

Digitale Planung hybrider Arbeitssysteme

Planungsprozess am Beispiel einer Leichtbauroboter-Zelle

Jochen Deuse^{1,2}, André Barthelmey¹, Vanessa Weißkamp¹

¹ Institut für Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund

² Advanced Manufacturing/ Industry 4.0 School of Mechanical and Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Technology Sydney

1. Einleitung

Die Entwicklung hin zu individualisierten Produkten stellt insbesondere den Hochlohnstandort Deutschland in Bezug auf die Variabilität in den Produktionsprozessen vor neue Herausforderungen (Delang et al. 2017). Diese können durch konventionelle Automatisierungslösungen aufgrund hoher Flexibilitätsanforderungen nicht bewältigt werden (Berg/Reinhart 2017). Ein großes Potenzial hingegen verspricht eine engere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, die bis zur Interaktionsform Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ausgeprägt werden kann (Müller et al. 2019). Die zu diesem Zweck entwickelten Leichtbauroboter (LBR) rücken daher im Zuge der Digitalisierung und Industrie 4.0 verstärkt in den Fokus. Die Anwendungen solcher Systeme in der Industrie nehmen stetig zu, sind jedoch in den Unternehmen noch nicht flächendeckend verbreitet (Oubari et al. 2018; Selevsek/Köhler 2018). Als Gründe sind insbesondere aufwändige Planungsprozesse, die für einen wirtschaftlichen Einsatz von Arbeitsplätzen mit MRK heute noch zwingend erforderlich sind, zu nennen (Ranz et al. 2017).

Eine im Rahmen des Forschungsvorhabens „KoMPI“ entwickelte digitale Planungsunterstützung für hybride Arbeitssysteme verkürzt diesen Planungsprozess (BMBF 2017). Die Basis der Planungsunterstützung bildet die Software „ema Work Designer“, welche ein realitätsgetreues Abbild von MRK-Systemen ermöglicht. Ziel der Nutzung einer digitalen Simulation ist die zielgerichtete Konzeption der Schnittstellen zwischen Mensch, Technik und Organisation. Auf diese Weise sollen die Stärken des Menschen wie Flexibilität, Kreativität und Sensitivität mit

den Vorteilen des Roboters wie Kraft, Ausdauer und Präzision kombiniert werden, so dass ein sicheres und wirtschaftliches System entsteht.

Die Planungsunterstützung ist in ein ganzheitliches Planungskonzept eingebunden, das alle Interaktionslevel von der Koexistenz bis hin zur Kollaboration berücksichtigt (vgl. Bauer et al. 2016). Zur Sicherung der Anwendungsfreundlichkeit und Eignung für KMU fand während der Entwicklung der einzelnen Schritte ein intensiver Austausch mit Anwenderunternehmen statt.

2. Entwicklung der Planungsunterstützung

Die Entwicklung der Planungsunterstützung erfolgte aus der Motivation heraus, dass die Forschung bislang noch nicht signifikant zu einer zielgerichteten und intuitiven Einführung von MRK beitragen konnte. Daher wird in diesem Kapitel zunächst der relevante Stand der Technik skizziert.

2.1 Stand der Technik

Das Interesse an hybriden Arbeitssystemen in der Industrie wächst stetig, sodass eine Vielzahl an Unternehmen bestrebt ist, Kompetenzen aufzubauen, um Leichtbauroboter selbstständig in ihre Arbeitssysteme zu integrieren. Insbesondere die Erstintegration ist jedoch oft ein sehr langer und aufwendiger Prozess, der Unternehmen vor große Herausforderungen stellt. Für einzelne Aspekte der Integration, insbesondere der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter, wurden in der Wissenschaft verschiedene Ansätze entwickelt. In einer frühen Arbeit entwickelte Beumelburg (2005) eine fähigkeitsorientierte Zuteilung, die auf Basis von Beschreibungen der Arbeitsvorgänge und unter dem Einsatz von genetischen Algorithmen eine hinsichtlich verschiedener Zielgrößen (Zeit, Kosten, Ergonomie) optimierte Aufgabenverteilung bestimmt. Takata/Hirano (2011) setzten ebenfalls genetische Algorithmen ein, um die verschiedenen Szenarien manuell, automatisiert und hybrid zu vergleichen.

Andere Ansätze stellen die Simulation von MRK als zentrales Werkzeug in den Mittelpunkt, so z. B. das Forschungsvorhaben „MANUSERV“. Aufbauend auf einer formalen Beschreibung des Arbeitsablaufs werden unter Einsatz der Planungssprache „Planning Domain Definition Language“ (PDDL) automatisierungsrelevante Aspekte konkreten Robotersystemen zugeordnet und Lösungskonzepte vorgeschlagen, die anschließend simuliert werden (Heinze et al. 2016; Hengstebeck et al. 2016). Hierbei werden allerdings die Spezifika unterschiedlicher Interaktionsformen zwischen Mensch und Roboter nicht berücksichtigt, die jedoch einen erheblichen Einfluss auf den Aufbau und die Wirtschaftlichkeit des hybriden Arbeitssystems haben.

Die Wirtschaftlichkeit eines MRK-Systems wird i.d.R. neben den Investitionskosten maßgeblich durch die erreichbaren Zykluszeiten und davon abhängig der erreichbaren Stückzahl bestimmt. Durch die herstellerabhängigen komplexen Robotersteuerungen sowie erforderlichen reduzierten Geschwindigkeiten bei der Annäherung an den Menschen können realistische Zeiten jedoch ohne eine Simulation nur sehr ungenau bestimmt werden. Die Verfahrenswege des Roboters können sich bauart- und herstellerabhängig ebenso wie das Beschleunigungsverhalten unterscheiden. Software, die es ermöglicht, die Bewegungen eines Menschen und eines Roboters gleichzeitig abzubilden, ist erst in den letzten Jahren entwickelt worden und weiterhin Gegenstand der Forschung (Busch 2016; Ore et al. 2015; Ore et al. 2017; Tsarouchi et al. 2017).

Nachteilig an den vorgestellten Vorarbeiten für den praktischen Einsatz von MRK in Unternehmen ist die Fokussierung lediglich eines Teilaspekts bei der Integration von Leichtbaurobotern. So wird z. B. die Auswahl eines geeigneten Arbeitssystems ebenso wenig berücksichtigt wie sicherheitstechnische Aspekte. Ein umfassenderer Ansatz von Schröter (2018) adressiert den gesamten Arbeitsablauf, setzt jedoch keine Simulation ein, so dass in der Planungsphase keine Überprüfung der Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit möglich ist.

