

Anforderungen an einen sicheren und ergonomischen Arbeitsplatz für die Mensch-Roboter-Kooperation

Marco FABER, Sinem KUZ, Alexander MERTENS, Christopher M. SCHLICK

*Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen
Bergdriesch 27, D-51062 Aachen*

Kurzfassung: Heutige Produktionslinien sind trotz ihrer weitreichenden Automatisierung häufig zu unflexibel, um die steigende Variantenvielfalt der Produkte abdecken zu können. Mithilfe der direkten Mensch-Roboter-Kooperation lassen sich Produkte effizient fertigen und die Belastung für den Menschen reduzieren. Die aktuelle Rechts- und Normenlage erlaubt jedoch keine gleichzeitigen Montageprozesse durch Mensch und Roboter im selben Arbeitsbereich. Dieser Beitrag identifiziert technisch-physikalische, mensch-bezogene und normative Anforderungen für einen solchen hybriden Arbeitsplatz. Die Umsetzung der Anforderungen wird abschließend anhand eines ersten Prototyps beschrieben.

Schlüsselwörter: Mensch-Roboter-Kooperation, Anforderungsanalyse, kognitive Automatisierung, Montageplanung

1. Einleitung

Heutzutage lassen sich Montageprozesse produzierender Unternehmen in zwei Kategorien unterteilen. Einerseits können aufgrund hochentwickelter Automatisierungstechnologien viele Montageschritte mithilfe standardisierter Industrieroboter oder vergleichbarer Handhabungsgeräte effizient automatisiert erfolgen. Hierdurch lassen sich flexibel Produktionslinien für automatisiert ablaufende Montageprozesse erstellen. In komplexen Produkten sind allerdings häufig auch Bauteile enthalten, die aufgrund ihrer strukturmechanischen Eigenschaften oder der notwendigen sensumotorischen Fähigkeiten nicht komplett automatisiert montiert werden können (Kräger et al. 2009, Faber et al. 2013). Hierrunter fallen beispielsweise biegeschlaffe Teile wie Kabelbäume, Federn oder Dichtungsringe. Zusätzlich hat die zunehmende Kundenindividualisierung der Produkte eine immer größere werdende Produktvielfalt und damit eine geringere Losgröße zur Folge, deren Vielfalt nicht von den existierenden Montagelinien abgedeckt werden kann. Die Investitionen in spezielle Automatisierungstechnik würden aufgrund der geringen Flexibilität der Anlagen unwirtschaftlich sein (Bley et al. 2004).

Durch eine Kooperation des Menschen mit dem Roboter während des Montageprozesses können diese Nachteile größtenteils kompensiert werden. Während der Roboter große Lasten handhaben und monotone Aufgaben übernehmen kann, kann sich der Mensch auf seine Fähigkeiten und Fertigkeiten der feinmotorischen Montage beschränken. Zusätzlich ermöglichen kreative Problemlösungskompetenzen eine Überwachung des Produktionsprozesses und ein flexibles Reagieren auf unerwartete Situationen. Durch diese Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) kann die Gesamtleistung und -effizienz des Produktionssystems gesteigert werden (Faber et al. 2013, Shen und Reinhart 2013).

Eine direkte Kooperation zwischen Mensch und Roboter erfordert allerdings

weitreichende Sicherheitsmaßnahmen, um jegliche Gefährdung der Arbeitsperson zu vermeiden. Aktuelle Normen und Standards (z. B. DIN EN ISO 10218) verhindern jedoch eine direkte Zusammenarbeit zur selben Zeit im selben Arbeitsbereich und erfordern in einer solchen Situation separierte Arbeitsbereiche bzw. einen überwachten Sicherheitsstopp. Zusätzlich müssen zahlreiche Schutzeinrichtungen installiert werden, um das Eintreten in den Sicherheitsbereich frühzeitig detektieren zu können (Krüger et al. 2009). Neuere Normen, wie die im Entwurf befindliche ISO/TS 15066, zielen auf die direkte MRK ab und spezifizieren hierzu bspw. Maximalkräfte für eine Kollision zwischen Roboter und Mensch. Zusätzlich können neue Technologien und Steuerungskonzepte dazu beitragen, das Risiko für den Menschen zu minimieren.

In diesem Beitrag werden Anforderungen für einen solchen hybriden Arbeitsplatz, an dem Mensch und Roboter zur selben Zeit im selben Arbeitsbereich arbeiten, vorgestellt. Dazu werden im nächsten Abschnitt technisch-physikalische, menschbezogene und normative Anforderungen näher beschrieben. Soziale und ethische Anforderungen der MRK, wie etwa der zunehmende Grad der Ersetzung des Menschen durch den Roboter, werden in Nelles et al. (2016) dargestellt. Basierend auf den identifizierten Anforderungen wird ein erster Ansatz für einen flexiblen Montagearbeitsplatz für die MRK vorgestellt.

