

Individualisierte Roboterassistenz zur Kompensation altersbedingter Einschränkungen des Muskel-Skelett-Systems an manuellen Montagearbeitsplätzen

Lukas STANKIEWICZ, Carsten THOMAS, Felix BUSCH, Jochen DEUSE,
Bernd KUHLENKÖTTER

*Institut für Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund
Leonhard-Euler-Straße 5, D-44227 Dortmund*

Kurzfassung: Die Änderung der Altersstruktur der Bevölkerung im Zuge des demografischen Wandels führt zu einer signifikanten Veränderung der physischen Leistungsfähigkeit von Erwerbstätigen. Insbesondere die Adaptions- und Kompensationsfähigkeit industrieller Montagearbeitsplätze bezüglich altersbedingter Einschränkungen des Muskel-Skelett-Systems ist begrenzt und bedingt, dass Mitarbeiter höheren Alters ihre gewohnte Tätigkeit häufig nicht mehr uneingeschränkt ausüben können.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die technologische Unterstützung manueller Montagetätigkeiten durch hybride Lösungen zunehmend an Bedeutung. Besonders die direkte Mensch-Roboter-Kollaboration weist großes Potenzial auf, altersbedingte, physische Leistungseinschränkungen, zugeschnitten auf den Mitarbeiter, zu kompensieren und gleichzeitig eine hohe Produktivität sicherzustellen.

In einem Verbundprojekt an der Technischen Universität Dortmund wird gemeinsam mit der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin sowie Systemanbietern und industriellen Anwendungspartnern ein roboterbasiertes Assistenzsystem entwickelt, das durch die Implementierung einer intuitiven Mensch-Technik-Schnittstelle auf verschiedene Leistungsparameter wie Kraft, Bewegungsraum und Körpergröße eingestellt werden kann. Die Adaption erfolgt, individuell abgestimmt auf zuvor erfasste Leistungsparameter des Mitarbeiters, durch eine technologische Erweiterung des Montagearbeitsplatzes. Zum Einsatz kommen u. a. speziell für die direkte Mensch-Roboter Kollaboration entwickelte, mobile Leichtbauroboter. Anhand von zwei Referenzsystemen wird aufgezeigt, wie das hybride System Leistungseinschränkung kompensiert und welche Vorteile sich für den Mitarbeiter im Montageprozess einstellen. Darüber hinaus werden die erforderlichen Planungsschritte von der Aufnahme individueller Leistungsparameter über die Simulation des hybriden Systems bis zur Realisierung beschrieben.

Schlüsselwörter: Mensch-Roboter-Kollaboration, Demografischer Wandel, Montage, Individualisierte Arbeitsgestaltung

1. Einleitung

Aufgrund des demografischen Wandels ist in Deutschland ein starker Rückgang des Bevölkerungswachstums zu verzeichnen, welcher Prognosen zufolge zu einer zunehmenden Verringerung der Bevölkerungszahl führt (Grünheid & Fiedler 2013). Diese Folgen des demografischen Wandels führen zu einem relativen Anstieg der

höheren Altersstufen und folglich zu einem Wandel der Zusammensetzung des Erwerbspersonenpotenzials (Richter et. al. 2012, Kistler & Hilpert 2001). Die zunehmende Alterung der erwerbstätigen Bevölkerung hat individuelle Einschränkungen der physischen Leistungsfähigkeit zur Folge. Insbesondere die motorischen Fähigkeiten, wie Beweglichkeit, Ausdauer, Koordination und Skelettmuskelkraft nehmen mit zunehmendem Alter ab und führen somit zu einer signifikanten Veränderung der physischen Leistungsfähigkeit des Menschen bei der Ausführung von Arbeitstätigkeiten (Maintz 2003). Diese individuellen Einschränkungen, wie bspw. verletzungs-, krankheits- oder altersbedingt begrenzte Gelenkgrenzwinkel oder Einschränkungen des Sichtfeldes, werden derzeit bei der Gestaltung von Arbeitsplätzen nicht ausreichend berücksichtigt. Besonders die Adaptions- und Kompensationsfähigkeit industrieller Arbeitsplätze bezüglich altersbedingter Einschränkungen des Muskel-Skelett-Systems sind begrenzt und bedingen, dass leistungsgewandelte Mitarbeiter die am Arbeitsplatz vorausgesetzten Anforderungen nicht in vollem Umfang erfüllen können. Resultierend sind diese Mitarbeiter gezwungen, den Einsatzbereich zu wechseln oder sogar vorzeitig aus dem Unternehmen auszuscheiden. Um die betriebliche Leistungs- und Innovationsfähigkeit deutscher Unternehmen auch in Zukunft zu gewährleisten, kommt der langjährigen Erfahrung älterer Mitarbeiter jedoch eine wichtige Bedeutung zu. Ein Ansatz zum Erhalt der Erwerbstätigkeit älterer Mitarbeiter besteht darin, Arbeitssysteme derart zu gestalten, dass individuell auf die Bedürfnisse und Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter eingegangen werden kann.

