten, wie eine solche Sicherheit umgesetzt werden kann:

1. *Standardautomatisierung*: Die erste Möglichkeit besteht darin, das gleiche Sicherheitskonzept zu verwenden, das für den Fräsprozess umgesetzt wurde. Das bedeutet, dass, sobald ein menschlicher Arbeiter den Arbeitsbereich der Roboter betritt, ein Sicherheitssignal auf niedrig gesetzt wird und beide Roboter mit einem Sicherheits-STOP 1 anhalten, nachdem der Arbeitsbereich wieder frei ist, die

Wiederanlaufsperrung bestätigt werden muss und der Prozess vom Bediener wieder aufgenommen werden kann. Ein automatischer Neustart ist in diesem Fall nicht möglich. Diese Lösung erhöht die Fertigungszeit und erschwert den Montageprozess, wenn das Tor in einem ungünstigen Moment geöffnet wird, insbesondere während des automatischen Klebstoffauftrags. Diese Option wurde während der Projektlaufzeit nicht gründlich getestet, da sie das Prozess Timing zu stark stören würde.

2. *Handbetrieb*: Die zweite Möglichkeit besteht darin, beide Roboterarme in einem manuellen Modus zu betreiben, der in der Norm ISO 10218-1:2011 festgelegt ist (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2012). Im manuellen Modus müssen die Enable-Paniktasten in eine zentrale Position gedrückt und die Play-Taste gedrückt werden, um das Roboterprogramm ausführen zu können. Dies erhöht das Risiko durch menschliches Versagen, während der menschliche Bediener im Gefahrenfall (z.B. wenn der menschliche Arbeiter in der Bewegung des Roboterarms steht) voll verantwortlich ist, den Prozess zu stoppen. Der menschliche Bediener muss sich auch der Roboterbewegungen bewusst sein und diese vorhersagen können.

Andererseits wird das System durch die Umsetzung der zuvor beschriebenen MRK-Strategie vollautomatisch, ohne Kompromisse bei der Sicherheit oder Montagezeit einzugehen. In diesem Modus kann der Fertigungsroboter (verantwortlich für Kleben, Nageln und Fräsen) mit voller Geschwindigkeit laufen, auch wenn das Ausgangsgate geöffnet ist. Darüber hinaus ist der Zugang zum Gefahrenbereich in diesem Modus vollständig geschützt und es ist keine menschliche Überwachung für die Funktionalität des Sicherheitskonzepts erforderlich, wodurch das Risiko von menschlichen Fehlern reduziert und die Reaktionszeit des Systems verkürzt wird.

Personal

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist eine kontinuierliche menschliche Aktion erforderlich, um die Roboterarme zu bewegen. Die Folge dieser Notwendigkeit ist, dass bei einer Konfiguration mit zwei Robotern der Prozess eine ständige Anwesenheit und Aufmerksamkeit von mindestens zwei Bedienern erfordert. Durch die Umsetzung der MRK-Strategie kann dies auf nur einen Bediener pro System reduziert werden. Darüber hinaus erfordert eine solche Lösung nicht die volle Aufmerksamkeit des Bedieners. Der Eingriff eines menschlichen Bedieners ist nur bei abnormalem Verhalten oder einem Zustand (z.B. bei Ausfall des Werkstückgreifers) erforderlich. Das System kann den Bediener selbstständig erkennen und alarmieren.

Montagezeit

Wie bereits vorab erwähnt, ist die Montagezeit einer Kassette ein entscheidender Faktor für den Gesamtprozess. Um die Erwartung von 4 Kassetten pro Presse zu erfüllen, muss eine Kassette in weniger als 15 Minuten produziert werden. Da die Sicherheit durch den menschlichen Bediener im manuellen Modus gewährleistet wird, muss der Montageroboter nicht unbedingt gestoppt werden, wenn ein menschlicher Arbeiter den Gemeinschaftsraum betritt, ist die Montagezeit im Vergleich zur MRK-Strategie theoretisch kürzer. In Wirklichkeit erwies sich das jedoch als nicht der Fall, da es sich um einen gelegentlichen Bedienungsfehler beim Umgang mit dem Roboter handelte. Darüber hinaus ist es im Falle eines korrekten Timings der Übergabe der fertigen Kassette (d.h. wenn sich der Handling-Roboter noch im Stillstand befindet) möglich, Verzögerungen vollständig zu eliminieren.