2. Anforderungen an einen hybriden Arbeitsplatz für die Mensch-Roboter-Kooperation

2.1 Methode

Die vorliegende Anforderungsanalyse zielt auf die Gestaltung eines gemeinsamen Arbeitsbereichs für Mensch und Roboter ab, in dem beide kooperativ zur selben Zeit und ggf. am selben Werkstück arbeiten können. Dabei soll die bisherige strikte Trennung der Arbeitsbereiche aufgehoben werden. Der Arbeitsplatz soll für erfahrene Arbeitspersonen jedes Erwerbsalters, also insbesondere auch auf ältere Personen, ausgelegt sein. Die Steuerung des Produktionsprozesses soll so flexibel wie möglich sein, um auch auf die veränderten Marktbedingungen und der daraus folgenden stark steigenden Variantenvielfalt reagieren zu können.

Als Grundlage der Anforderungsanalyse diente wie in Faber et al. (2015) beschrieben der Ansatz nach Franke (1975), in dem zwei Dimensionen unterschieden werden. Zunächst werden die Anforderungen in technisch-physikalische, menschbezogene, wirtschaftliche, normative und sonstige Anforderungen unterteilt. In jeder Kategorie werden die Anforderungen noch einmal auf die Phasen des Produktlebenslaufs (Herstellung, Verteilung, Verwendung, Rückführung) bezogen. Die Verteilungsphase wird hier hauptsächlich als der Transport des Arbeitsplatzes an einen neuen Produktionsstandort verstanden und die Rückführung als Wiederverwendung bzw. Erweiterung statt der Entsorgung des Arbeitsplatzes. Tabelle 1 bezieht die Produktlebensphasen auf den vorliegenden Anwendungsfall des hybriden Montagearbeitsplatzes. Die wirtschaftlichen Aspekte werden im Folgenden vernachlässigt.

2.2 Anforderungen

Bereits während der Konzeption und Herstellung des hybriden Arbeitsplatzes müssen gewisse Anforderungen berücksichtigt werden. Neben ingenieurwissenschaftlich

Tabelle 1: Anwendung der Produktlebenslaufphasen nach Franke (1975) auf den hybriden Arbeitsplatz zur Mensch-Roboter-Kooperation

Produktlebenslaufphasen		Bedeutung im Kontext des hybriden Arbeitsplatzes
Herstellung	Produktplanung, Entwicklung, Konstruktion	Planung und Konstruktion des hybriden Arbeitsplatzes zur MRK; Vergleich verfügbarer Technologien
	Arbeitsvorbereitung, Teilefertigung	Vorbereitung des Einsatzortes; Bestellung bzw. Herstellung der Teilkomponenten
	Montage	Montage bzw. Demontage des Arbeitsplatzes
Verteilung	Transport	Transport des Arbeitsplatzes zu einem anderen Einsatzort
	Lagerung	Lagerung des Arbeitsplatzes im Falle einer längeren Nichtverwendung
	Vertrieb	Aspekte für den industriellen Vertrieb
Verwendung	Betrieb, Stillstand	Betrieb des Arbeitsplatzes; geplante und ungeplante Stillstände während Pausen und Wartung
	Wartung	regelmäßige Wartung einzelner Komponenten
	Reparatur	ungeplante Reparatur einzelner Komponenten
Rückführung	Recycling	Wiederverwendung der verwendeten Komponenten; Umbau des Arbeitsplatzes bzw. Erweiterung um neue Komponenten

ausgebildete Arbeitsgestaltern, die die Machbarkeit des geplanten Vorhabens sicherstellen können, sollten auch Nicht-Techniker involviert werden. Anhand der zur Verfügung stehenden Ressourcen sowie deren Qualifikationen muss entschieden werden, welche Komponenten selbst gefertigt werden können und welche extern hinzugekauft werden. Für den umzusetzenden hybriden Arbeitsplatz sollen insbesondere auch Konzepte der Interaktionsgestaltung sowie des Anlernens neuer Mitarbeiter (z. B. Meyer et al. 2014) berücksichtigt werden, wozu geeignete Interaktionsmedien vorzusehen sind. Sowohl für einen einfachen Transport als auch für einen Umbau des Arbeitsplatzes soll dieser modular aufgebaut sein. Seine Komponenten sollen mit einfachen Steck- oder Schraubverbindungen ohne Spezialwerkzeug montierbar bzw. demontierbar sein, um auch zukünftige Anforderungsänderungen berücksichtigen zu können. Gleichzeitig sollen die Komponenten ohne weitere Hilfsmittel wie bspw. Kräne transportierbar sein.