Im Forschungsvorhaben KoMPI wurde daher eine ganzheitliche Planungssystematik für hybride Arbeitssysteme mit Mensch-Roboter-Kollaboration entwickelt. Die Systematik ist nicht mensch- oder technikzentriert ausgerichtet, sondern definiert ein Arbeitssystem als soziotechnisches System, in dem die Faktoren Mensch-Technik-Organisation sowie die Schnittstellen zwischen diesen gleichermaßen Berücksichtigung finden. Darüber hinaus ist die Planungssystematik praxisnah ausgestaltet, sodass sie leicht in Unternehmen anwendbar ist und durch Simulation ein gesichertes und gut zu visualisierendes Ergebnis liefert. Auf Basis dieser Anforderungen ist ein fünfstufiger Prozess wie in Abbildung 1 entstanden.

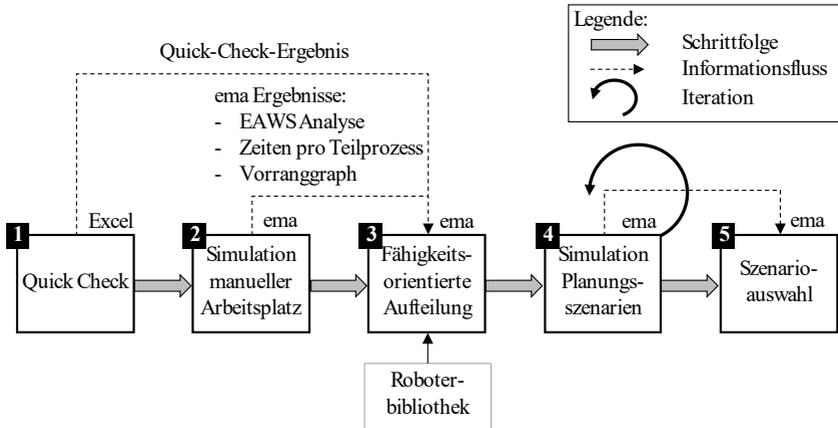


Abbildung 1: Planungssystematik für hybride Arbeitssysteme (Weißkamp et al. 2019b)

Im Sinne einer systemischen Vorgehensweise werden mithilfe einer Potenzialanalyse, dem „Quick-Check“, die Arbeitsplätze mit dem höchsten MRK-Potenzial identifiziert (Schritt 1). Die sich anschließende Simulation des existierenden manuellen Arbeitssystems (Schritt 2) bildet die Grundlage für die iterativen Schritte der Arbeitsverteilung zwischen Mensch und Roboter (Schritt 3) und der Simulation der Planungsszenarien hybrider Arbeitsplätze (Schritt 4). Abschließend werden die entstandenen Szenarien in einer arbeitswissenschaftlichen Bewertung analysiert und unter Berücksichtigung u.a. der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ausgewählt (Schritt 5). Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Um die Nutzung der Systematik auch für KMU zu ermöglichen, basiert diese auf der einfach und intuitiv zu bedienenden Simulationssoftware „ema Work Designer“ und auf Office-Produkten. Zielgruppe für die Anwendung der Systematik sind Arbeitsplaner und Prozessingenieure. Ein umfangreiches Vorwissen im Bereich der Automatisierung oder MRK ist nicht erforderlich.

2.2 Quick-Check

Im Sinne einer systematischen Vorgehensweise erfolgt im ersten Schritt eine Identifikation geeigneter Arbeitssysteme und Prozesse für den Einsatz von MRK in Form einer Potenzialanalyse. Zur Durchführung der Potenzialanalyse wurde der Quick-Check entwickelt. Sein Ziel besteht darin, innerhalb einer Stunde ein Arbeitssystem bewerten und mit anderen Systemen in Bezug auf das MRK-Potenzial vergleichen zu können. Für die Entwicklung wurden mit der Wirtschaftlichkeit und der ergonomischen Verbesserung einerseits die beiden Hauptgründe für den Einsatz von MRK betrachtet (Bauer et al. 2016). Andererseits wurden mit der

technischen Machbarkeit und der Sicherheit die größten Hemmnisse bei der Umsetzung analysiert (Oubari et al. 2018). Für eine erste Abschätzung des Potenzials für ein hybrides Arbeitssystem ist die technische Machbarkeit besonders geeignet (Selevsek/Köhler 2018), während eine detaillierte Analyse der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit erst durch Simulation möglich wird (Busch et al. 2013). Auch die detaillierte ergonomische Bewertung ist erst mit einem bestimmten Planungsfortschritt möglich und wird ebenfalls durch die Simulation gestützt. Daher kann für diese Faktoren nur eine Abschätzung vorgenommen werden. Aus diesen Überlegungen heraus wurden die fünf Kategorien Bauteile, Zu- und Abführung, Verbesserungspotenzial, Sicherheit und Sonstiges mit je bis zu fünf Bewertungskriterien erarbeitet (Ermer et al. 2019).

Die Bewertung der Kriterien erfolgt über eine Skala von null bis vier Punkten. Für eine einfache Anwendung wird die Bewertung durch Beispiele unterstützt (s. Abbildung 2).

Prozesseinflussgrößen					Bewertung der Teilprozess	
					1	2
					Teilprozess 1	Teilprozess 2
Formstabilität	Behalten die Bauteile ihre Form trotz der Prozesskräfte bei? Verformen sich die Teile allein durch den Einfluss von Schwer- oder Gewichtskräften?				1	Bemerkung:
						
						
	formlabil, biegeschlaff	Verformung bei geringer Kräfteinwirkung	Verformung bei Kräfteinwirkung	Verformung bei hoher Kräfteinwirkung		
0 Punkte	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte	4 Punkte	Pkt.	Pkt.
Handhabung	Können die Bauteile leicht gegriffen werden? Sind eindeutige Greifflächen vorhanden?				1	Bemerkung:
						
	nein	mit Aufwand		ja		
	0 Punkte	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte		

Abbildung 2: Auszug aus dem Quick-Check in der Kategorie Bauteile

Ein Arbeitssystem kann eine Vielzahl von Teilprozessen enthalten, die bei der Bewertung des Automatisierungspotenzials große Unterschiede aufweisen können, wie z. B. die Montage eines biegeschlaffen Kabels und eines stabilen Gehäuses in einem Arbeitssystem. Der Anwender muss daher im ersten Schritt die Grenzen der Teilprozesse festlegen. Dies erfolgt aufgrund der Individualität der Arbeitsinhalte

selbstständig, wobei ein Methodenniveau entsprechend des Systems vorbestimmter Zeiten MTM-UAS (Universelles Analysier-System) für die Serienfertigung empfohlen wird (Ermer et al. 2019).