Abb. 24: Pavillonansicht

Praxisbezug

Das vorgestellte Sicherheitskonzept basiert auf zertifizierten Industrieriegern und Programmierstrategien, die den aktuellen internationalen Normen entsprechen. Die Umsetzung ähnlicher MRK-Strategien in einen bestehenden Holzbau wäre daher relativ schnell und bedarf keiner umfangreichen Weiterentwicklung.

Diskussion

Die Fallstudie zeigte, dass es durch die Implementierung relativ einfacher MRK-Strategien in den Fertigungsfluss möglich ist, die Produktivität zu steigern und gleichzeitig die Flexibilität des Material- und Produktflusses zu erhalten. Während die Implementierung erfolgreich war, ist es jedoch möglich, die Produktivität weiter zu steigern und den Fertigungsprozess zu verbessern, indem die im Kapitel 1.2 beschriebene Strategie zur Geschwindigkeits- und Separationsüberwachung umgesetzt wird. Eine Lösung wäre die Implementierung einer optischen Belegungserkennung, die eine flexiblere Sensoranordnung ermöglicht. Eine weitere Lösung wäre, den Abstand der beweglichen Teile des Handhabungsroboters von der Kollaborationsraumgrenze zu vergrößern, um die Mindestsicherheitsabstände nach der internationalen Norm EN ISO 13855 einzuhalten.

Danksagung

Für die Zusammenarbeit während dieser Fallstudie geht unser Dank an die Kollegen des ICD's Martin Alvarez, Monika Göbel, Abel Groenewolt, Oliver David Krieg und Hans Jakob Wagner und an die Kollegen des ITKE's Prof. Jan Knippers, Lotte Aldinger, Simon Bechert und Daniel Sonntag. Für die Unterstützung während der Umsetzung geht unser Dank außerdem an Jorge Christie, Rebeca Duque Estrada, Robert Faulkner, Fabian Kannenberg, Guillaume Caussarieu, Bahar Al Bahar, Kyriaki Goti, Mathias Maierhofer, Valentina Soana und Babasola Thomas. Wir danken besonders der Firma Müllerblastein Bauwerke GmbH für die tatkräftige Unterstützung und Beratung während der Planung und Umsetzung, sowie den Unternehmen BEC GmbH und Bundesgartenschau Heilbronn 2019.

Publikationsliste

- Alvarez, M., Wagner, H. J., Groenewolt, A., Krieg, O. D., Menges, A., Sonntag, D., ... Knippers, J. (2019). The buga wood pavilion. In *Proceedings of 39th Annual Conference of ACADIA 2019*. Austin, TX. Im Druck.
- Kyjanek, O., Al Bahar, B., Vasey, L., Wannemacher, B., & Menges, A. (2019). Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Human Robot Collaboration in Timber Prefabrication. In *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (pp. 1223–1230). <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0164>
- Menges, A., Kyjanek, O., Schwinn, T. (2019). Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau: Potenziale für die Vorfertigung, in *Zukunft Bau*, BBSR, Bonn (pp. 10-11).
- Turney, D. (2018). How AR and a Robot Arm Could Give Construction a Leg Up. Retrieved July 29, 2019, from <https://www.autodesk.com/redshift/construction-robot/>

Veranstaltungsliste

- KUKA Innovation Award: Ausstellung des Prozessprototypen "CRoW" auf der Hannover Messe 2018, in dem die im Rahmen dieses Projektes entwickelte MRK-Strategie "Direkte Kollaboration" prototypisch implementiert und getestet wurde, vom 23. – 27. April 2018.
- Bundesgartenschau Heilbronn 2019: Ausstellung des Holzpavillons, der unter Anwendung der im Rahmen dieses Projektes entwickelten MRK-Strategie "Gelegentliche Koordination" gefertigt wurde, vom 17.4 – 6.10. 2019.
- 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Banff, Kanada: Vorstellung des Forschungsartikel "Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Human Robot Collaboration in Timber Prefabrication" (siehe oben), vom 21.5. – 24.5.2019.
- CLB Berlin: Ausstellung "Zukunft Bau: Forschung für Planung und Praxis" vom 19. Juni – 20. Juli 2019

