

Rusch, Tobias; Ender, Hannah; Kerber, Florian

Article — Published Version

Kollaborative Robotikanwendungen an Montagearbeitsplätzen

HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik

Provided in Cooperation with:

Springer Nature

Suggested Citation: Rusch, Tobias; Ender, Hannah; Kerber, Florian (2020) : Kollaborative Robotikanwendungen an Montagearbeitsplätzen, HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, ISSN 2198-2775, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, Vol. 57, Iss. 6, pp. 1227-1238, <https://doi.org/10.1365/s40702-020-00677-w>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/288671>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Kollaborative Robotikanwendungen an Montagearbeitsplätzen

Tobias Rusch · Hannah Ender · Florian Kerber 

Eingegangen: 10. Juli 2020 / Angenommen: 12. Oktober 2020 / Online publiziert: 30. Oktober 2020
© Der/die Autor(en) 2020

Zusammenfassung Im Rahmen des Forschungsprojektes SynDiQuAss wird untersucht, wie Assistenzsysteme an bisher wenig automatisierten Arbeitsplätzen zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen von WerkerInnen sowie zur Produktivitätssteigerung eingesetzt werden können. Kollaborative Robotersysteme ermöglichen neue Gestaltungsmöglichkeiten gerade in Montageprozessen. Anhand des Anwendungsbeispiels eines Getriebeherstellers wird in diesem Beitrag die Applikation eines kollaborierenden Systems für die variantenindividuelle Kleinserienmontage betrachtet. Als wesentliche Herausforderungen werden dabei die Schnittstellenkonzeption einer datengestützten Integrationsplattform für digital vernetzte Assistenzsysteme sowie die sichere Interaktion zwischen Mensch und Roboter in beschränkten Kollaborationsräumen diskutiert. Anhand des Anwendungsbeispiels werden daraus Auslegungskriterien und -empfehlungen für die Integration kollaborativer Roboter in ein spezifiziertes Gesamtsystem an Montagearbeitsplätzen abgeleitet.

Schlüsselwörter Kollaborative Robotik · Sichere Mensch-Maschine Interaktion · Integrationsplattform · Montagesysteme

T. Rusch (✉) · H. Ender · F. Kerber
Technologietransferzentrum Nördlingen, Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg,
Emil-Eigner-Str. 1, 86720 Nördlingen, Deutschland
E-Mail: tobias.rusch@hs-augsburg.de

H. Ender
E-Mail: hannah-luisa.ender@hs-augsburg.de

F. Kerber
E-Mail: florian.kerber@hs-augsburg.de

Collaborative Robotics Application in Assembly Workplace

Abstract The research project “SynDiQuAss” investigates how assistance systems can be used at predominantly manual assembly workplaces to improve the working conditions of workers and increase productivity. Collaborative robot systems offer new design possibilities, especially in assembly processes. Based on the application example of a transmission manufacturer, this paper considers the integration of a collaborative system for the assembly of individualized products of small lot sizes. The main challenges range from the definition of universally applicable interfaces to connect a data-driven software platform for digital assistance systems to the safe interaction between man and robot in limited collaboration spaces. Based on the application example, criteria and recommendations of how to successfully integrate collaborative robots into a specified overall assembly system are derived.

Keywords Collaborative robotics · Safe Human-Machine-Interaction · Vision guided robotics · Assembly systems

1 Einleitung

Gerade kleine und mittelständische Unternehmen des produzierenden Gewerbes müssen sich in Zukunft in Deutschland auf veränderte Rahmenbedingungen einstellen. Zu den zehn Megatrends, welche die Rahmenbedingungen und die Märkte für die Produktion nachhaltig ändern, zählen unter anderem die Globalisierung, neue Technologien, dynamische Produktlebenszyklen und die dadurch entstehenden volatilen Märkte sowie der demografische Wandel (Abele und Reinhart 2011). Der stets steigende Bedarf an kundenindividuellen Produkten ist verantwortlich für dynamische Produktlebenszyklen, reduzierte Stückzahlen, stark ansteigende Produktvarianzen, wodurch die Komplexität der Produktionsplanung und -prozesse stetig zunimmt (Reinhart 2017). Dabei rücken insbesondere Montageprozesse in den Vordergrund. Diese beanspruchen je nach Branche und Produkt zwischen 15 und 70% der Gesamtfertigungszeit und wurden überwiegend als teuerster Herstellungsprozess identifiziert (Lotter 2012). Abhängig vom Automatisierungsgrad lassen sich automatische, halbautomatische und manuelle Montagesysteme untergliedern, wobei Letztere bei höchsten Anforderungen an Flexibilität und gleichzeitig geringsten Investitionsmitteln Anwendung finden (Lotter 2012). Dennoch bietet gerade die manuelle Montage ein hohes Potenzial für die Bewältigung der sich ändernden Rahmenbedingungen für produzierende Unternehmen.