Das erste Ergebnis des Quick-Checks ist ein Prozentwert für das Automatisierungspotenzial, das die Eignung jedes Teilprozesses hinsichtlich der Übernahme durch einen Leichtbauroboter angibt. Wird ein Teilprozess in drei von insgesamt 13 Kriterien mit null Punkten bewertet, wird der gesamte Teilprozess mit null Punkten bewertet und ist aufgrund des schlechten Aufwand-Nutzen-Verhältnisses nicht für eine Automatisierung geeignet.

Das zweite Ergebnis des Quick-Checks bildet das MRK-Potenzial, das die Eignung des Gesamtprozesses für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter widerspiegelt. Diese ist besonders hoch ausgeprägt, wenn einzelne Teilprozesse sehr gut durch den Roboter übernommen werden können, andere dagegen nur der Mensch durchführen kann und somit erst durch die Kombination ihrer Fähigkeiten das Potenzial dabei zur Entfaltung kommt. Über den Vergleich der Automatisierbarkeit und des MRK-Potenzials für verschiedene durchgeführte Potenzialanalysen wird das Arbeitssystem mit dem höchsten Potenzial ausgewählt.

Während seiner Entwicklung und zu Validierungszwecken wurde der Quick-Check bei verschiedenen Anwendungspartnern innerhalb des Forschungsvorhabens KoMPI und bei verschiedenen Unternehmen eines Industriearbeitskreises angewendet. Das online frei verfügbare Werkzeug bietet einen einfachen Einstieg in den Bereich MRK und kann als Teil der Planungssystematik oder auch separat genutzt werden (Ermer et al. 2019).

2.3 Simulation des manuellen Arbeitsplatzes und fähigkeitsorientierte Aufteilung der Arbeitsinhalte

Für die folgenden Schritte, bei denen es sich um den Beginn der digitalen Planung des MRK-Arbeitssystems handelt, muss das ausgewählte Arbeitssystem – sofern noch nicht vorhanden – in ein Modell überführt werden, das in der Software „ema Work Designer“ simuliert werden kann (Schritt 2). Dieses Modell bildet die Grundlage für die Erstellung möglicher Planungsszenarien im dritten Schritt und die Referenz hinsichtlich der arbeitswissenschaftlichen Kriterien, die letztendlich zur Szenarien-Bewertung herangezogen werden können.

Trotz der in der Literatur existierenden Ansätze zur Aufteilung von Arbeitsinhalten zwischen Mensch und Roboter stellt dieser Schritt für Unternehmen weiterhin eine große Herausforderung und ein Hemmnis bei der Einführung von MRK-Szenarien dar (Oubari et al. 2018). Eine Automatisierung der Aufteilung zur Reduzierung der Komplexität für den Anwender findet in der Praxis ebenfalls wenig

Akzeptanz, da die Einbringung des Erfahrungswissens des Prozessplaners und unternehmensspezifischer Rahmenbedingungen essenzielle Voraussetzungen darstellen. Aus diesem Grund basiert die Zuteilung auf wenigen vorhandenen oder aus der Simulation des manuellen Arbeitsplatzes abzuleitenden Eingangsinformationen und einfachen Zuteilungsregeln.

Einen ersten technischen Hinweis auf die Eignung eines Arbeitsinhaltes zur Ausführung durch einen Menschen oder einen Roboter liefern die Ergebnisse für die Teilprozesse im Quick-Check (Weßkamp et al. 2019b). Einer der wesentlichen Treiber für den Einsatz von MRK ist jedoch die ergonomische Verbesserung. Zusätzlich zur ersten Abschätzung des ergonomischen Verbesserungspotenzials im Quick-Check wird auf MTM EAWS (Ergonomic Assessment Work Sheet), ein etabliertes und im „ema Work Designer“ integriertes Werkzeug zur ergonomischen Analyse und Gestaltung von Arbeitssystemen, zurückgegriffen (Fritzsche 2010). EAWS berücksichtigt allerdings den Gesamtablauf für einen Beschäftigten und bezieht ebenfalls die Wiederholhäufigkeit innerhalb einer Schicht mit ein. Aus diesem Grund ist eine einfache Übertragung des EAWS-Verfahrens auf die Bewertung der Teilprozesse nicht möglich. Daher wird ein Ergonomie-Indikator auf Teilprozessbasis aus dem zeitunabhängigen Bereich der Körperhaltung und der wirkenden Kräfte abgeleitet und in die drei Kategorien grün (kein Handlungsbedarf), gelb (Verbesserungen empfohlen) und rot (Verbesserungen notwendig) unterteilt.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz sind neben der Ergonomie die Prozesszeiten und Kenntnisse über die Bearbeitungsreihenfolgebeschränkungen für die Teilprozesse von besonderer Bedeutung. Die Prozesszeiten können vorhandenen Zeitstudien oder der Simulation entnommen werden. Die Reihenfolgebeschränkungen werden einem Vorranggraphen entnommen oder durch die Prozesskenntnis des Anwenders abgebildet.

Auf Basis dieser Informationen erfolgt die Zuteilung der Teilprozesse zwischen Mensch und Roboter unter Beachtung von drei Logikregeln.

- Für Teilprozesse mit einer roten Ergonomie-Bewertung erfolgt die Übernahme durch den Roboter, sofern eine Automatisierung durchführbar ist. Erfahrungswerte zeigen, dass dies bei einer Teilprozessbewertung des Quick-Checks über 50 % i.d.R. gegeben ist.
- Teilprozesse mit dem höchsten Wert aus dem Quick-Check werden dem Roboter zugeteilt.
- Layout und Zykluszeitrestriktionen müssen beachtet werden.

Unter Berücksichtigung dieser Regeln wird die Zuteilung individuell nach den Zielen des Unternehmens getroffen. Repräsentative Hauptziele von Unternehmen sind z. B. die Reduzierung der Zykluszeit, die Verbesserung der Ergonomie oder die Verbesserung der Mitarbeiterauslastung. Bei der Machbarkeit eines flexiblen Robotereinsatzes kann außerdem die Reaktion auf schwankende Stückzahlen ein Ziel darstellen (Müller et al. 2019).

Durch die Erweiterung des „ema Work Designer“ im Verlaufe des Forschungsvorhabens kann diese Zuteilung mittlerweile per Drag and Drop durchgeführt werden. Grundlegende Bewegungsinformationen werden bei der Umverteilung beibehalten und tragen so zu geringeren Aufwänden bei der Simulationserstellung bei.

2.4 Simulation des hybriden Arbeitssystems und arbeitswissenschaftliche Bewertung der Planungsszenarien

Die Zuteilung der Arbeitsinhalte erfolgt nicht rein sequenziell, sondern iterativ mit Hilfe der Simulation des hybriden Arbeitssystems. Eine Roboter- und Sensorbibliothek ermöglicht eine schnelle Roboterauswahl und die Übertragbarkeit der Bewegungen zwischen Mensch und verschiedenen Robotertypen zur Entwicklung verschiedener Planungsszenarien.

