



Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen

Sebastian Schlund¹ · Walter Mayrhofer¹ · Patrick Rupprecht¹

Online publiziert: 8. Oktober 2018
© Der/die Autor(en) 2018

Zusammenfassung

Die Verbesserung der Ergonomie ist ein zentrales Ziel der Arbeitswissenschaft im Spannungsfeld von Rationalisierung und Humanisierung. Während die konventionelle Gestaltung von Montagearbeitsplätzen heute bereits in vielen Punkten als ausgereizt gilt, eröffnen aktuelle technologische Entwicklungen neue Möglichkeiten für die Gestaltung individualisierbarer Arbeitsplätze. Im vorliegenden Beitrag wird bestehendes Wissen zu Gestaltungsdimensionen von Montagearbeitsplätzen dargestellt und für die Nutzung bei der Gestaltung individualisierbarer Montageassistenzsysteme entsprechend geordnet. Dabei werden die Dimensionen Arbeitsplatz, Arbeitsumgebung sowie weitere Aspekte, wie die Nutzung von Assistenzsystemen, betrachtet. Die Zusammenstellung der Möglichkeiten in Form einer Synopsis stellt den ersten Schritt einer systematischen Entwicklung individualisierbarer Montagearbeitsplätze dar. Auf dieser Grundlage sollen unterschiedliche Individualisierbarkeitskonstellationen experimentell gestaltet und die Auswirkungen auf Produktivität, Ergonomie und Nutzerakzeptanz bewertet werden. Im Ergebnis werden allgemeingültig anwendbare Gestaltungsregeln und Merkmalskombinationen für individualisierbare Montagesysteme gesucht.

Praktische Relevanz: Die Systematik einsetzbarer Individualisierungsdimensionen wird über einen Pilotarbeitsplatz für die Baustellenmontage bzw. variantenreiche Einzel- und Kleinserienmontage untersucht und konzipiert, um die industrielle Anwendung vorzubereiten.

Schlüsselwörter Individualisierung · Montagearbeitsplatz · Arbeitsgestaltung · Individualisierbarkeitsdimensionen · Physische/kognitive Assistenzsysteme

✉ Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Sebastian Schlund
sebastian.schlund@tuwien.ac.at

¹ Forschungsbereich Mensch-Maschine-Interaktion/Stiftungsprofessur Human Centered Cyber Physical Assembly and Production Systems, Institut für Managementwissenschaften, TU Wien, Theresianumgasse 27, 1040 Wien, Österreich

Options for the design of individualized assembly workstations with respect to recent technological developments

Abstract

The improvement of ergonomics is a central goal of industrial engineering in the rival fields of rationalisation and humanisation. Although conventional design of assembly work stations seems exhausted, current technological developments open new possibilities for the design of individualisable work stations. The presented paper is a collection of current knowledge with respect to the design dimensions of individualisable assembly work stations that has been rendered with respect to utilization for individualisable assembly assistance systems. This encompasses dimensions of the work station (working height, reaching area of the hands), work environment (lighting, ventilation and climate, acoustic situation) as well as other aspects as the utilization of assistance systems. The synoptic disposition of options is a first step in the systematic development of individualisable assembly work stations. Based on the presented depiction, it is intended to experimentally configure different individualisation-constellations and to evaluate them with respect to their effects on productivity, ergonomics and user acceptance. As a result, universally valid and applicable design rules and combinations of attributes for individualisable assembly systems are developed.

Practical Relevance: The system of deployable individualization dimensions is investigated by means of a pilot workplace in the field of the variant rich single spot or small series assembly, in order to prepare an industrial application.

Keywords Individualization · Assembly work station · Work design · Dimensions of individualization · Physical/cognitive assistance

1 Ausgangssituation

Die Schwerpunkte ergonomiegerechter Gestaltung von Montagearbeitsplätzen haben sich in den letzten Jahren gewandelt. Die konventionelle Auslegung von Arbeitsplätzen für möglichst viele MitarbeiterInnen, Belastungsreduzierung und die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen haben flächendeckend Eingang in den betrieblichen Gestaltungsrahmen gefunden. Arbeitsplätze in Europa sind heute weitgehend schädigungslos, zumutbar und ausführbar (Luczak et al. 1989). Für noch bestehende ergonomisch ungünstige Arbeitsplätze werden zunehmend Assistenzsysteme (Cobots, Exoskelette, Fähigkeitsverstärker) getestet und implementiert (Schembera-Kneifel & Keil 2016; Müller et al. 2016; Bornmann et al. 2016). Im Bereich der Montage sind dies heute z. B. Arbeitsplätze mit Überkopfarbeit, eng getakteten Arbeitsinhalten (z. B. Fließlinien der Motoren- und Fahrzeugfertigung) und repetitiven, kurzzyklischen Tätigkeiten.