Für eine effiziente Planung ist es hilfreich, ein digitales Modell des Arbeitsplatzes zu erstellen, anhand dessen Module testweise zur Vermeidung von Kollisionen platziert werden können. Anhand eines solchen Modells ist es später möglich, die Arbeitsplatzergonomie mithilfe digitaler Menschmodelle zu evaluieren und ggf. Optimierungen am Arbeitsplatzlayout bzw. den Montageprozessen durchzuführen. Die Anordnung der einzelnen Komponenten wie bspw. Kommissionierbehältern oder Werkzeuge soll auf den geltenden Normen basieren, um eine gute ergonomische Arbeitsplatzausrichtung zu gewährleisten. Hierbei sind insbesondere die Norm DIN EN ISO 14738 sowie die Richtlinie VDI 3657 bzgl. anthropometrischer Merkmale des Menschen zu beachten. Sie spezifizieren optimale Arbeitshöhen sowie den maximalen Greifraum des Menschen. Zur individuellen Gestaltung des Arbeitsplatzes sollen dennoch sowohl seine Höhe als auch die Anordnung der wesentlichen Komponenten anpassbar sein. Dies ermöglicht während des Montageprozesses einen dynamischen Wechsel zwischen Stehen und Sitzen und reduziert somit die

Belastung der Arbeitsperson durch statische Haltungsarbeit. Zur Kompensation hoher Gewichte soll die Handhabung schwerer Werkzeuge mit Federzug- und Gegengewichtssystemen erleichtert werden. Stellteile und Interaktionskomponenten sollen entsprechend der Normen DIN EN ISO 12100 und DIN EN ISO 9241-110 eindeutig und erwartungskonform gestaltet sein.

Im Hinblick auf die kooperative Arbeit zwischen Mensch und Roboter müssen neben den allgemeinen Sicherheitsvorschriften (u. a. Europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, DIN EN ISO 12100, ISO 13854, DIN EN ISO 13855, DIN EN ISO 13857) auch spezielle Bestimmungen zur Robotik (DIN EN ISO 10218) berücksichtigt werden, um Gefährdungen der Arbeitsperson bereits konstruktiv auszuschließen. Basierend auf diesen Bestimmungen wird das Risiko des Arbeitsplatzes und seiner Teilkomponenten bewertet. Hiernach muss zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Sicherheitsfunktionen die Steuerung des Roboters dem Performance Level „d“ mit Kategorie „3“ entsprechen. Die Sicherheitsüberwachung muss demnach zweikanalig ausgelegt sein und die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde unter 10^{-6} liegen. Vor dem Hintergrund der MRK hat Missala (2014) weitere detaillierte Sicherheitsfunktionen mit entsprechend zugehörigen Beurteilungen definiert. Allerdings ist auch die DIN EN ISO 10218 nicht für eine direkte MRK ausgelegt, sodass es derzeit keine gültige Normenlage für das gleichzeitige Arbeiten des Menschen mit einem Roboter im selben Arbeitsbereich gibt. Im Normentwurf ISO/TS 15066 sollen hierfür unter anderem Grenzwerte für die Kollision zwischen Mensch und Roboter festgeschrieben werden.

Die Steuerung des Systems muss einerseits unbeabsichtigte Kollisionen zwischen Mensch und Roboter vermeiden, den Roboter sowie seine Greifer, Werkzeuge und Ladung im Falle eines Spannungsabfalls sichern und die Möglichkeiten des Missbrauchs durch den Menschen minimieren. Andererseits muss die Interaktion zwischen dem Mensch und System eindeutig und verständlich sein. Der Mensch muss ein präzises mentales Modell des Interaktionspartners aufbauen können, damit der Mensch jederzeit die Absicht des Systems erkennen kann. Hierzu sollte die Montagereihenfolge so gewählt werden, dass sie den Erwartungen des Menschen entspricht. Gleichzeitig muss das System mithilfe geeigneter Sensorik und Algorithmen jederzeit die Handlung des Menschen einschätzen und beurteilen können. Zusätzlich müssen die Arbeitsflussübergänge zwischen Mensch und Roboter für beide Seiten klar definiert bzw. erkennbar sein.