Für die zielgerichtete Auswahl des für die Umsetzung am besten geeigneten Planungsszenarios muss eine Vergleichbarkeit der Szenarien hinsichtlich ihres konkreten Nutzens für das Unternehmen erreicht werden. Dieser Nutzen ist entweder anhand der Wirtschaftlichkeit oder über die ergonomische Verbesserung für die Mitarbeiter messbar (Oubari et al. 2018; Thomas et al. 2015). Allerdings sollten ungünstige organisatorische Anpassungen wie längere Laufwege und veränderte Materialversorgung verhindert werden. Darüber hinaus darf die Erzielung dieses Nutzens die Arbeitssicherheit nicht gefährden. Zur Bewertung der Planungsszenarien werden daher mit Sicherheit, Ergonomie, Wirtschaftlichkeit und organisatorischen Anpassungen vier arbeitswissenschaftliche Betrachtungsgegenstände als Kriterien ausgewählt:

Zum Ausschluss von Gefährdungen ist es erforderlich, dass eine nicht gegebene Sicherheit als K.O.-Kriterium ausgeprägt wird und somit zum Ausschluss bzw. zu einem zwingenden Änderungsbedarf des MRK-Planungsszenarios führt. Aufgrund dieser zentralen Bedeutung müssen Kollisionen, Gefährdungssituationen oder ungünstige Belastungen, z. B. nach ISO/TS 15066 (DIN 2016), DIN EN 349 (DIN) und EAWS (Schaub et al. 2012) erkannt und bewertet werden. Auch eine inakzeptable Bewertung der Ergonomie bildet einen Ausschlussgrund für das erstellte Szenario. Sind Gefährdungen ausgeschlossen, erfolgt die Bewertung der Ergonomie, Wirtschaftlichkeit und organisationaler Kriterien nach dem in Abbildung 3 dargestellten Vorgehen.

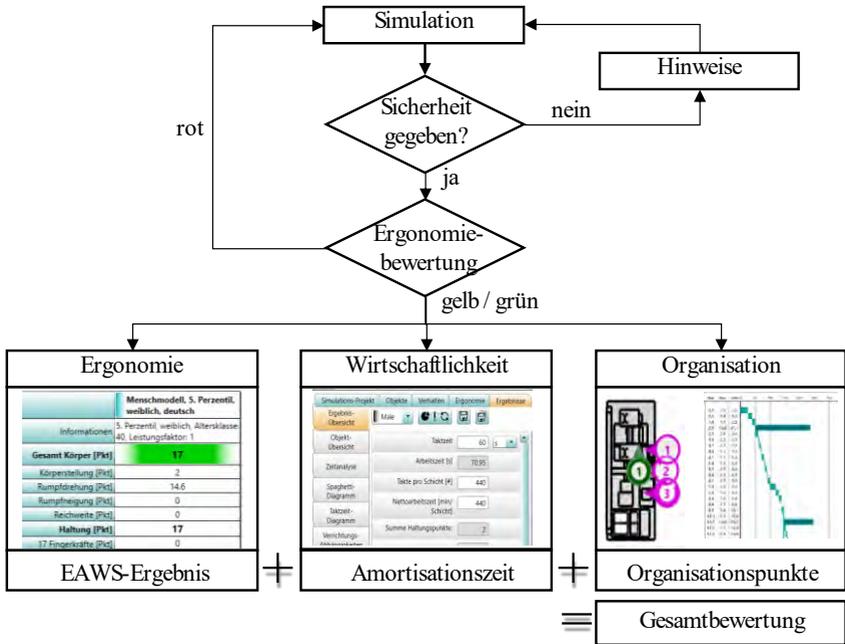


Abbildung 3: Schema der arbeitswissenschaftlichen Bewertung (Seckelmann et al. 2019)

Während für die Ergonomie-Bewertung der Ergonomie-Indikator zugrunde gelegt wird, werden für die Wirtschaftlichkeit die etablierten Verfahren der Kapitalwertmethode oder der Amortisationszeit, ergänzt um Hinweise zu MRK spezifischen Kosten wie Integrations-, Schulungs- und Akzeptanzförderungskosten, verwendet. Im Bereich der organisatorischen Anpassungen werden veränderte Materialversorgung, Laufwege und die Auslastung im Vergleich zur Ausgangssituation erfasst.

Da Unternehmen den Kriterien in Abhängigkeit der individuellen Unternehmensstrategien und -branchen einen unterschiedlichen Stellenwert einräumen, ist eine individuelle Gewichtung dieser Kriterien erforderlich. Durch die Normierung der Ergebnisse aus den drei Bewertungen erfolgt eine Gesamtbewertung des Planungsszenarios.

3. Validierung der Planungssystematik

Im Rahmen des Projekts KoMPI konnten bereits Teilschritte der Planungssystematik innerhalb industrieller Anwendungsfälle der Unternehmenspartner durchgeführt werden. In Weßkamp et al. (2019b) wurde mit Unterstützung des Quick-Checks und der Drag and Drop-Lösung zur Verschiebung der Arbeitsinhalte innerhalb der Simulation ein Planungsszenario für eine MRK-Montagelinie bei der Albrecht JUNG GmbH & Co. KG entworfen. In Seckelmann et al. (2019) konnte die Bestätigung des Nutzens dieser Planungsalternative für das Unternehmen mit der arbeitswissenschaftlichen Bewertung nachgewiesen werden.

Für eine Validierung der vollständigen Planungssystematik wurde die Montage einer Zirkulationspumpe innerhalb eines Montagesystems im Industrial Engineering Trainings Centre des Instituts für Produktionssysteme betrachtet. Ausgehend von dem manuellen Montageprozess wurden die einzelnen Schritte durchlaufen, um ein MRK-Szenario zu gestalten und zu bewerten. Für die Erweiterung des manuellen Arbeitsplatzes zum MRK-System standen mit dem kuka iiwa 7 und dem UR 10 zwei Leichtbauroboter sowie Zuführtechnik mit optischer Bauteilerkennung zur Verfügung.

3.1 Quick-Check Anwendung

Für den ersten Schritt der Planungssystematik erfolgte die Potenzialanalyse mit Hilfe des Quick-Checks für die Pumpenmontage am manuellen Arbeitsplatz. Der Montageprozess wurde dazu in neun Ablaufabschnitte unterteilt, die einzeln bewertet wurden. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieses Quick-Checks.