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Prozesstypen nach VDI 2860
Lotter, Bruno. 1986. "Part function symbols for handling (VDI)" in "Manufacturing Assembly Handbook." *Manufacturing Assembly Handbook*: 39, Figure 5.5
- Abb. 2: Hauptkategorie Trennen im Herstellungsprozess nach DIN 8580.
Deutsches Institut für Normung. 2003. "DIN 8580:2003-09. Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung"
- Abb. 3: Beispielhafte Prozesskette mit für den Holzbau angepassten Symbolen
ICD – Universität Stuttgart. 2017.
- Abb. 4: Die letzten zwei Kategorien der MRK mit direkter Mensch-Roboter Interaktion
ISO, ISO. 2016. "ISO/TS 15066 Robots and robotic devices–Collaborative robots." International Organization for Standardization
- Abb. 5: Zulässige Kräfte auf den menschlichen Körper nach TS 15066
(links) Robotiq. 2015.

https://www.brinknews.com/wp-content/uploads/2015/09/robotiq_install-1025x610.jpg
(rechts) KUKA AG. 2015. http://www.industrie-expo.com/public/media/MediaExpos/product/LBR%20iiwa_Kollisionserkennung.jpg

Abb. 6: Diagramm der Kosten im Vergleich zum Automatisierungsgrad

Gorlach, Igor, and Oliver Wessel. 2008. "Graph of cost versus level of automation" In "Optimal Level Of Automation In The Automotive Industry". *Engineering Letters 1: 2*, Figure 2

Abb. 7: Beispiel für CLT „Plattentektonik“.

Oregon BEST. 2015. <http://www.oregon4biz.com/News-&-Media/CLT/pics/CLTconst.jpg>

Abb. 8: Zwei Dimensionen der Kooperation

Fiebich, Anika, Nhung Nguyen, and Sarah Schwarzkopf. 2015. "Two Dimensions of Cooperation" In "Cooperation With Robots? A Two-Dimensional Approach". *Collective Agency And Cooperation In Natural And Artificial Systems*: 35, Figure 1

Abb. 9: Beispiel für ein industrielles HMI-Panel

SEID Automation. 2015. <http://www.seid.it/site/wp-content/uploads/2015/03/UCP.jpg>

Abb. 10: Microsoft HoloLens

Microsoft. 2018. <https://img-prod-cms-rt-microsoft-com.akamaized.net/cms/api/am/imageFileData/RE1GJzk?ver=8b59&q=60&m=6&h=600&w=1778&b=%23FFFFFF&l=f&o=t&aim=true>

Abb. 11: Kooperative Sicherheitzenarien

ICD – Universität Stuttgart. 2018.

Abb. 12: von HRIs zu entwickeln, die nicht-intrusive Technologien wie AR und Wearables verwenden

ICD – Universität Stuttgart. 2017.

Abb. 13: Collaborative Robotic Workbench

ICD – Universität Stuttgart. 2018. https://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/kuka-innovation-award/ICD_KIA-Image08.jpg

Abb. 14: Prozessübersicht

ICD – Universität Stuttgart. https://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/kuka-innovation-award/ICD_KIA-Image03.png

Abb. 15: Kollaborative Befestigung der Balken

ICD – Universität Stuttgart. 2018. https://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/kuka-innovation-award/ICD_KIA-Image09.jpg

Abb. 16: Systemübersicht

ICD – Universität Stuttgart. 2018. https://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/kuka-innovation-award/ICD_KIA-Image04.png

Abb. 17: Augmented Reality First-Person-Ansicht

ICD – Universität Stuttgart. 2018. https://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/kuka-innovation-award/ICD_KIA-Image05.jpg

Abb. 18: Demonstrator

ICD – Universität Stuttgart. 2018. https://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/kuka-innovation-award/ICD_KIA-Image01.jpg

Abb. 19: Roboterzelle

ICD – Universität Stuttgart. 2019. http://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/uploads/2018/01/BUGA_Holz_Fabrication.jpg

Abb. 20: Holzkassettenstruktur
ICD – Universität Stuttgart. 2019.