Die technischen Anforderungen an den Roboter für einen hybriden Montagearbeitsplatz hängen zunächst von der Art des Roboters ab. Die klassischen Industrieroboter wie bspw. Knickarm- oder SCARA-Roboter müssten mit verschiedenen Sensoren zur Abstands- oder Kräftekontrolle ausgestattet werden, um für eine direkte MRK einsetzbar zu sein, während Leichtgewichtroboter diese häufig bereits integriert haben. Insbesondere zur Vorhersage bzw. Detektion von Kollisionen mit dem Menschen oder Gegenständen im gemeinsamen Arbeitsbereich sind elektrooptische oder kapazitive Sensoren unerlässlich. Gleichzeitig beeinflusst die Wahl der Art des Roboters aber auch seine Platziergenauigkeit und maximale Traglast. Da der zu planende Arbeitsplatz auf die Montage kleinerer bis mittlerer Produkte abzielt, genügt in diesem Fall ein Leichtbauroboter mit einer geringeren Traglast.

In Hinblick auf die Erweiterbarkeit des Arbeitsplatzes bzw. der Wiederverwendbarkeit seiner Teilkomponenten ist der Einsatz standardisierter Schnittstellen für Hard- und Software zu verwenden. Hierzu zählen standardisierte Schnittstellen wie bspw. EtherCAT oder CAN-Bus mit den dazugehörigen Softwareprotokollen.

3. Entwurf eines hybriden Arbeitsplatzes zur Mensch-Roboter-Kooperation

Basierend auf den erhobenen Anforderungen wurde ein Prototyp des hybriden Arbeitsplatzes entworfen. An diesem Arbeitsplatz sollen beliebige Produkte in Kooperation zwischen dem Menschen und dem Roboter montiert werden. Als Roboter wird der 6-Achs-Leichtgewichtroboter SCHUNK LWA 4P mit dem 2-Finger-Greifer SCHUNK PG+70 verwendet. Dieser ist kopfüber an zwei Linearachsen montiert, um einen möglichst großen Greifraum abdecken zu können. Mit ca. 12 kg Eigengewicht, einer Traglast von bis zu 6 kg sowie einer Spannungsversorgung von 24 V bei max. 14 A ist der Roboterarm gut geeignet für einen Einsatz als verlastbares System.

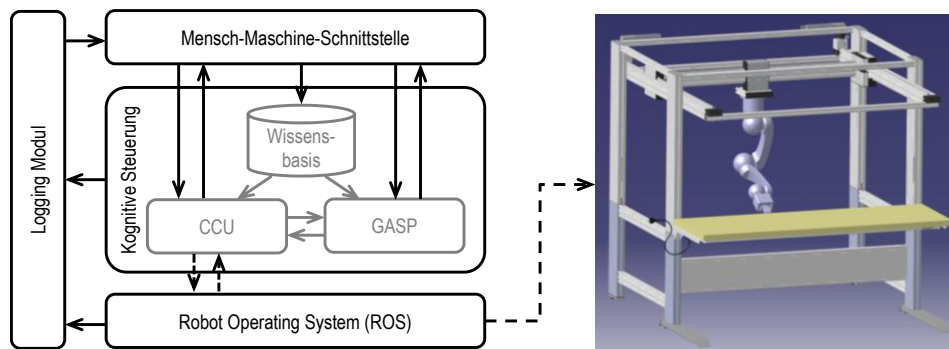


Abbildung 1: Architektur der Robotersteuerung. Gestrichelte Pfeile sind derzeit in der Entwicklung. (nach Faber et al. 2015)

Die Architektur der Robotersteuerung ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Bewegungssteuerung des Roboters erfolgt über den CAN-Bus mit dem standardisierten Protokoll CANopen und dem Open-Source Framework Robot Operating System (ROS). Mit seinem modulartigen Aufbau und der Integration vieler Aktoren und Sensoren bietet ROS großes Potential für eine spätere Erweiterung des Arbeitsplatzes. Die Montagesequenzsteuerung erfolgt über eine sog. kognitive Steuerung (Faber et al. 2014), deren Kern auf der kognitiven Softwarearchitektur Soar (Laird 2012) basiert. Auf Grundlage des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses sowie hinterlegter generischer Wenn-Dann-Produktionsregeln wird der Montageprozess hinsichtlich der Montagesequenz so gestaltet, dass er den Erwartungen des Menschen entspricht. Basierend auf einer abstrakten Produktbeschreibung in Form eines CAD-Modells werden die notwendigen Steuerungsbefehle für den Roboter zur Laufzeit automatisch generiert. Zur Vermeidung einer zu hohen ergonomischen Belastung für die Arbeitsperson gewichtet ein Graph-basierter Montagesequenzplaner (Graph-based Assembly Sequence Planner, GASP) alternative Montageschritte anhand ihres ergonomischen Risikos. Diese Gewichtung fließt in die Planung und Auswahl der optimalen Montagesequenz ein, sodass der Montageprozess insgesamt eine reduzierte Beanspruchung des Menschen aufweist.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die MRK kann zur flexibleren Gestaltung von Montageprozessen in heutigen Produktionssystemen eingesetzt werden. Durch geeignete Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Roboter kann die Effizienz in der Montage erheblich gesteigert und gleichzeitig die Beanspruchung des Menschen reduziert werden. Allerdings fehlen bis heute eindeutige rechtliche Rahmenbedingungen sowie