Bewertung der Teilprozesse									
Prozesseinflussgrößen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Gehäuse vor-bereiten	Pumpe mit Rohr	Ver-schrauben	Gehäuse auf Pumpe	Ver-schrauben	Platine einlegen	Stecker mit Platine verbinden	Gehäuse-Deckel Ver-schrauben	Produkt ablegen
Detaillauswertung (Übertrag)									
Bauteile - Ergebnis [Potential in %]	12,00	12,00	70,00	75,00	70,00	70,00	45,00	70,00	90,00
Zu- und Abführung - Ergebnis [Potential in %]	25,00	58,33	41,67	50,00	41,67	50,00	50,00	33,33	75,00
Verbesserungspotential - Ergebnis [%]	37,50	37,50	12,50	25,00	12,50	25,00	37,50	12,50	62,50
Sicherheit - Ergebnis [%]	75,00	75,00	125,00	75,00	125,00	125,00	75,00	125,00	125,00
Sonstiges - Ergebnis [%]	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	0,00	50,00	50,00
Gesamtergebnis									
Summe Punkte je Teilprozess	23	30	27	28	27	29	21	26	39
Anzahl der bewerteten Kriterien (max. 13)	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Maximale Punkte über alle Kriterien (max. 52 Punkte)	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Durchschnittliche Punktzahl je Kriterium	1,8	2,3	2,1	2,2	2,1	2,2	1,6	2,0	3,0
Prozentwert: Anteil der erreichten Punktzahl	0,0	62,5	56,3	58,3	56,3	60,4	0,0	54,2	81,3
Rangfolge der Teilprozesse	8	2	5	4	5	3	8	7	1
Gesamtbewertung der Automatisierbarkeit	47,7								
Gesamtbewertung des MRK-Potentials	67,2								

Abbildung 4: Quick-Check Ergebnis für die manuelle Pumpenmontage

Da für die Ablaufabschnitte eins „Gehäuse vorbereiten“ und acht „Stecker mit Platine verbinden“ jeweils in mindestens drei Kategorien null Punkte vergeben wurden, besteht laut Quick-Check für diese Ablaufabschnitte kein Automatisierungspotenzial. Die Gründe liegen insbesondere in der Biegeschlaffheit der Teile und deren ungenauer Orientierung sowie in fehlenden Greifflächen oder einer hohen Teileanzahl.

Für die Ablaufabschnitte, in denen die vier Hauptbauteile Pumpengehäuse, Pumpe, Gehäuse und Gehäusedeckel montiert werden, sowie für den letzten Ablaufabschnitt „Produkt ablegen“, besteht ein hohes Automatisierungspotenzial, das auf eine einfache Handhabung der Bauteile zurückzuführen ist. „Produkt ablegen“ nimmt in Bezug auf das Automatisierungspotenzial den ersten Rang im Vergleich der Ablaufabschnitte ein, da das hohe Bauteilgewicht von über 8 kg zu einer hohen ergonomischen Belastung führt und dennoch die technische Machbarkeit gegeben ist.

Abbildung 5 stellt einen Vergleich der ausschlaggebenden Kriterien für die beiden Ablaufabschnitte acht und neun dar. Die Variation zwischen 0 % und 81,3 % der Anteile der erreichten Punktzahlen führt zu einem MRK-Potenzial von 67,2 %. Die Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Roboter ist daher für den betrachteten Montageprozess besonders vielversprechend.

Schritt 7: Stecker mit Platine verbinden	Schritt 9: Produkt ablegen
	
Formstabilität: 0 Punkte (biegeschlaff) Handhabung: 0 Punkte (keine Greiffläche) Sonstiges: 0 Punkte (komplexes Fügen) Gesamtpunkte: 0 % Rang: 8/8	Ordnungszustand: 4 Punkte (Vorrichtung) Ergonomie: 4 Punkte (Gewicht > 8kg) Quetschgefahr: 3 Punkte (frei über Tisch) Gesamtpunkte: 81,3 % Rang: 1/8

Abbildung 5: Vergleich der Kriterien für die beiden Ablaufabschnitte acht und neun

3.2 Simulation der MRK-Szenarien

Da noch kein CAD-Modell des manuellen Arbeitsplatzes vorlag, erfolgte die Erzeugung des manuellen Prozesses im „ema Work Designer“ durch die Nutzung der Bauteilebibliotheken und des ema-Menschmodells. Dazu war zudem ein Initialaufwand in Form der manuellen Erstellung der Ablaufabschnitte als Verrichtungen erforderlich. Die Abbildung 6 zeigt die zeitlichen und ergonomischen Analyseergebnisse des manuellen Prozesses.

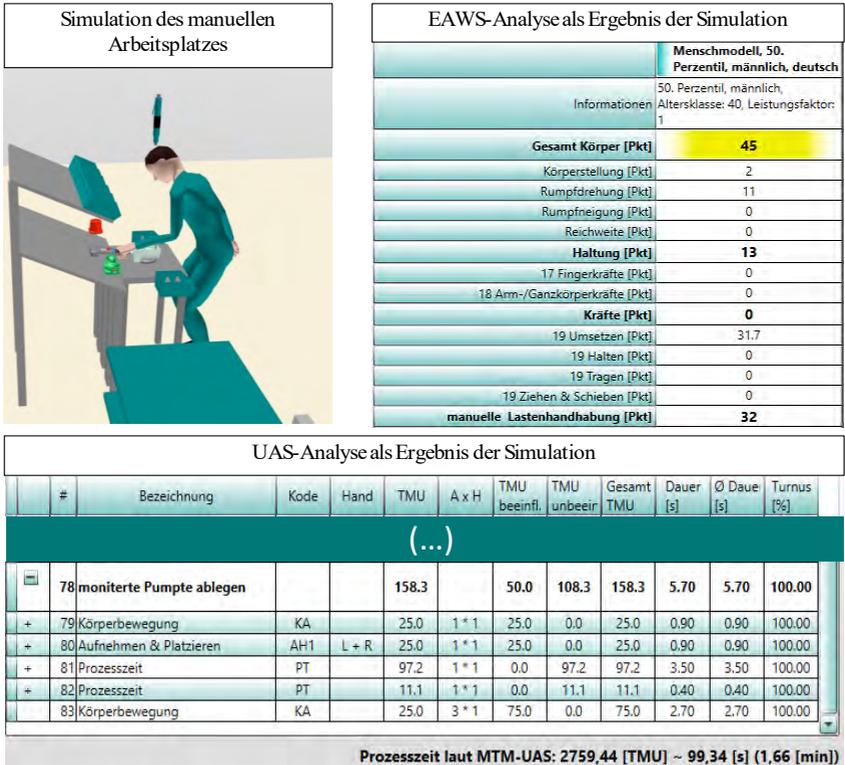


Abbildung 6: Simulation des manuellen Arbeitsplatzes

Tabelle 1 zeigt die für die Zuteilung der Arbeitsinhalte erforderlichen Eingangsgrößen basierend auf dem manuellen Prozess. Die ergonomischen Handlungsbedarfe in einzelnen Teilprozessen werden durch eine gelbe Einstufung des Ergonomie-Indikators aufgezeigt. Die Analyse zeigt zudem, dass das Bauteilhandling den größten Einfluss auf die Bewertung der Ergonomie hat.