Neben der Senkung auftretender Belastungen an diesen Arbeitsplätzen verlagert sich der Forschungsfokus auf die Nutzung neuer Technologien und die intelligent vernetzte Automatisierung und Digitalisierung. High-Speed-Kamerasysteme, mobile Endgeräte für Augmented und Virtual Reality-Anwendungen, Projektionssysteme sowie kollaborationsfähige und mobile Roboter werden für die breite industrielle Anwendung in Assistenzsystemen in der Produktion nutzbar und erschwinglich.

Durch Nutzung heute einsetzbarer Technologien zur Ergonomieverbesserung werden die arbeitswissenschaftlichen Gestaltungsziele höherer Ordnung – Persönlichkeitsförder-

lichkeit und Sozialverträglichkeit (Luczak et al. 1989) – auf einer neuen Stufe aufgegriffen. Gleichzeitig bietet die Berücksichtigung individueller Dimensionen die Möglichkeit, das Dilemma der Gestaltung von Arbeitsplätzen nach dem Prinzip „one-size-fits-all“ aufzulösen und tatsächlich optimale Beanspruchungskonstellationen für alle NutzerInnen eines Arbeitssystems zu schaffen. Parallel dazu entsteht aktuell eine große Aufgeschlossenheit für technologisch unterstützte Assistenzsysteme in der Produktion. Vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und einem zunehmenden Fachkräftemangel ist die Gestaltung attraktiver Arbeitsplätze in der Montage ein Mittel zur Attraktivitätssteigerung produzierender Unternehmen im härter werdenden Kampf um qualifizierte, motivierte und loyale Fachkräfte (Spath 2013).

Die Bewertung und Auswahl von Individualisierungsdimensionen ist abhängig von den Einsatzbedingungen des Anwendungsfalls, den Anforderungen des jeweiligen Arbeitssystems und dem finanziellen und organisatorischen Aufwand der Lösungsumsetzung. Aktuell entstehen Teillösungen der Arbeitsplatzgestaltung mit individualisierbar anpassbaren Parametern, die ohne manuelle Eingriffe der NutzerInnen automatisch eingestellt werden. Diese beschränken sich jedoch auf einzelne Parameter wie die Arbeitshöhe (Reinhart et al. 2010), die Materialanreichung (Goldhahn et al. 2017), die Farbanteile und Intensität der Beleuchtung (Bauer et al. 2015), sowie individuelle Berechtigungen und Informationsrepräsentation (Gerlach 2010; Spath et al. 2012).

2 Forschungsfrage

Die Frage, welche Individualisierungsdimensionen und untergeordnete Parameter in welchem Umfang und durch welche technische Realisierung umgesetzt werden, beeinflusst maßgeblich eine unternehmerische Auswahlentscheidung. Gleichzeitig bergen Faktorkombinationen das Potenzial für Aufwandsreduzierungen in Planung und Umsetzung, bspw. die Nutzung der gleichen IT-Infrastruktur für die Steuerung der individualisierbaren Höhe des Arbeitsplatzes, einer Materialanreicherung per Cobot und der individualisierbaren Einstellung von Beleuchtungsintensität und -stärke.

Zentrale Frage der Arbeit ist deshalb, in einem ersten Schritt zu klären, wie und in welchen Aspekten Montagearbeitsplätze überhaupt an spezifische Nutzercharakteristika angepasst werden können. Eine gesammelte Darstellung der Individualisierbarkeitsoptionen stellt die Grundlage für die technische Realisierung mithilfe digitaler Vernetzung und/oder physischer Assistenzsysteme dar und erlaubt in weiterer Folge vergleichbare Aussagen zur Belastungsreduzierung sowie den Auswirkungen auf die unternehmerischen Zielgrößen Effektivität, Effizienz und Qualität.

Montagearbeitsplätze dienen dem Zusammenbau von Teilen, Baugruppen zu Erzeugnissen oder höherer Erzeugnisebenen und werden typisch als Einzelarbeitsplätze, Fließlinien oder Baustellenmontagen ausgeführt (Lotter & Wiendahl 2012). Nutzer sind MitarbeiterInnen, die permanent oder temporär Tätigkeiten an diesen Arbeitsplätzen durchführen. Spezifische Charakteristika sind physiologische oder psychologische Merkmale der NutzerInnen, welche individuell unterschiedlich optimale Einstellungen der Arbeitsplatzgestaltung bedingen. Im Ergebnis werden Dimensionen als Grundlage für individualisierbare Montagearbeitsplätze gesucht, um Arbeitstätigkeiten in der Montage hinsichtlich ihrer Effizienz und ihrer Beanspruchung für jeden Nutzer zu optimieren. Dazu wird nachfolgend eine Sammlung einsetzbarer Individualisierungsdimensionen von Montagesystemen vorgestellt. Diese stellt den ersten Schritt einer systematischen Entwicklung individualisierbarer Montagearbeitsplätze dar (siehe Abb. 1).