2. Einsatz hybrider Montagesysteme

Die gestiegene Varianz des Produktspektrums hinsichtlich Typ und Menge, wie auch die in den Belegschaften zunehmende Leistungsstreuung der Mitarbeiter erfordern eine deutliche Zunahme der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von Montagesystemen. Dies umzusetzen bedarf eine flexible, situationsabhängige Anpassung des Automatisierungsgrades und eine individuelle, auf den Mitarbeiter abgestimmte, technische Unterstützung im Sinne einer fähigkeitsorientierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Technik entlang des gesamten Montageprozesses. Dahingehend gewinnen teilautomatisierte, hybride Arbeitssysteme, in denen Mensch und Industrieroboter in direkter Kollaboration stehen, zunehmend an Relevanz (Busch et. al. 2013). Die Entwicklung und Überführung robotergestützter Assistenzsysteme in Montagearbeitssysteme zur Umsetzung einer direkten Mensch-Roboter-Kollaboration bietet unter Berücksichtigung bestehender Normen, Standards sowie gesetzlicher Anforderungen (u. a. DIN EN ISO 10218; DIN EN ISO 15536; DIN EN ISO 20685; ISO/TS 15066; BGIA) die Möglichkeit, durch die Gestaltung individualisierter Arbeitsplätze auf die individuell ausgeprägten Leistungsparameter der Mitarbeiter zu reagieren. Dabei weisen Roboter gegenüber Handhabungsgeräten den Vorteil auf, durch einen selektiv anpassbaren Automatisierungsgrad eine fähigkeitsorientierte Aufgabenteilung zwischen Menschen und Technik zu ermöglichen (Busch et. al. 2013). Durch die Integration des Robotersystems kann der Mitarbeiter in einzelnen Montageschritten unterstützt werden, indem das Assistenzsystem z. B. hohe Prozesskräfte ausführt oder sehr genaue sowie hoch repetitive Fügeoperationen übernimmt. Dies bietet sich auch dann an, wenn leistungsgewandelte Arbeitnehmer andernfalls die Tätigkeit nicht mehr oder nur mit erhöhtem physischen Aufwand leisten könnten.

2.1 Erfassung individueller Leistungsparameter

Die Gestaltung individualisierter Arbeitssysteme erfolgt mehrstufig. Zunächst werden die erforderlichen individuellen Leistungsparameter erhoben und in eine Simulationsumgebung überführt. Aufbauend auf dieser Simulation wird später das reale Arbeitssystem umgesetzt.

Zur simulationsgestützten Generierung von an den Unterstützungsbedarf angepassten Szenarien der individualisierten Roboterassistenz ist es erforderlich, die Leistungsparameter des Menschen ex ante zu erfassen. Aufgrund der altersbedingt vornehmlichen Abnahme physischer Leistungsparameter werden Daten zu individuellen Reichweiten und Grenzstellungen der Gelenke sowie zu Körpermaßen aufgenommen. Die Aufnahme und Speicherung dieser Parameter erfolgt über unterschiedliche Bewegungszyklen, welche bspw. mit Hilfe eines markerlosen Motion-Tracking-Systems am Mitarbeiter erfasst werden. Die so aufgezeichneten Bewegungsdaten geben Aufschluss über die erreichten Gelenkwinkel. Darüber hinaus erfasst das System die anthropometrischen Daten des Probanden, wie bspw. die Abstände der Gelenkpunkte. Diese Eingangsgrößen für die Simulation sind z. B. für die individuelle Gestaltung von Greifräumen (vgl. DIN 14738) zur Prüfung der Erreichbarkeit von Arbeitsmitteln im Arbeitsraum wichtig.