In der manuellen Montage steht der Mensch im Mittelpunkt. Die bislang überwiegend manuell von qualifizierten Facharbeitern durchgeführten Prozessschritte können zukünftig durch kognitive und physische Assistenzsysteme unterstützt werden, so dass die Fähigkeiten des Menschen vorteilhaft mit den besonderen Eigenschaften von Maschinen kombiniert werden (Apt et al. 2018). Gerade im Bereich der kollaborativen Robotik kommt es dabei zu stetigen Neu- und Weiterentwicklungen. Kollaborative Roboter, kurz Cobots, ändern grundlegend die Art und Weise, wie Menschen und Maschinen im Fertigungsbereich zusammenarbeiten. Diese Zu-

sammenarbeit ermöglicht es Herstellern und Arbeitern in der Industrie, die Stärke, Reproduzierbarkeit und Kontinuität von Maschinen mit der Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Intelligenz von Menschen zu verknüpfen. Im Ergebnis kann dies zu Produktivitätssteigerungen und Qualitätsverbesserungen führen, während gleichzeitig die körperliche und mentale Belastung der Produktionsmitarbeiter reduziert wird. Dies erleichtert es produzierenden Unternehmen zudem, die Herausforderungen des demographischen Wandels zu meistern (Adam et al. 2019).

2 Stand der Technik kollaborativer Robotersysteme

Bei kollaborativen Robotern handelt es sich um speziell für die Kollaboration konstruierte und gestaltete Roboter. Sie zeichnen sich durch ein geringes Eigengewicht, einfache Programmierbarkeit sowie integrierte Sicherheitsfunktionen und Sensorik für den Einsatz ohne physisch trennende Schutzeinrichtungen aus (Malik und Bilberg 2019). Mittlerweile sind zahlreiche Systeme für den kollaborativen Betrieb in der Produktion kommerziell erhältlich. Dabei kann zwischen Industrierobotern, die mit spezieller Sensorik wie z. B. kapazitiven Schutzhäuten ausgestattet werden und die Kollaborationsform der kontinuierlichen Geschwindigkeits- und Abstandüberwachung nutzen, sowie Cobots, deren Sicherheit durch die Leistungs- und Kraftbegrenzung gewährleistet wird, unterschieden werden (Robla-Gómez et al. 2017). Daneben gewinnen zunehmend auch Pflege- und Serviceroboter an Bedeutung, die ebenfalls die Kriterien eines kollaborativen Robotersystems entsprechen (Buxbaum 2020). Insgesamt stieg nach den Zahlen der International Federation of Robotics die Anzahl installierter Cobots von 2017 bis 2018 um 23 % (IFR 2019).

Bekannt ist die kollaborative Robotik besonders aus Industrie und Logistik. Cobots werden vor allem in der Automobil- und Elektroindustrie eingesetzt, wobei die Materialflusssteuerung ein immer attraktiverer Anwendungsbereich für die Mensch-Roboter-Kollaborationen wird. Im Rahmen des digitalen Wandels wird erwartet, dass kollaborative Roboter vermehrt in bereits etablierten sowie neu entstehenden Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind der Einsatz des ABB YouMi in der Kleinteilmontage eines tschechischen ABB-Werks für Niederspannungsprodukte sowie MRK-Systeme in Klebeanlagen der Firma Dürr (Maier und Steil 2018; Xiao 2020). Die typischen Aufgaben der Cobots liegen in der Handhabung z. B. zur Objektübergabe, einfachen Fertigungsaufgaben wie Füge- oder Klebeprozessen, seltener auch in der Durchführung komplexerer Fertigungsverfahren wie Schweißanwendungen. Grundsätzlich gilt, dass ein Roboter umso einfacher einzusetzen ist, je weniger Fingerfertigkeit erforderlich wird (Buxbaum 2020). Aufgrund der meist simplen Endeffektoren können Arbeitsbereiche, die eine hohe Feinmotorik benötigen, momentan nur eingeschränkt automatisiert werden. Dieses Hindernis schränkt bis heute die vollständige Automation in der Montage ein. Trotz der mittlerweile umfassenden Normengrundlage besteht großer Bedarf an praktisch anwendbaren Auslegungsempfehlungen für kollaborative Roboterapplikation. Nutzer müssen deshalb bislang immer noch Einzelfallanalysen für die Auswahl und sichere Umsetzung von Applikationen durchführen. Dies erschwert gerade für KMUs, die meist nur wenig Expertise im Bereich der Sicherheitstechnik und Auslegung von Ro-

boterapplikationen haben, den Einsatz neuer Technologien. Erschwerend wirkt sich zudem die typischerweise hohe Variantenvielfalt der zu montierenden Produktfamilien aus. Diese erfordert die steuerungstechnische Vernetzung von Assistenzsystemen wie dem kollaborativen Roboter und den Datenaustausch mit IT-Systemen anderer Unternehmensbereiche im Sinne des Referenzarchitekturmodells der Industrie 4.0. Im Folgenden werden ein Lösungsansatz für diese zentralen Herausforderungen präsentiert und Empfehlungen für die Übertragung auf andere Anwendungsszenarien und Branchen formuliert.