	TP 1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9
<i>Automatisierungspotenzial</i>	0	62,5	56,3	58,3	56,3	60,4	0	54,2	81,3
<i>Ergonomie-Indikator</i>	grün	gelb	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	gelb
<i>Zeit Mensch</i>	18,1	6,1	19,6	3,1	10,6	7,2	7,8	18,5	5,7

Tabelle 1: Eingangsgrößen für die Zuteilung der Arbeitsinhalte

In Bezug auf die Stückzahlen und die daraus abzuleitende erforderliche Zykluszeit sind innerhalb des betrachteten Szenarios keine Veränderungen zu erwarten. Das Hauptziel der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuteilung liegt somit in der Verbesserung der Ergonomie bei gleichzeitiger Einhaltung der Taktzeit von 1,66 Minuten.

Den in Abschnitt 2.3 aufgezeigten Regeln folgend können die Teilprozesse zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt werden. Alle Teilprozesse mit Ausnahme der Teilprozesse eins und sieben besitzen ein hohes Potenzial zur Übernahme durch den Roboter und können laut Quick-Check dem Roboter zugewiesen werden. Auch die ergonomisch belastenden Tätigkeiten würden bei dieser Zuordnung durch den Roboter übernommen. Allerdings wird dieses Planungsszenario durch individuelle technische Restriktionen eingeschränkt, sodass das eher generische Quick-Check-Ergebnis um das Planungswissen des Anwenders ergänzt werden muss.

Der Aufwand für die Umsetzung sowohl von Handhabungs- und Fügearbeiten als auch Schraubtätigkeiten durch einen Roboter ist aufgrund der unterschiedlichen Greifer/Werkzeuge aufwendig und kostenintensiv. In der Folge wurde die in Abbildung 7 vorgestellte Aufteilung vorgenommen. Dabei wurden zunächst nur die ergonomisch kritischen Prozesse dem Roboter zugeteilt, da die ergonomische Verbesserung das Hauptziel der Einführung des Leichtbauroboters war. In diesem Szenario wird das Ablegen des Produkts durch den Roboter bereits mit der Vorbereitung des Gehäuses durch den Menschen parallelisiert, sodass sich eine geringfügige Verkürzung der Taktzeit von 1,66 Minuten auf 1,5 Minuten ergibt. Weitere Parallelisierungen der Teilprozesse drei bis acht waren aufgrund der vorgegebenen Montagereihenfolge nicht möglich.

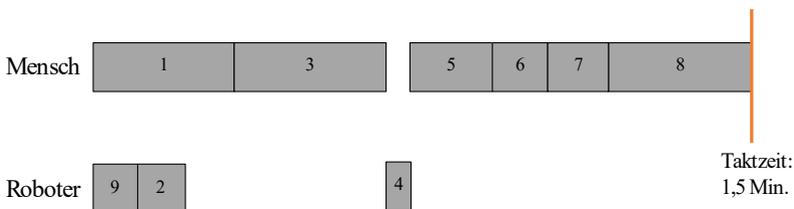


Abbildung 7: Mögliche Aufgabenzuteilung

Bei der Simulation dieses Szenarios konnte, wie eingangs der Validierung erläutert, auf die bereits vorhandene technische Ausrüstung (Kuka iiwa, UR10, etc.) zurückgegriffen werden. Der Einsatz der Zuführ- und Kameratechnik bedingt einen Einsatz des kuka iiwa 7, da hier bereits entsprechende Schnittstellen vorhanden waren. In der Simulation zeigte sich, dass der Roboter aufgrund seiner limitierten Traglast

von 7 kg, der eingeschränkten Reichweite und den Layout-Restriktionen der Zuführungen, den Teilprozess acht nicht ausführen kann, sodass dieser beim Menschen verbleiben musste. Da der Hebevorgang des 8 kg schweren Produkts jedoch ergonomisch die höchste Belastung des Menschen verursacht, wurde ein weiteres Szenario simuliert, in dem der zweite Roboter (UR10) diesen Prozessschritt übernimmt. Beide Planungsszenarien sind in Abbildung 8 dargestellt und werden im Folgenden mit a) und b) bezeichnet.

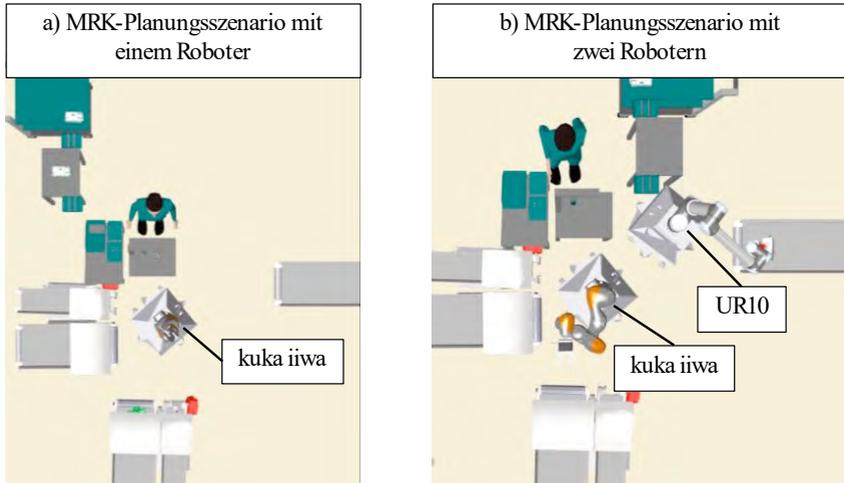


Abbildung 8: MRK-Planungsszenarien

3.3 Arbeitswissenschaftliche Bewertung der Szenarien

Zur Auswahl eines der Szenarien wurden die beiden Alternativen in der arbeitswissenschaftlichen Bewertung gegenübergestellt. Aus dem Kollisionsbericht der Simulation ergaben sich für beide Szenarien keine kritischen Hinweise in Bezug auf die **Sicherheit**. In den weiteren sicherheitstechnischen Fragen ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Szenarien. In beiden Alternativen wurde ein Betreten des Arbeitsraums der Roboter durch einen Lichtvorhang gesichert. Interaktion zwischen Mensch und Roboter findet nur in einem ausgewählten Bereich des Arbeitsplatzes statt.