2.2 Überführung individueller Leistungsparameter in ein Simulationsmodell

Die gewonnenen Daten werden durch die Überführung in eine individualisierte Simulation des Mensch-Maschine-Systems für eine unter bewegungsökonomischen, ergonomischen und sicherheitstechnischen Aspekten optimierte Abstimmung der Mensch-Maschine-Interaktion genutzt. Das so modellierte Montagesystem wird virtuell erprobt und mittels eines individuell ausgeprägten Menschmodells auf unterschiedliche Fähigkeits- und Leistungsspektren adaptiert. Die Individualisierung des Menschmodells macht es möglich, hybride Montagesysteme bereits in der Planung auf die jeweiligen Fähigkeiten des Mitarbeiters einzustellen und hinsichtlich der wirkenden Belastungen anzupassen und zu optimieren. Ziel ist es, durch eine vollständige, auf den Mitarbeiter individuell angepasste Simulation der Mensch-Roboter-Kollaboration, bereits in der Planung den optimalen Grad der Zusammenarbeit zu bestimmen und folglich einen effizienten und wirtschaftlichen Wertschöpfungsprozess sicherzustellen sowie die individuelle physische Leistungsfähigkeit und Leistungsstreuung der Belegschaft frühzeitig in der Planung zu berücksichtigen. Die Analyse der physischen Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter soll hierbei regelmäßig oder bei akuten Änderungen in Teilen oder komplett erfasst und im Menschmodell angepasst werden können. – Folgend werden zwei Referenzarbeitssysteme vorgestellt, welche auf Basis des vorgestellten Konzepts als Demonstrator im industriellen Umfeld umgesetzt werden sollen.

3. Darstellung von Referenzarbeitssystemen

Innerhalb des Verbundforschungsvorhabens „Individualisierte sozio-technische Arbeitsassistenz für die Produktion (INDIVA)“ erfolgt am Institut für Produktionssysteme der Technischen Universität Dortmund in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) sowie Systemanbietern und industriellen Partnern die Entwicklung von Demonstratoren für roboterbasierte

Assistenzsysteme. Diese sollen einerseits in der Großserienfertigung eines Automobilherstellers und andererseits in der Kleinserienfertigung von Pumpenaggregaten eingesetzt werden und den Mitarbeiter individuell und flexibel unterstützen. Zur simulationsgestützten Auslegung der zu diesem Zweck eingesetzten Assistenzroboter sollen Leistungsparameter der Mitarbeiter im jeweiligen Arbeitssystem gezielt erfasst werden und so schädigende, belastende bzw. für den Menschen aufgrund von Verletzung oder Krankheit nicht schmerzfrei ausführbare Tätigkeiten durch den assistierenden Roboter übernommen oder unterstützt werden.

3.1 Arbeitssystem: Montage Pumpenaggregat

Innerhalb der Vormontage von Gehäusedeckeln für Pumpenaggregate werden Stiftschrauben zunächst von Hand in die Gewindebohrungen eingedreht und mit Hilfe eines manuell geführten Schlagschraubers festgezogen. Da je Gehäuse mehrere Stiftschrauben gesetzt werden müssen, ist der Mitarbeiter an dieser Arbeitsstation dazu gezwungen, Arbeitstätigkeiten mit stark repetitivem Charakter über die Dauer einer Schicht auszuführen. Anhand der geringen Varianz der auszuführenden Bewegungen werden somit vorrangig gleiche Muskel- wie auch Gelenkpartien belastet. Resultierend führt dies zu einer hohen Belastung der Arme, was wiederum zu arbeitsbezogenen Muskel-Skelett-Erkrankungen und irreparablen Schädigungen führen kann (vgl. Ellegast 2013).

Als Demonstrator wird ein Assistenzsystem auf Basis des Leichtbauroboters KUKA LBR iiwa entwickelt, welcher unter einer gesonderten Fokussierung von Sicherheitsaspekten speziell für die direkte Mensch-Roboter-Kollaboration konzipiert wurde (Bischoff et. al. 2010). Folglich weist dieser Roboter eine redundante Robotersteuerung sowie neue Sensorsysteme und eine kantenfreie Bauweise auf. Durch seine anthropometrisch dem menschlichen Arm nachempfundene Bauweise soll er als „dritter Arm“ zur Handhabung ergonomisch ungünstiger Tätigkeiten innerhalb des Arbeitssystems agieren. In dem abgebildeten Arbeitssystem erfolgt eine Arbeitsteilung, in der der Roboter Stiftschrauben in das Deckelgehäuse der Pumpenaggregate eindreht, während der Mitarbeiter eine Verschlusschraube in entsprechende Gehäusedeckel setzt. Dazu lernt der Mitarbeiter den Roboter für jede Gehäusedeckelvariante an, indem er den Roboterarm zunächst an die ersten Schraubpositionen führt. Die Verschraubung der Stiftschrauben erfolgt automatisch. Währenddessen kann der Mitarbeiter eine Verschlusschraube an die Unterseite des Gehäusedeckels fügen. Durch diese Arbeitsteilung können einerseits hochrepetitive Einschraubtätigkeiten sowie die wiederholende Handhabung des Schlagschraubers vermieden werden. Besonders für Mitarbeiter mit einer Beeinträchtigung der Beweglichkeit von Armen und Fingern kann so ein Assistenzsystem zur verminderten Beanspruchung dieser Körpersegmente geschaffen werden. Darüber hinaus bietet die parallele Ausübung der Tätigkeiten von Mensch und Roboter an einem Werkstück eine Reduzierung der erforderlichen Zeit zur Fertigstellung der Baugruppe, wodurch der zeitliche Druck auf den Mitarbeiter gemindert wird.