3 Integration kollaborativer Robotiksysteme an Montagearbeitsplätzen

Digital vernetzte Assistenzsysteme können kognitive und physische Unterstützung leisten, um Montageabläufe zu verbessern. Basierend auf der Analyse existierender Systemarbeitsplätze, die bei kleinen und mittelständischen Unternehmen bereits eingesetzt werden, entwickelt das Projekt SynDiQuAss eine Spezifikation für standardisierte Montagearbeitsplätze, die aufgrund ihres modularen Aufbaus mit Unternehmensplanungssystemen sowie Entwicklungswerkzeugen vernetzt werden können und die flexible Integration von Assistenzsystemen ermöglichen. Zentraler Bestandteil ist eine im Projekt entwickelte Softwareplattform, die sowohl die daten- als auch aktorgetriebene Repräsentation des Montageprozesses ermöglicht und die steuerungstechnischen Schnittstellen zu den Assistenzsystemen bereitstellt (Sochor et al. 2019). Die digitale Arbeitsanweisung als Repräsentation eines Aktivitätsdiagramms (sogenannte Editor-Funktion) wird darin ebenso wie die Interaktionsmöglichkeiten mit den Assistenzsystemen definiert. Die Visualisierung während des Montagevorgangs wird variantenindividuell angepasst (sogenannte Assistentenfunktion) und beinhaltet auch eine Kommentierfunktion für Monteure als Datenbank für ein Wissensmanagementsystem (Rusch et al. 2020). Die Softwareplattform wird als lokale Instanz am jeweiligen Montagearbeitsplatz installiert und mit der IT-Architektur des Unternehmens verknüpft.

Abb. 1 zeigt, welche allgemeinen Schnittstellen der Assistent/Editor als Integrationsplattform implementiert und welche Daten anderer Unternehmensbereiche dabei ausgetauscht werden. Die Schnittstelle zum **ERP-System** wird für das Benutzerrollen- und Berechtigungskonzept sowie auftragsbezogene Daten wie die Produkt-ID, Stückzahl etc. benötigt. **Entwicklung und Konstruktion** liefern produktbezogene Konstruktionsdaten wie CAD-Modelle (Explosionsdarstellung, Schnitt- und Zusammenbauzeichnungen), Stücklisten, Werkzeuglisten zur Erstellung der Montagesequenz im Editor und zur Bereitstellung kognitiver Assistentenfunktionalitäten im Assistenten. Zur Dokumentation und Nachverfolgbarkeit individueller Qualitätsdaten wie Prüfprotokollen und Messergebnissen wird die dritte Schnittstelle zum **Qualitätsmanagement** genutzt. **Logistik und Arbeitsvorbereitung** werden für Assistentenfunktionalitäten beim Kommissionieren ebenfalls mit der Softwareplattform vernetzt.

Die Schnittstellenspezifikation ist systemunabhängig formuliert, setzt jedoch voraus, dass die anzubindenden Unternehmensfunktionen über digitale Datenstrukturen verfügen. Der modulare Aufbau der Softwareplattform ermöglicht es hierbei, Funk-