Abb. 21: Roboter- Endeffektoren
ICD – Universität Stuttgart. 2018.

Abb. 22: Sicherheits-Setup-Übersicht
ICD – Universität Stuttgart. 2018.

Abb. 23: Sicherheitsfunktionsdiagramm - vier mögliche Zustände (von oben rechts - im Uhrzeigersinn)
ICD – Universität Stuttgart. 2018.

Abb. 24: Pavillonansicht
ICD – Universität Stuttgart. 2018. https://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/uploads/2018/01/BUGA_Holz_exterior_16-9.jpg

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: LoA-Skalen

Tab. 2: Auswertung des LoA

Literaturverzeichnis

Lenz, Claus, Suraj Nair, Markus Rickert, Alois Knoll, Wolfgang Rosel, Jurgen Gast, Alexander Bannat, and Frank Wallhoff. 2008. "Joint-Action For Humans And Industrial Robots For Assembly Tasks". *RO-MAN 2008 - The 17Th IEEE International Symposium On Robot And Human Interactive Communication*. doi:10.1109/roman.2008.4600655.

Meiling, John. 2010. *Continuous Improvement And Experience Feedback In Off-Site Construction*. Luleå: Department of Civil and Environmental Engineering, Luleå University of Technology.

Miller, Christopher A., and Raja Parasuraman. 2007. "Designing For Flexible Interaction Between Humans And Automation: Delegation Interfaces For Supervisory Control". *Human Factors: The Journal Of The Human Factors And Ergonomics Society* 49 (1): 57-75. doi:10.1518/001872007779598037.

Noble, David F. 2011. *Forces Of Production*. 1st ed. New York: Transaction Publishers.

Parasuraman, R., T.B. Sheridan, and C.D. Wickens. 2000. "A Model For Types And Levels Of Human Interaction With Automation". *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics - Part A: Systems And Humans* 30 (3): 286-297. doi:10.1109/3468.844354.

Peshkin, M.A., J.E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, C.A. Moore, R.B. Gillespie, and P. Akella. 2001. "Cobot Architecture". *IEEE Transactions On Robotics And Automation* 17 (4): 377-390. doi:10.1109/70.954751.

Quigley, Morgan, Brian P. Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler and Andrew Ng. 2009. "ROS : an open-source Robot Operating System".