3.2 Arbeitssystem: Montage Rückwandmodul

In der Großserienfertigung von Automobilen werden aufgrund der vorherrschenden starren Verkettung von Arbeitsstationen und der strengen Taktung kaum Möglichkeiten geschaffen, leistungsgewandelte Mitarbeiter im Taktbetrieb an

den Montagelinien zu beschäftigen. Durch die zeitliche Synchronisierung der Arbeitsinhalte auf eine vorgeschriebene Taktzeit haben Verzögerungen an einer Station unmittelbar Auswirkung auf alle nachgelagerten Stationen. Mitarbeiter sind zur Ausführung ihrer Arbeitsinhalte starr an die vorgegebene Taktzeit gebunden. Physische Beeinträchtigungen, die zu einer zeitlichen Verzögerung der Ausführung einer Arbeitstätigkeit führen können, induzieren damit eine Stabilitätsreduktion.

Der innerhalb des Verbundprojektes INDIVA betrachtete Arbeitsplatz entstammt der Montagelinie einer Limousine, in der ein mit Steuergeräten bestücktes Rückwandmodul von einem Transportsystem an die Montagestation übergeben und im Fond der Fahrzeugkarosserie angebracht wird. Zum Fügen des Rückwandmoduls inklusive des erforderlichen Kabelbaums wird aufgrund der großen Masse der Bauteile ein Handhabungsgerät eingesetzt, welches dem Mitarbeiter als Hilfe dient, das Rückwandmodul zu positionieren. Für diese Arbeitsvorgänge muss der Mitarbeiter sowohl schwere Lasten handhaben, als auch das Bauteil unter gebückter Haltung im Fahrzeuginnenraum passgenau an die Montageposition führen.

Einer Beschäftigtenbefragung zu gesundheitlichen Beschwerden und Belastung am Arbeitsplatz zufolge erfahren ältere Mitarbeiter im verarbeitenden Gewerbe insbesondere durch Heben und Tragen sowie Ziehen und Schieben schwerer Lasten, durch ungünstige Körperhaltungen wie bücken oder Überkopparbeit, aber auch durch ununterbrochen gleiche Bewegungen eine starke Beanspruchung (Zok 2012). Insbesondere die erstgenannten Belastungen können durch die Integration eines Assistenzroboters an diesem Arbeitsplatz vermieden werden. Der Einsatz eines assistierenden Roboters bewirkt, dass das Handhaben der Last automatisiert erfolgt und belastende Körperhaltungen während der Positionierung vermieden werden. Darüber hinaus können die Bauteilgruppen für die Vormontage der Steuergeräte am Rückwandmodul durch den Einsatz des Roboters individuell an die Anthropometrie des Mitarbeiters ausgerichtet und in geeigneter Arbeitshöhe bereitgestellt werden, wodurch eine uneingeschränkte Erreichbarkeit aller Fügestellen in einer belastungsarmen körperlichen Grundhaltung gewährleistet werden kann. Wie bereits in dem Fall der Montage von Pumpenaggregaten stellt sich auch hier der Vorteil ein, dass die individuell skalierbare Arbeitsteilung dazu führt, den Menschen teilweise vom Arbeitstakt zu entkoppeln und somit zu entlasten. Zudem kann das Arbeitssystem durch die Flexibilität der Roboterkinematik individuell und ohne großen Rüstaufwand auf unterschiedliche Anthropometrien von Mitarbeitern angepasst werden.