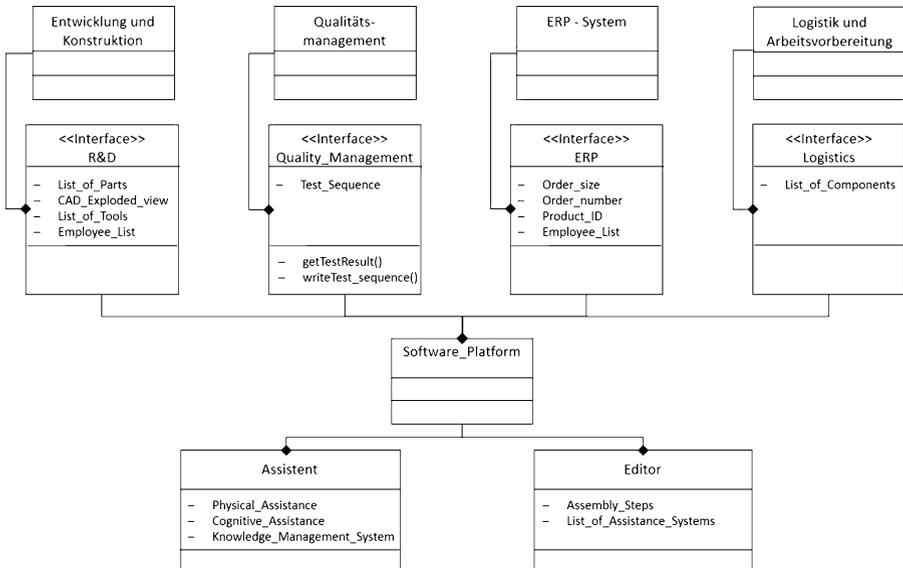


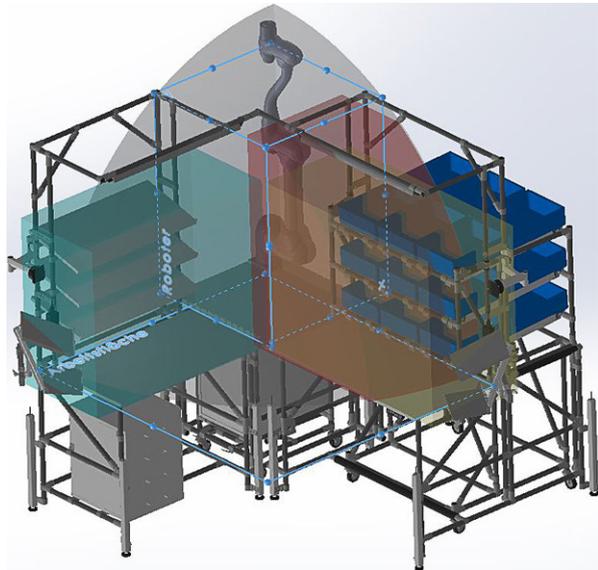
Abb. 1 Schnittstellen der Softwareplattform

tionalitäten wie die Kommissionierassistenz und zugehörigen Systemkomponenten wie AR-Brillen individuell anzubinden.

3.1 Modularer Systemarbeitsplatz mit Kollaborationsräumen

Als Anwendungsbeispiel wird ein im Rahmen des Forschungsprojekts SynDiQuAss entworfenes kollaboratives System zur Kleinserienmontage von Getrieben betrachtet. Bei dem zu montierenden Getriebe handelt es sich um ein geschlossenes Getriebe, das aus mehreren Einzelteilen besteht und zum Schutz abschließend mit einer Dichtraupe versehen wird. Kundenindividuelle Getriebevarianten werden in Kleinserie als Sequenz manueller Handhabungs-, Füge- und Qualitätsprüfschritte montiert. Für den mechanischen Aufbau des standardisierten Systemarbeitsplatzes wird ein modularer Aufbau vorgeschlagen, wie er auch bei Rusch und Kerber (2019) beschrieben ist. Jeder Bereich des Arbeitsplatzes wird für einzelne Aktivitäten im Montageprozess genutzt und der Arbeitsplatz so in spezielle Module aufgeteilt, siehe Abb. 2. Dabei ist Modul 1 der ausschließlich für manuelle Tätigkeiten reservierte Arbeitsbereich des Werkers, in den der Roboter aufgrund seiner Sicherheitskonfiguration nicht eindringen kann (vgl. 4.1). Dort befinden sich die für die Getriebemontage benötigten Gehäuseteile, die von der Arbeitsvorbereitung bereitgestellt werden. Modul 3 enthält einen fahrbaren Aufbau für alle Normteile, die in Kleinladungsträgern sortiert sind. Der Cobot nutzt die Arbeitsfläche von Modul 2 sowie den kugelscheibenförmigen kollaborativen Arbeitsbereich in Modul 3.

Abb. 2 Module und Arbeitsbereiche (Grau: Arbeitsbereich Roboter, Rot: Kollaborationsraum, Grün: Schutzzonen)



3.2 Universelle Schnittstelle für Peripheriegeräte zur hybriden Assistenz

Für die Integration physischer und kognitiver Assistenzsysteme verfügt die Softwareplattform über eine universelle Schnittstelle auf Basis eines TCP/IP-Protokolls, die die grundlegende Kommunikation zwischen Peripheriegeräten und dem Assistenten/Editor definiert. Über ein Konfigurationsmenu wird dabei der Typ des Peripheriegeräts angelegt, der dann bei der Definition des Montageschritts als Assistenzfunktionalität hinzugefügt werden kann. Ein Montageschritt hat dabei die Eigenschaft, dass maximal eine Assistenzfunktionalität zusätzlich zu den standardmäßig mit dem Prozessschritt verknüpften kognitiven Funktionen Pick-by-light, CAD-Darstellungen bzw. Videos, Einzelteil- und Werkzeuginformationen verknüpft wird. Sind mehrere Teilfunktionalitäten erforderlich, muss der Montageschritt aufgeteilt werden. Wie in Abb. 3 dargestellt, implementiert die universelle Schnittstelle einen bidirektionalen Informationsfluss, bei dem Steuerungsbefehle an das Peripheriegerät gesendet und Status- sowie Ergebniswerte zurückgeschickt werden. Soll eine komplexere Interaktion realisiert werden, wird die Schnittstelle durch ein dediziertes Plugin der Software für systemspezifische Kommunikationssequenzen ergänzt. Ein Beispiel hierfür ist das externe Kamerasystem, das für Qualitätsprüfungsaufgaben bzw. zur Bewegungsplanung des Robotersystems eingesetzt wird. Dafür müssen neben Triggerbefehlen auch weitere Kommandos zur Anzahl und Verarbeitung der Aufnahmen jeweils im Handshakeverfahren kommuniziert werden. Neben der funktionalen Interaktion wird über die universelle Schnittstelle auch ein Fehlermanagementsystem implementiert. Im Falle einer unkritischen Störung informiert der Assistent den Werker über das Fehlerereignis und liefert Anleitungsinformationen zur Behebung über ein Popup. Liegt ein kritischer Fehler wie z. B. eine Kollisionsfahrt des Roboters mit ausgelöstem Sicherheitsstopp vor, wird der im Editor mit seinen Kontaktdaten hinterlegte