Hinsichtlich der **Ergonomie** ergibt sich eine klare Überlegenheit des Szenarios b). In Szenario a) verbleibt der EAWS-Wert im gelben Bereich, bei einer geringfügigen Reduktion von 45 auf 37,5, während Szenario b) mit 13,5 Punkten deutlich im grünen Bereich liegt, vgl. Abbildung 9.

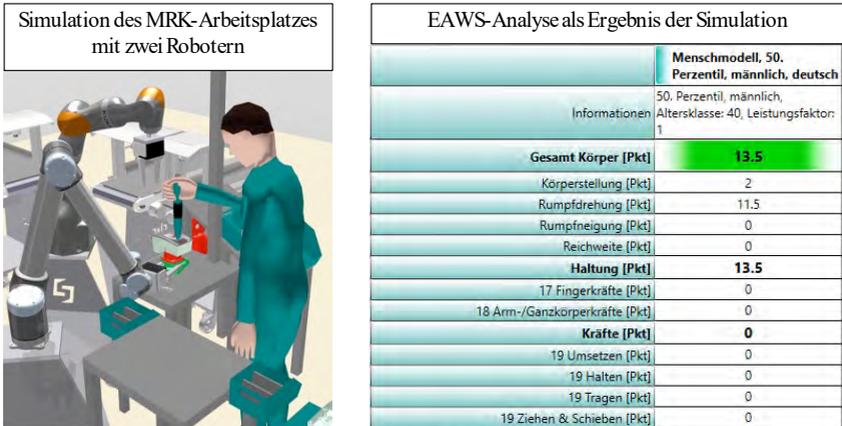


Abbildung 9: EAWs-Ergebnis für den MRK-Arbeitsplatz mit zwei Robotern

In Bezug auf die **Wirtschaftlichkeit** konnten konkrete Zahlen aufgrund des Einsatzes in der Forschungsumgebung nur schwer ermittelt werden. Für das Szenario a) ergibt sich gegenüber b) eine Einsparung von 25 %, da nur die Kosten eines Roboters berücksichtigt werden und der zweite Roboter für andere Anwendungsfälle zur Verfügung steht. Die mit 95,7 Sekunden geringere Zykluszeit in Szenario b) gegenüber Szenario a) mit 100 Sekunden wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Szenarios b) aus. Dennoch ist die Wirtschaftlichkeit der Anlage im Vergleich zum manuellen Szenario als eher gering zu bewerten, da neben den Robotern die Zuführ- und Kameratechnik für beide Szenarien höhere Kosten verursachen. Auf der für die arbeitswissenschaftliche Bewertung entwickelten Skala von -10 bis 10 (vgl. Seckelmann et al. 2019) wurde daher für Szenario a) ein Wert von -1 und für b) von -3 ermittelt.

Arbeitsorganisatorisch ergeben sich nur geringfügige Unterschiede zwischen den Szenarien. In beiden muss ein Mitarbeiter die vorbereiteten Gehäuse wieder über die Zuführtechnik dem Roboter zuführen. Es ergeben sich in Szenario b) geringere Laufwege, da das Ablegen des Produkts für den Menschen entfällt bei minimal größerem Platzbedarf. In Bezug auf die Auslastung des Menschen sind ebenfalls nur geringe Unterschiede festzustellen: Szenario a) 100%, Szenario b) 97%.

	<i>Ge- wich- tung</i>	<i>Teilergebnisse</i>		<i>Normiert</i>		<i>Gewichtet</i>	
		<i>a)</i>	<i>b)</i>	<i>a)</i>	<i>b)</i>	<i>a)</i>	<i>b)</i>
<i>Ergonomie (K.O.)</i>	60%	37,5	13,5	-0,6	8,4	-0,36	5,04
<i>Organisation</i>	20%	0,7	0,2	0,7	0,2	0,14	0,04
<i>Wirtschaft- lichkeit</i>	20%	/	/	-1	-3	-0,2	-0,6
<i>GESAMT</i>						-0,42	4,48

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Ergebnisse der arbeitswissenschaftlichen Bewertung der Szenarien a) und b)

Auf Basis der arbeitswissenschaftlichen Bewertung wurde Szenario b) für die Umsetzung ausgewählt und somit das Hauptziel der ergonomischen Verbesserung bei leichter Verbesserung der Taktzeit erreicht.

4. Fazit

Die Anwendbarkeit der Planungssystematik konnte durch die Validierung anhand der Pumpenmontage erneut bestätigt werden. Die Planungssystematik zeichnet sich in Bezug auf die einfache Anwendbarkeit und damit den einfachen Einstieg in das Thema MRK aus. Stärken bestehen insbesondere in der schnellen Schaffung von Transparenz mit dem Quick-Check, in der fähigkeitsorientierten und dennoch anpassbaren Arbeitszuteilung sowie der Absicherung durch die Simulation des Szenarios. Während der Quick-Check noch ohne Vorkenntnisse durchgeführt werden kann, sollte für die Arbeitszuteilung ein Grundwissen über Roboter und ihre Fähigkeiten erworben werden. Der Aufbau dieser Kompetenzen kann parallel zur Planungssystematik erfolgen und wird durch diese gefördert, da sie immer wieder die Auseinandersetzung mit dem Arbeitssystem und der Thematik MRK anstößt. Der Kompetenzaufbau innerhalb der Unternehmen zur selbstständigen Integration von Leichtbaurobotern ist ein wichtiger Wettbewerbsvorteil. Um die Kompetenzentwicklung weiter zu fördern, wurde ein begleitendes Schulungskonzept sowohl für Anwender der Planungssystematik als auch für operatives Personal entwickelt. Ein zielgruppendifferenziertes E-Learning in Kombination mit Workshops vermittelt Grundlagen zu MRK ebenso wie zum Quick-Check und den weiteren Planungsschritten (Wefßkamp et al. 2019a).

Nachteilig ist der hohe initiale Aufwand zur Erstellung der Simulation, der sich jedoch zukünftig durch die Entwicklung zu Industrie 4.0 und die Verfügbarkeit digitaler Daten und Modelle reduzieren wird. Darüber hinaus erfolgt die Bahnplanung in der Simulation zwar realitätsnah, jedoch noch nicht exakt. Das Ausleiten der Roboterbewegung als Programm zur direkten Verwendung für reale Roboter bildet daher weiterhin einen Forschungsschwerpunkt. Wird diese Hürde bewältigt, ist zukünftig eine virtuelle Inbetriebnahme von MRK-Systemen denkbar, die den Implementierungsaufwand deutlich reduziert und gleichzeitig eine Steigerung der Qualität des Implementierungsprozesses bewirkt.