- Quigley, Morgan, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler, and Andrew Mg. 2009. "ROS: An Open-Source Robot Operating System." *ICRA Workshop on Open Source Software* 3 (3.2): 5. doi:<http://www.willowgarage.com/papers/ros-open-source-robot-operating-system>.
- Roschelle, Jeremy, and Stephanie D. Teasley. 1995. "The construction of shared knowledge in collaborative problem solving." In *Computer supported collaborative learning*, pp. 69-97. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sebanz, Natalie, Harold Bekkering, and Guenther Knoblich. 2006. "Joint Action: Bodies And Minds Moving Together". *Trends In Cognitive Sciences* 10 (2): 70-76. doi:10.1016/j.tics.2005.12.009.
- Strabala, Kyle Wayne, Min Kyung Lee, Anca Diana Dragan, Jodi Lee Forlizzi, Siddhartha Srinivasa, Maya Cakmak, and Vincenzo Micelli. 2013. "Towards Seamless Human-Robot Handovers". *Journal Of Human-Robot Interaction* 2 (1): 112-132. doi:10.5898/jhri.2.1.strabala.
- athundt, Chris Paxton, Ashkan372, Shahriar Sefati, Alex, Nathan Smith, Risto Kojcev, and Oliver Zettinig. 2017. "Ahundt/Grl: Grl v4.1.0 Cleanup + IK Improvements," January. doi:10.5281/ZENODO.260242.
- Autodesk Inc. 2019. "Overview | Viewer | Autodesk Forge." https://forge.autodesk.com/en/docs/viewer/v2/developers_guide/overview/.
- Bratman, Michael E. "Shared intention." *Ethics* 104, no. 1 (1993): 97-113.
- Chan, Wesley P., Chris A.C. Parker, H.F. Machiel Van der Loos, and Elizabeth A. Croft. 2012. "Grip Forces And Load Forces In Handovers". *Proceedings Of The Seventh Annual ACM/IEEE International Conference On Human-Robot Interaction - HRI '12*. doi:10.1145/2157689.2157692.
- Colgate, James E. and Peshkin, Michael A.. 1997. *Cobots*. 5952796A. 1996. USA.
- Dattalo, Amanda. 2018. "ROS/Introduction." <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.
- Deplazes, Andrea. 2005. *Architektur Konstruieren*. Basel: Birkhäuser.
- Deutsches Institut für Normung. 2003. "DIN 8593-0:2003-09 Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe"
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2012. "DIN EN ISO 10218-1: Industrieroboter - Sicherheitanforderungen - Teil 1: Roboter."
- Fiebich, Anika, Nhung Nguyen, and Sarah Schwarzkopf. 2015. "Cooperation With Robots? A Two-Dimensional Approach". *Collective Agency And Cooperation In Natural And Artificial Systems*, 25-43. doi:10.1007/978-3-319-15515-9_2.
- Frohm, Jörgen, Veronica Lindström, Mats Winroth, Mats and Johan Stahre. 2008. "Levels of Automation in Manufacturing". *Ergonomia - International Journal of Ergonomics and Human Factors*. 30. 181-207.
- Gibbs, Samuel. 2016. "Mercedes-Benz Swaps Robots for People on Its Assembly Lines." *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/technology/2016/feb/26/mercedes-benz-robots-people-assembly-lines>.

- Gorlach, Igor, and Oliver Wessel. 2008. "Optimal Level Of Automation In The Automotive Industry". *Engineering Letters* 1 (16).
http://www.engineeringletters.com/issues_v16/issue_1/EL_16_1_21.pdf.
- Green, Scott A., Mark Billingham, XiaoQi Chen, and J. Geoffrey Chase. 2008. "Human-Robot Collaboration: A Literature Review And Augmented Reality Approach In Design". *International Journal Of Advanced Robotic Systems* 5 (1): 1. doi:10.5772/5664.
- Grigore, Elena Corina, Kerstin Eder, Anthony G. Pipe, Chris Melhuish, and Ute Leonards. 2013. "Joint Action Understanding Improves Robot-To-Human Object Handover". *2013 IEEE/RSJ International Conference On Intelligent Robots And Systems*. doi:10.1109/iros.2013.6697021.
- Haddadin, Sami, and Elizabeth Croft. 2016. "Physical Human-Robot Interaction". In *Springer Handbook Of Robotics*, 2nd ed., 1835-1874. Switzerland: Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1_69
- Hägele, Martin, Klas Nilsson, J. Norberto Pires, and Rainer Bischoff. 2016. "Industrial Robotics". In *Springer Handbook Of Robotics*, 2nd ed., 1385-1422. Switzerland: Springer, Cham. doi: <http://978-3-319-32552-1>.
- Helms, E., R. D. Sehraft, and M. Hägele. 2002. "Rob@work: Robot Assistant in Industrial Environments." *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 399–404. doi:10.1109/ROMAN.2002.1045655.
- Hennersperger, Christoph, Bernhard Fuerst, Salvatore Virga, Oliver Zettinig, Benjamin Frisch, Thomas Neff, and Nassir Navab. 2017. "Towards MRI-Based Autonomous Robotic US Acquisitions : A First Feasibility Study." *IEEE Transactions on Medical Imaging* 36 (2): 538–48.
- ISO, ISO. "ISO/TS 15066 Robots and robotic devices–Collaborative robots." *International Organization for Standardization* (2016).
- Holzbau Deutschland - Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband Deutsches Baugewerbe. 2018. „Statistiken 2018“. https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Statistiken_2018.pdf
- Kress, Bernard C, and William J Cummings. 2017. "Towards the Ultimate Mixed Reality Experience : HoloLens Display Architecture Choices." *SID 2017 Digest of Technical Papers* 48 (1): 127–31. doi:<https://doi.org/10.1002/sdtp.11586>.
- Kuffner, J.J., and S.M. LaValle. 2000. "RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning." *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)* 2 (April): 995–1001. doi:10.1109/ROBOT.2000.844730.
- Jones, Kell, Julia Stegemann, Judith Sykes, and Peter Winslow. 2016. "Adoption Of Unconventional Approaches In Construction: The Case Of Cross-Laminated Timber". *Construction And Building Materials* 125: 690-702. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.088.
- Karlton, Johan. 2007. *On Stage*. Linköping: Department of Management and Engineering, Linköping University.
- KUKA AG. 2019. "KUKA Sunrise Cabinet." <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-controllers/kuka-sunrise-cabinet>.
- Kolb, Josef. 2008. *Systems In Timber Engineering*. Basel: Birkhäuser.