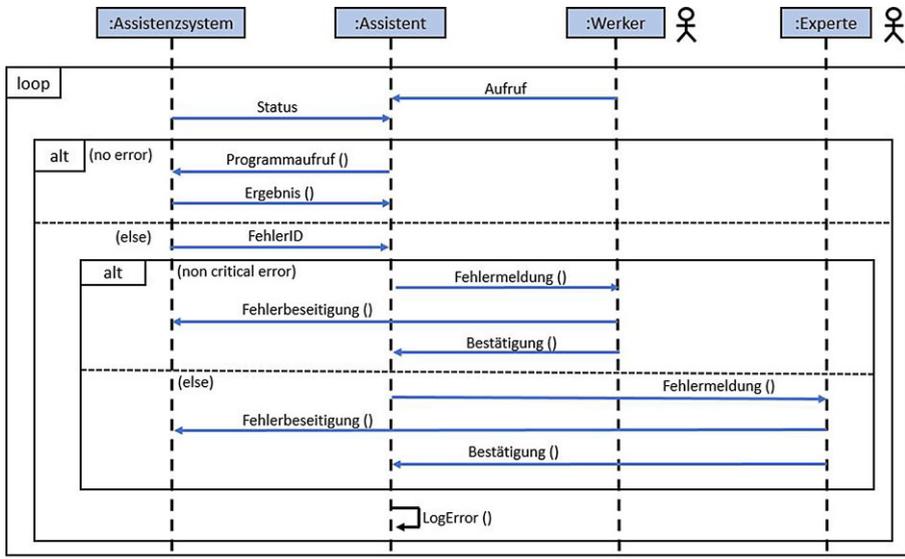


Abb. 3 Universelle Schnittstelle und Nutzerinteraktion

Experte informiert. Die erfolgreiche Fehlerbehebung wird in beiden Fällen bestätigt und im Editor als Fehlerereignis mit Zeitstempeln dokumentiert. Dadurch werden zusätzliche Daten über den Produktionsprozess generiert, die für die kontinuierliche Optimierung der Systemauslegung genutzt werden können.

3.3 Mensch-Maschine Interaktion am Beispiel des kollaboratives Robotersystems

Um geeignete Montageschritte für den Einsatz eines kollaborativen Robotersystems auszuwählen, wurden alle Teilschritte hinsichtlich Ergonomie, Belastungsfaktoren für die Monteure und Qualitätsanforderungen (Fink et al. 2020) bewertet. Hinsichtlich des Grades der Interaktion zwischen Werker und Roboter werden in diesem Beitrag in Anlehnung an Bauer et al. 2016 drei Kategorien differenziert, die in Abb. 4 dargestellt sind. Die **sequentielle** oder **synchronisierte Kooperation** zerlegt einen Prozessschritt in einzelne, nicht weiter funktional zerlegbare Handhabungsaufgaben (Michniewicz und Reinhart 2014), die jeweils ausschließlich von einem Akteur – Werker oder Roboter – zeitlich synchronisiert durchgeführt werden. So wird beispielsweise der Arbeitsschritt zum Fügen von Bolzen in ein Gehäuseteil in die einzelnen Subprozesse des Bereitstellens des Gehäuseteils (Roboter) sowie der Bolzen (Werker) innerhalb des Kollaborationsraums und das eigentliche Fügen durch den Werker aufgeteilt. Ein solches Kooperationszenario reduziert Belastungen und ergonomisch ungünstige Handhabungsvorgänge für den Menschen, da in diesem Beispiel das Gehäuseteil entsprechend der konstruktiven Merkmale zunächst erhitzt werden muss, um die Passung zu ermöglichen. Die **parallele Kooperation** oder **Koexistenz** ermöglicht es, innerhalb des gesamten Arbeitsplatzes mehrere grund-