Ein weiteres zukünftiges Potenzial besteht in der Erweiterung der Planungssystematik um ein virtuelles Cardboard-Engineering. Dabei kann die Visualisierung des digitalen Planungsszenarios in der virtuellen Realität oder als erweiterte Realität genutzt werden, um Fehler und Verbesserungspotenziale aufzuzeigen, die erst durch die tatsächlichen Proportionen der Einrichtungen erkannt werden können. Darüber hinaus kann diese attraktive Art der Einbeziehung der Mitarbeiter für das virtuelle Cardboard-Engineering zur Akzeptanzförderung beitragen.

Literatur

- Bauer, W., Bender, M., Braun, M., & Rally, P. (2016). *Leichtbauroboter in der manuellen Montage - einfach einfach Anfängen*. Stuttgart.
- Berg, J., & Reinhart, G. (2017). An Integrated Planning and Programming System for Human-Robot-Cooperation. *Procedia CIRP*, 63, 95–100.
- Beumelburg, K. (2005). *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss, 2005. IPA-IAO-Forschung und -Praxis: Vol. 413. Heimsheim: Jost-Jetter. Retrieved from http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2262/pdf/Diss_Beumelburg_hs.pdf
- BMBF (2017). *Verrichtungsbasierte, digitale Planung kollaborativer Montagesysteme und Integration in variable Produktionsszenarien (KoMPI)*. Retrieved from <https://www.produktion-dienstleistung-arbeit.de/de/projekte.php?PN=11050192>
- Busch, F. (2016). *Ein Konzept zur Abbildung des Menschen in der Offline-Programmierung und Simulation von Mensch-Roboter-Kollaborationen* ([1. Auflage]). Schriftenreihe industrial engineering: Band 17. Aachen: Shaker Verlag GmbH.
- Busch, F., Hartung, J., Thomas, C., Wischniewski, Sascha, BAua Dortmund, Deuse, J., & Kühlenkötter, B. (2013). Individualisierte Arbeitsassistenz in der Produktion: gesunder, sicherer und wettbewerbsfähiger Arbeit in der Industriellen Produktion. *Industrie Management*, 29(3), 7–10.
- Delang, K., Bsiwi, M., Harsch, A.-K., & Putz, M. (2017). Evaluation and selection of workstations for an application of Human-Robot-Interaction (HRI). Retrieved from http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4733018.pdf

- DIN. DIN EN 349:2008-09, Sicherheit von Maschinen_ Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen; Deutsche Fassung EN_349:1993+A1:2008. (DIN, 2008). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN (2016). DIN ISO/TS 15066:2017-04, Roboter und Robotikgeräte_ Kollaborierende Roboter (ISO/TS_15066:2016). (DIN, 2017). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Ermer, A.-K., Seckelmann, T., Barthelmey, A., Lemmerz, K., Glogowski, P., Kuhlenkötter, B., & Deuse, J. (2019). A Quick-Check to Evaluate Assembly Systems' HRI Potential. In N.N. (Chair), 4. MHI-Kolloquium, Dortmund.
- Fritzsche, L. (2010). Work Group Diversity and Digital Ergonomic Assessment as New Approaches for Compensating the Aging Workforce in Automotive Production (PhD thesis). TU Dresden.
- Heinze, F., Klöckner, M., Wantia, N., Rossmann, J., Kuhlenkötter, B., & Deuse, J. (2016). Combining Planning and Simulation to Create Human Robot Cooperative Processes with Industrial Service Robots. *AMM*, 840, 91–98.
- Hengstebeck, A., Weisner, K., Klöckner, M., Deuse, J., Kuhlenkötter, B., & Roßmann, J. (2016). Formal Modelling of Manual Work Processes for the Application of Industrial Service Robotics. *Procedia CIRP*, 41, 364–369.
- Müller, R., Franke, J., Henrich, D., Kuhlenkötter, B., Raatz, A., & Verl, A. (Eds.) (2019). Hanser eLibrary. *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration* ([1. Auflage]). München: Hanser.
- Ore, F., Hanson, L., Delfs, N., & Wiktorsson, M. (2015). Human industrial robot collaboration - development and application of simulation software. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 5(2), 164.
- Ore, F., Hansson, L., & Wiktorsson, M. (2017). Method for Design of Human-industrial Robot Collaboration Workstations. *Procedia Manufacturing*, 11, 4–12.
- Oubari, A., Pischke, D., Jenny, M., Meißner, A., & Trübswetter, A. (2018). Mensch-Roboter-Kollaboration in der Produktion. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(9), 560–564.
- Ranz, F., Hummel, V., & Sihm, W. (2017). Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration. *Procedia Manufacturing*, 9, 182–189.
- Schaub, K. G., Mühlstedt, J., Illmann, B., Bauer, S., Fritzsche, L., Wagner, T., . . . Bruder, R. (2012). Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the 'ergonomics assessment worksheet' (EAWS). *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 3(3/4), 398.
- Schröter, D. (2018). Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. Dissertation. *Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung: Band 81*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Seckelmann, T., Barthelmey, A., Kaiser, M., & Deuse, J. (2019). Simulationsgestützte arbeitswissenschaftliche Bewertung von MRK-Arbeitsplätzen. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114(11), 744–748.
- Selevsek, N., & Köhler, C. (2018). Angepasste Planungssystematik für MRK-Systeme. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(1-2), 55–58.
- Takata, S., & Hirano, T. (2011). Human and robot allocation method for hybrid assembly systems. *CIRP Annals*, 60(1), 9–12.
- Thomas, C., Stankiewicz, L., Deuse, J., & Kuhlenkötter, B. (2015). Arbeitsassistentz für die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter. In T. Bertram, B. Corves, & K. Janschek (Eds.), *Tagungsband Mechatronik* (pp. 109–112). TU Dortmund.

- Tsarouchi, P., Michalos, G., Makris, S., Athanasatos, T., Dimoulas, K., & Chryssolouris, G. (2017). On a human–robot workplace design and task allocation system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(12), 1272–1279.
- Weißkamp, V., Ermer, A.-K., Seckelmann, T., Barthelmey, A., & Deuse, J. (2019a). Befähigung von operativen Mitarbeitern und Planungsingenieuren. In F. Hees, S. Müller-Abdelrazeq, M. Voss, R. Schmitt, G. Hüttemann, K. Rook-Weiler, . . . A. Schmidt (Eds.), *Projektatlas Kompetenz Montage: Kollaborativ und wandlungsfähig* (pp. 150–153). Aachen: RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau.
- Weißkamp, V., Seckelmann, T., Barthelmey, A., Kaiser, M., Lemmerz, K., Glogowski, P., . . . Deuse, J. (2019b). Development of a sociotechnical planning system for human-robot interaction in assembly systems focusing on small and medium-sized enterprises. In 52nd Conference on Manufacturing Systems. Symposium conducted at the meeting of College International pour la Recherche en Productique (CIRP), Ljubljana, Slovenia.