4. Fazit

Die zwei dargestellten Einsatzmöglichkeiten von individualisierbaren Roboterassistenzsystemen in der Montage zeigen, dass hybride Montagesysteme und insbesondere die direkte Mensch-Roboter-Kollaboration dazu beitragen können, die in Zukunft zunehmenden altersbedingten Einschränkungen von Erwerbstätigen an ihren Arbeitsplätzen zu kompensieren. Durch die simulationsgestützte Planung, Auslegung und Gestaltung dieser hybriden Arbeitsplätze wird die Möglichkeit geschaffen, die Vorteile des Menschen sowie des Roboters zu vereinen und individuell auf den Mitarbeiter auszurichten. Auf diese Weise kann auf altersbedingte Beeinträchtigungen des Bewegungsapparates, u. a. bezogen auf Muskelarbeit, Beweglichkeit oder Präzision, durch den Roboter angepasst reagiert werden. Dennoch bleibt die menschliche Arbeitskraft, deren hohe Anpassungs- und

Entscheidungsfähigkeit sowie Geschicklichkeit und Fähigkeit zur kreativen Problemlösung unersetzbar ist, im Arbeitssystem erhalten (vgl. Hägele und Schäfer 2006). Besonders in Anbetracht des fortschreitenden demographischen Wandels erfordern Arbeitsplätze zukünftig eine zunehmende Anpassung an die physische Leistungsfähigkeit des Menschen, um die Erfahrung Erwerbstätiger hohen Alters möglichst lange im Unternehmen zu binden und den Folgen eines fortschreitenden Fachkräftemangels entgegenzutreten. Dies wird nur möglich, sofern körperlichen Schädigungen des Menschen durch eine Entlastung der Mitarbeiter bspw. anhand des Einsatzes von Assistenzsystemen vorgebeugt wird. In Anbetracht der stetig weiterentwickelten Sicherheitstechnik erfährt die Mensch-Roboter-Kollaboration somit eine zunehmende Bedeutung zur Gestaltung von gleichermaßen ökonomischen und ergonomischen Arbeitsplätzen.

5. Literatur

- Busch F, Hartung J, Thomas C, Deuse J, Kuhlenkötter B, Wischniewski S (2013) *Industrie Management* 29, 7-10.
- BGIA, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (2011) *BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie. Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern.*
- Bischoff R, Kurth J, Schreiber G, Koeppel R, Albu-Schäffer A, Beyer A, Eiberger O, Haddadin S, Stemmer A, Grunwald G, Hirzinger G (2010) *The KUKA-DLR Lightweight Robot arm – a new reference platform for robotics research and manufacturing.* In: *Robotics (ISR) 41st International Symposium on Robotics.* 741-748.
- DIN, Deutsches Institut für Normung e. V (2012) *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen.* EN ISO 10218.
- DIN, Deutsches Institut für Normung e. V (2008) *Sicherheit von Maschinen - Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen.* EN ISO 14738.
- DIN, Deutsches Institut für Normung e. V (2007/2008): *Ergonomie - Computer-Manikins und Körperumriss-Schablonen.* EN ISO 15536.
- DIN, Deutsches Institut für Normung e. V (2010) *3D-Scanverfahren für international kompatible anthropometrische Datenbanken.* EN ISO 20685.
- Ellegast R (2013) *Tätigkeiten mit häufigen repetitiven Bewegungen im Hand-Arm-Bereich.* In: Hartmann B, Spallek M, Ellegast R: *Arbeitsbezogene Muskel-Skelett-Erkrankungen: Ursachen, Prävention, Ergonomie, Rehabilitation.* 133-144.
- ISO, International Organization for Standardization (in Bearbeitung) *Robots and Robotic Devices - Collaborative industrial robots.* TS 15066.
- Grünheid E, Fiedler C (2013): *Bevölkerungsentwicklung – Daten, Fakten, Trends zum demografischen Wandel: Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (Hrsg.).*
- Hägele M, Schäfer T (2006) *Roboteranwendungen.* In: Gevatter HJ, Grünhaupt U (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion.* 768-786.
- Kistler E, Hilpert M (2001) *Auswirkungen des demographischen Wandels auf Arbeit und Arbeitslosigkeit. Politik und Zeitgeschichte.* Bundeszentrale für politische Bildung. 5-13.
- Maintz G (2003) *Arbeit bis 67? – Überlegungen aus arbeitsmedizinischer Sicht.* Bundesanstalt für Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz.
- Richter G, Bode S, Köper B (2012) *Demografischer Wandel in der Arbeitswelt.* Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Zok K (2010) *Gesundheitliche Beschwerden und Belastungen am Arbeitsplatz -Ergebnisse aus Beschäftigtenbefragungen.* Wissenschaftliches Institut der AOK.

Danksagung: Ein besonderer Dank gilt den Projektpartnern sowie dem Projektträger. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt INDIVA wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des BMBF-Programms "Technik stellt sich auf den Menschen ein - Innovative Schnittstellen zwischen Mensch und Technik" gefördert und vom Projektträger VDIVDE-IT betreut.