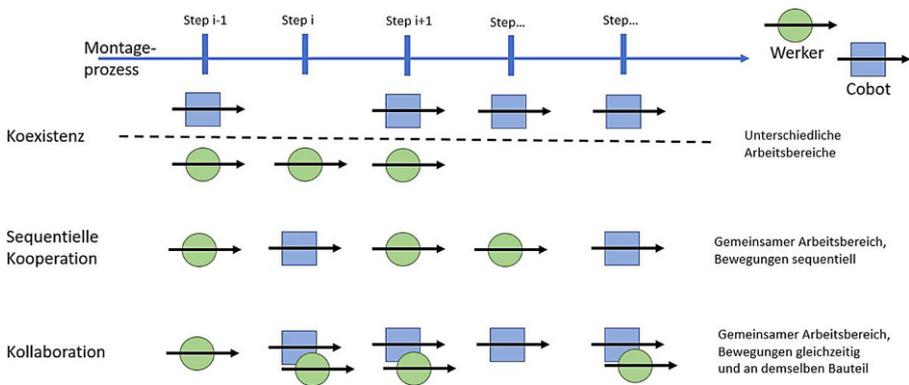


Abb. 4 Interaktionsszenarien und Grad der Zusammenarbeit von Roboter und Werker

legende Arbeitsschritte gleichzeitig ablaufen zu lassen. Dies kann durch paralleles Montieren der Einzelstücke eines Auftrags oder durch parallele Ausführung unterschiedlicher grundlegender Handhabungsaufgaben innerhalb eines Montageschritts realisiert werden. In der Beispielapplikation werden bis zu drei Getriebe eines Loses parallel aufgeheizt, um das anschließende Bolzenfügen zu ermöglichen. Dabei sind die Arbeitsräume von Mensch und Roboter getrennt. Primärer Vorteil der parallelen Kooperation ist die Effizienzsteigerung aufgrund reduzierter Montagezeiten, ohne dass die kognitive Belastung zunimmt, da die Koordination der parallelen Handhabung vom Assistenzsystem übernommen wird. Die **Kollaboration** verbessert die Ergonomie einzelner Handhabungsaufgaben, indem Werker und Roboter dasselbe Werkstück bearbeiten. Beispielhaft wird dies für den Vorgang des Bolzenfügens realisiert, bei dem der Roboter als „dritte Hand“ das Gehäuseteil an der korrekten Position für den Werker fixiert.

Alle Prozessschritte des Roboters werden dabei durch Sensorik überwacht, um eine sichere Interaktion gewährleisten zu können (siehe Abschn. 4.1). Dafür werden spezielle Greifer bzw. Halterungen konzipiert, um die unterschiedlichen Szenarien mit einem Robotersystem durchführen zu können. Die Kommunikation mit der Softwareplattform wird über die in Abb. 3 beschriebene universelle Schnittstelle hergestellt.

4 Herausforderungen bei der Applikation kollaborativer Systeme

Die Auslegung als kollaboratives Montagesystem erfordert eine grundlegende Untersuchung, damit Werker und Cobot in den Kollaborationsräumen sicher zusammenarbeiten können. Für die flexible Nutzung des Systems und zur Beherrschung der Variantenvielfalt des Anwendungsbeispiels wird eine Kamera zur bildgeführten Bewegungssteuerung eingesetzt. Diese Herausforderungen werden im Folgenden näher beschrieben und abschließend Bewertungsmaßstäbe definiert, nach denen die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems beurteilt werden kann.

4.1 Sichere Interaktion zwischen Mensch und Roboter

Physische Kontakte können bei der Zusammenarbeit mit einem Roboter nicht ausgeschlossen werden. Deswegen muss es die Grundvoraussetzung einer Robotikanwendung sein, einen Arbeitsraum ohne oder mit sehr geringem Gefährdungs- und Risikopotenzial für den Menschen zu schaffen. Bei Industrierobotern wird die Sicherheit durch eine räumliche Trennung des Roboters und des Menschen umgesetzt. Da für die oben definierten Interaktionsszenarien getrennte Arbeitsplätze mit Sicherheitsvorrichtungen nicht beabsichtigt sind, muss die Sicherheit durch die Gestaltung und Auslegung der Applikation gewährleistet werden. Dies beginnt bereits mit der Auswahl eines geeigneten Robotersystems, das nach den relevanten Sicherheitsnormen ein Performance Level d erreicht. Der im Anwendungsbeispiel verwendete Doosan M1013 besitzt ein ergonomisches Design ohne Ecken und Kanten zur Oberflächenerweiterung im Falle einer Kollision. Für eine sichere Zusammenarbeit auf Basis der Leistungs- und Kraftbegrenzung besitzt der Cobot in jeder Achse einen Drehmomentsensor, der externe Kräfte präzise erkennt und der Cobot schnell anhält. Daneben hat er ein geringes Eigengewicht und ist darauf ausgelegt, Lasten von maximal 10 kg zu bewegen, da große Lasten generell gefährlicher sind (Hofbauer und Rathmair 2019).