- Krüger, J., T. K. Lien, and A. Verl. 2009. "Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2): 628–46. doi:10.1016/j.cirp.2009.09.009.
- Lee, Jay, Behrad Bagheri, and Hung An Kao. 2015. "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems." *Manufacturing Letters* 3. Society of Manufacturing Engineers (SME): 18–23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2000. "The Measurement of Scientific and Technological Activities - Oslo Manual".
- Parasuraman, Raja, Thomas B Sheridan, and Christopher D Wickens. 2000. "A Model for Types and Levels of Human Interaction." *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A Systems and Humans* 30 (3): 286–97.
- SGS-TÜV Saar GmbH. 2016. "Certificate No XDW16\9667."
- Sheridan, Thomas B., and William L. Verplank. 1978. "Human and Computer Control of Undersea Teleoperators." In *NASA. Ames Res. Center The 14th Ann. Conf. on Manual Control*, 343–57. Cambridge: United States.
- Schumpeter, Joseph A., and Redvers Opie. 1934. *The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle*. Harvard University Press.
- Sucan, Ioan Alexandru, and Sachin Chitta. 2011. "MoveIt!" <http://moveit.ros.org>.
- Thobbi, Anand, Ye Gu, and Weihua Sheng. 2011. "Using Human Motion Estimation For Human-Robot Cooperative Manipulation". *2011 IEEE/RSJ International Conference On Intelligent Robots And Systems*. doi:10.1109/iros.2011.6094904.
- Walker, Michael, Hooman Hedayati, Jennifer Lee, and Daniel Szafir. 2018. "Communicating Robot Motion Intent With Augmented Reality". *Proceedings Of The 2018 ACM/IEEE International Conference On Human-Robot Interaction - HRI '18*. doi:10.1145/3171221.3171253.
- Wannasuphprasit, W., R.B. Gillespie, J.E. Colgate, and M.A. Peshkin. 2018. "Cobot Control". *Proceedings Of International Conference On Robotics And Automation*. doi:10.1109/robot.1997.606888.
- Willmann, Jan, Michael Knauss, Tobias Bonwetsch, Anna Aleksandra Apolinarska, Fabio Gramazio, and Matthias Kohler. 2016. "Robotic Timber Construction - Expanding Additive Fabrication to New Dimensions." *Automation in Construction* 61. Elsevier B.V.: 16–23. doi:10.1016/j.autcon.2015.09.011.
- Windmark, Christina, P. Gabrielson, Carin Andersson, and J.E. StEhl. 2012. "A Cost Model For Determining An Optimal Automation Level In Discrete Batch Manufacturing". *Procedia CIRP* 3: 73-78. doi:10.1016/j.procir.2012.07.014.
- Zeller, Matt, Alex Turner, Grbury, and Brandon Bray. 2018. "HoloLens (1st Gen) Hardware Details." <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/hololens-hardware-details>.
- Takayama, Leila, Wendy Ju, and Clifford Nass. 2008. "Beyond Dirty, Dangerous And Dull". *Proceedings Of The 3Rd International Conference On Human Robot Interaction - HRI '08*, 25-32. doi:10.1145/1349822.1349827.