Standards und Normen, um eine direkte MRK industriell umsetzen zu können. Dieser Beitrag zeigte technisch-physikalische, menschenbezogene und normative Anforderungen für einen solchen hybriden Montagearbeitsplatz auf. Basierend auf den Anforderungen wurde ein erster Prototyp des Arbeitsplatzes mit einer kognitiv automatisierten Robotersteuerung vorgestellt.

Die weiteren Schritte umfassen zum einen eine weitere Ausgestaltung des Arbeitsplatzes anhand geltender Standards. Zusätzlich sollen aber auch neue Konzepte der MRK entwickelt und in ergonomischen Studien erprobt werden, die die Basis zukünftiger Produktionssysteme darstellen können. Hierzu zählt neben einer weiteren Reduzierung der Beanspruchung durch energetisch-effektorische Tätigkeiten auch die Integration anthropomorpher Bewegungscharakteristika für den Montageroboter (Kuz et al. 2014). Zudem lässt sich die Sicherheit für die MRK bspw. durch eine abstandsgeregelte Geschwindigkeitsregelung erhöhen, die die Geschwindigkeit des Roboters kontinuierlich an den Abstand zum Mensch anpasst (Lasota et al. 2014).

5. Literatur

- Bley H, Reinhart G, Seliger G, Bernardi M, Korne T (2004) Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly, CIRP Annals - Manufacturing Technology 53: 487-509
- Faber M, Mayer MP, Schlick CM (2013) Requirements for Modeling the Human Operator in Socio-Technical Production Systems. In: Schmitt R, Bosse H (Hrsg.) The 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments
- Faber M, Petruck P, Kuz S, Bützler J, Mayer MP, Schlick CM (2014) Flexible and Adaptive Planning for Human-Robot Interaction in Self-Optimizing Assembly Cells. In: Advances in The Ergonomics in Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future, AHFE Conference, S. 273-283
- Faber M, Bützler J, Schlick CM (2015) Human-robot cooperation in future production systems: Analysis of requirements for designing an ergonomic work system. Procedia Manufacturing 3: 510-517
- Franke HJ (1975) Methodische Schritte beim Klären konstruktiver Aufgabenstellungen, Konstruktion 27: 395-402
- Krüger J, Lien TK, Verl A (2009) Cooperation of human and machines in assembly lines. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58: 628-646
- Kuz S, Faber M, Bützler J, Mayer MP, Schlick CM (2014) Anthropomorphic Design of Human-Robot Interaction in Assembly Cells. In: Trzcielinski S, Karwowski W (Hrsg.) Advances in The Ergonomics in Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future, AHFE Conference, S. 265-272
- Laird JE (2012) The Soar Cognitive Architecture, MIT Press
- Lasota PA, Rossano GF, Shah JA (2014) Toward Safe Close-Proximity Human-Robot Interaction with Standard Industrial Robots. In: 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Taipei, Taiwan, S. 339-344
- Meyer F, Jeske T, Duckwitz S, Schlick CM (2014) Influence of Instructional Methods on Learning Sensorimotor Tasks. In: Ahrum T, Karwowski W, Marek T (Hrsg.) Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics 2014 (AHFE), The Printing House, Inc., Stoughton, FL, USA, S. 5796-5804
- Missala T (2014) Paradigms and Safety Requirements for a New Generation of Workplace Equipment. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 20: 249-256
- Nelles J, Bröhl C, Spies J, Brandl C, Mertens A, Schlick CM (2016) ELSI-Fragestellungen im Kontext der Mensch-Roboter-Kollaboration (in Druck). In: Bericht zum 62. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. - 04. März 2016, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA)
- Shen Y, Reinhart G (2013) Safe Assembly Motion - A Novel Approach for Applying Human-Robot Cooperation in Hybrid Assembly Systems. In: 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), S. 7-12

Danksagung: Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), welche im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ die vorgestellten Arbeiten fördert.