Die Wahl des Standorts des Cobots innerhalb des Arbeitsplatzes trägt maßgeblich zu dessen Sicherheit bei. Das Gefährdungspotenzial kann gesenkt werden, indem der Cobot nicht zentral im System, sondern an einer dezentralen Stelle arbeitet. Im modularen Systemarbeitsplatz wird diese Anordnung wie in Abb. 2 dargestellt durch die Platzierung in Modul 2 umgesetzt. Der Arbeitsraum des Cobots wird dabei durch Definition von Ebenen und Schutzkörpern so eingeschränkt, dass Modul 1 nicht erreicht (Schutzzone Modul 1) und die Aufbauten auf den Modulen geschützt werden (Schutzzone Modul 3). Innerhalb der Kollaborationsbereiche wird die maximale Bahngeschwindigkeit reduziert. Darüber hinaus werden entsprechende ISO TS 15066 Kontaktkräfte für den Sicherheitsstopp nach Kategorie 2 des Roboters festgelegt, die als Teil der Sicherheitskonfiguration abgespeichert werden. Zur Absicherung können zudem Simulationstools herangezogen werden, um Kontaktkräfte für die einzelnen Interaktionsszenarien und Grenzwerte für die sichere Parametrierung der Bewegungsbefehle zu berechnen.

4.2 Variantenvielfalt und Komplexitätsmanagement

Kleine Losgrößen und kundenindividuelle konstruktive Veränderungen sind für die wachsende Komplexität des Produktportfolios vieler KMUs verantwortlich. Ein sinnvolles Komplexitätsmanagement kann nur durch die digitalen Technologien und Strukturen etabliert werden. So ist die Verfügbarkeit variantenindividueller Konstruktions- und Entwicklungsdaten über die Schnittstelle der Softwareplattform eine notwendige Bedingung für die automatisierte Generierung von Assistenzsystemfunktionalitäten. Für das kollaborative Robotersystem ist die Nutzung von externen bildgebenden Sensoren darüber hinaus hinreichend, um sowohl die sichere Interaktion zu garantieren als auch eine flexible Programmierung zu ermöglichen. In der Beispielapplikation wird dies durch die Implementierung einer bildgeführten

Dichtraupe demonstriert, die über eine smarte 2D-Kamera mit integrierter Bildverarbeitungssoftware die Gehäusekontur jeder Variante vermessen und mit Hilfe von Algorithmen der diskreten Geometrie die Skeletonallinie (Lee et al. 1994) als Sollbahn berechnet.

Die im Beitrag beschriebene Integrationsplattform kann zudem als Enabler für die Nutzung weiterer Digitalisierungstechnologien über alle Unternehmensbereiche hinweg angesehen werden. Die Dokumentation und Nachverfolgbarkeit aller Montagevorgänge bis auf die Ebene der grundlegenden Handhabungsschritte generiert eine Datenbasis, die neben dem verbesserten Qualitätsmanagement auch für datenbasierte Analyseverfahren zur Prozessoptimierung und Transparenz der Produktion insgesamt herangezogen werden kann.

4.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kollaborativer Robotiksysteme

Für die systematische Einführung kollaborativer Robotiksysteme in der manuellen Montage sollte immer die Wirtschaftlichkeit mitbetrachtet werden. Dabei müssen sowohl der quantifizierbare Nutzen als auch qualitative Verbesserungspotentiale für die Investitionsentscheidung berücksichtigt werden.

Als quantitative Kriterien werden dabei

- die Investitionskosten für einzelne Systemkomponenten wie den Cobot, Greifer und Sensoriksysteme sowie deren Integrationsaufwand,
- die berechenbaren Auswirkungen auf die Prozessdauer durch Parallelisierung von Prozessen bzw. Ablaufoptimierungen durch die vereinfachte Interaktion von Assistenzsystem und Werker sowie
- verminderte Qualitätsaufwendungen durch automatisierte oder zusätzliche durchgeführte Prüfschritte der entstehenden Bauteile wie z. B. die bildgeführte Dichtraupe im Anwendungsbeispiel

betrachtet.

Die Berechnung der Finanzströme kann dabei nach in der Literatur etablierten Verfahren erfolgen. Grundsätzlich werden statische und dynamische Methoden der Investitionsrechnung (Müller 2006) unterschieden. Zu Ersteren gehört z. B. die Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung, während in dynamischen Berechnungsverfahren zusätzlich insbesondere Zinseffekte berücksichtigt werden.

Nicht jeder Vorteil eines kollaborativen Robotiksystems lässt sich jedoch direkt quantifizieren. Um solche Auswirkungen trotzdem im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen, können z. B. Nutzwerte einzelner qualitativer Kriterien berechnet werden, die in die abschließende Gesamtbewertung einfließen. Qualitative Kriterien sind zum Beispiel die physische und psychische Belastung am Arbeitsplatz. Korrekt ausgelegte Assistenzsysteme bringen Verbesserungen in beiden Belastungsdimensionen, indem ergonomisch ungünstige Aufgaben z. B. bei der Handhabung von Bauteilen durch Cobots als physische Assistenzsysteme übernommen und die Informationenbereitstellung zur kognitiven Entlastung der Werkenden beiträgt (Merkel 2019). Weitere Kriterien können die Motivation der Belegschaft sein, die durch den Einsatz der Assistenzsysteme verbessert werden kann sowie

Auswirkungen auf das Unternehmensimage sowohl bei sozialen Verträglichkeit als auch bei der Innovationsfähigkeit.

5 Fazit, Empfehlungen und Ausblick

Kollaborative Robotersysteme eröffnen neue Einsatzpotentiale gerade im bisher wenig automatisierten Bereich der Montage. Ob die Systeme sinnvoll integriert werden können, hängt von den Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls ab. Neu erarbeitete Normen definieren Kollaborationsszenarien und die dafür gültigen Grenzwerte, die bei der Programmierung der Robotersysteme berücksichtigt werden müssen. Bildgebende Sensorsysteme ermöglichen die flexible Bewegungssteuerung. Als Beispielapplikation wird in diesem Beitrag gezeigt, wie bei der Montage kundenindividuell angepasster Getriebe sowohl die Produktivität durch Parallelisierung von Prozessen als auch die Ergonomie am Arbeitsplatz durch ein kollaboratives Robotersystem verbessert werden kann. Die dafür genutzte Softwareplattform als Interaktionswerkzeug mit Schnittstellen zur IT-Infrastruktur des Unternehmens bietet zudem die Möglichkeit, weitere Assistenzsysteme anzubinden und somit zusätzliche Vorteile zu realisieren. Die Rentabilität des Gesamtsystems wird durch die kombinierte Betrachtung quantitativer und qualitativer Kriterien abgeprüft.

Danksagung Das Vorhaben SynDiQuAss, Förderkennzeichen 01FI16001, wird im Rahmen des Programms „Zukunft der Arbeit“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Europäischen Sozialfonds gefördert.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Abele E, Reinhart G (2011) Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Hanser, München
- Adam C, Aringer-Walch C, Bengler K (2019) Digitalization in manufacturing—employees, do you want to work there? In: Advances in intelligent systems and computing Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA) 2018, S 267–275
- Apt W, Bovenschulte M, Priesack K, Weiß C, Hartmann EA (2018) Forschungsbericht 502. Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb. Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Bonn

- Bauer W et al (Hrsg) (2016) Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen: Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen. Fraunhofer IAO, Stuttgart
- Buxbaum H-J (2020) Mensch-Roboter-Kollaboration. Springer Gabler, Krefeld
- Fink K, Rusch T, Merkel L, Sochor R, Kerber F, Reinhart G (2020) Ein Vorgehensmodell zur Prozessevaluierung zur Integration ausgewählter kognitiver und physischer Assistenzsysteme am Montagearbeitsplatz 4.0 im Mittelstand. Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? Frühjahrskongress 2020, Berlin. GfA, Dortmund
- Hofbaur MW, Rathmair M (2019) Physische Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration. *Elektrotech Informationstech* 136(7):301–306
- IFR (2019) Roboter-Investitionen steigen auf Rekord von 16,5 Mrd USD – IFR stellt neuen World Robotics Report vor. International Federation of Robotics, Shanghai, Frankfurt (Pressemitteilung 18. September 2019)
- Lee T-C, Kashyap RL, Chu C-N (1994) Building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning algorithms. *Comput Vis Graph Image Process* 56(6):462–478
- Lotter B, Wiendahl HP (2012) Montage in der industriellen Produktion, 2. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9>
- Maier GW, Steil JJ (2018) Kollaborative Roboter: universale Werkzeuge in der digitalisierten und vernetzten Arbeitswelt. Springer, Berlin, Heidelberg
- Malik AA, Bilberg A (2019) Collaborative robots in assembly: a practical approach for tasks distribution. *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.173> S 665–670
- Merkel L (2019) Einführung kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage. Dissertation Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb). Technische Universität München, München
- Michniewiz J, Reinhart G (2014) Cyber-physical robotics—automated analysis, programming and configuration of robot cells based on Cyber-physical-systems. *Proc Technol* 15:567–576
- Müller D (2006) Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Springer, Berlin
- Reinhart G (2017) Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart G (Hrsg) *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Hanser, München
- Robla-Gómez S, Becerra VM, Llata JR, González-Sarabia E, Torre-Ferrero C, Pérez-Oria J (2017) Working together: a review on safe human-robot collaboration in industrial environments. *IEEE Access* 5:26754–26773
- Rusch T, Kerber F (2019) Prozessmodellierung zur Integration von Assistenzsystemen an Montagearbeitsplätzen. In: GfA (Hrsg) *Frühjahrskongress 2019*. GfA, Dortmund
- Rusch T, Steuer J, König M, Sochor R, Fink K, Stelzle B, Romanelli M, Kerber F (2020) Tool-based automatic generation of digital assembly instructions. 14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples
- Sochor R, Riegel A, Merha L, Rusch T, Merkel L, Kerber F, Braunreuther S, Reinhart G (2019) Kognitive und physische Assistenz in der Montage. *Wt Werkstattstech Online* 109(2019):122–112
- Xiao M (2020) The Collaborative Robot Market – 2019, interact analysis. <https://www.interactanalysis.com/the-collaborative-robot-market-2019-infographic/>. Zugriffen: 13. Juni 2020