Auf Basis dieser Sammlung werden unterschiedliche Individualisierbarkeitsoptionen experimentell gestaltet und die Auswirkungen auf Produktivität, Ergonomie und Nutzerakzeptanz bewertet. Ergebnis sollen allgemeingültig

anwendbare Gestaltungsregeln und Merkmalskombinationen für individualisierbare Montagesysteme sein. Die Sammlung einsetzbarer Individualisierungsdimensionen wird anhand eines Pilotarbeitsplatzes für die Baustellenmontage für variantenreiche Einzel- und Kleinserien abgebildet. In weiterführenden Arbeiten werden die Umsetzungspotenziale durch Möglichkeiten physischer Assistenz und digitaler Vernetzung experimentell erprobt und Auswirkungen auf die zentralen Zielgrößen arbeitswissenschaftlicher Gestaltung ebenso untersucht, wie die Einbettung individualisierbarer Arbeitsplatzgestaltung in Arbeitsorganisation und Konzepte des arbeitsplatznahen Lernens.

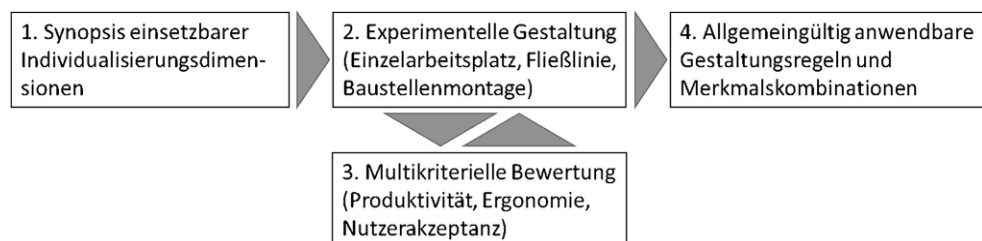
Speziell zur Integration unterschiedlicher Individualisierungsdimensionen und -parameter sowie zur individualisierbaren, rollenspezifischen Interaktionsgestaltung und Handhabung von Assistenzsystemen besteht noch Forschungsbedarf (BMW 2016). Eine systematische Aufstellung zu berücksichtigender Individualisierungsdimensionen findet sich aktuell weder in der Standardliteratur zur Ergonomie und Montagegestaltung noch in den isolierten Umsetzungsansätzen individualisierter Werkerassistenz.

Aktuelle Arbeiten fokussieren auf individualisierte, digitale Mensch- und Designmodelle für Montagearbeitsplätze (Deuse et al. 2015; Thomas et al. 2016), individualisierbare Profildatenmodelle (Galaske & Anderl 2016) sowie Assistenzsystemen zur Überwachung von Ergonomieparametern (Nguyen et al. 2016; Brandl et al. 2016). Eine Bewertung des Lösungsraums der Individualisierungsdimensionen und -parameter hinsichtlich unternehmerischer Effektivitäts- und Effizienzzielen sowie ergonomischer, arbeitsorganisatorischer und Nutzerakzeptanzkriterien wird aktuell von keiner der bekannten Arbeiten durchgeführt. Forschungsbedarf besteht deshalb in der systematischen Bewertung und Auswahl von Individualisierungsdimensionen und -parametern vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen.

3 Standardisierung und Individualisierung

Industrielle Produktion und insbesondere die Bereiche der Montage sind in den letzten Jahren verstärkt einem Trend der Produktindividualisierung und Anpassung an kunden-

Abb. 1 Ansatz zur systematischen Entwicklung individualisierbarer Montagearbeitsplätze
Fig. 1 Approach for the systematic development of individualizable assembly work stations



spezifische Anforderungen unterworfen. Dies hat eine hohe Anzahl an Modellen und Produktvarianten zur Folge, welche über meist hoch standardisierte Prozesse gefertigt werden. Nicht zuletzt durch die Forderung des Lean-Managements nach Standardisierung wurden oftmals hochwertige Standard-Arbeitsplätze entwickelt, welche sich an den anthropometrischen Maßen der jeweiligen Nutzerkohorte orientieren. Die Ausgestaltung der Arbeitsplätze, ihrer Gestaltungsdimensionen und -parameter folgt dabei der „Perzentillogik“, einer Berücksichtigung anthropometrischer Körpermaße im Bereich zwischen dem 5. und dem 95. Perzentil (meist zwischen dem 5. Perzentil für Frauen und dem 95. Perzentil für Männer). Eine Einstellung der Arbeitsplätze auf die tatsächlichen Maße der einzelnen NutzerInnen findet somit nicht statt. Zudem wird in Kauf genommen, dass bis zu zehn Prozent der NutzerInnen nur ergonomisch ungünstig an den so gestalteten Arbeitsplätzen arbeiten können. Hinzu kommt, dass neben den anthropometrischen Unterschieden, auch individuelle Präferenzen unberücksichtigt bleiben (z. B. Händigkeit, Werkzeug- und Informationsbereitstellung).

Im Rahmen der Gestaltungskonzepte „altersgerechter“ bzw. „demografierobuster“ Arbeitsgestaltung (Lotter & Wiendahl 2012; Matt et al. 2016) wird verstärkt versucht, auf den demographischen Wandel unserer Gesellschaft zu reagieren. Durch spezifische Anpassungsmöglichkeiten der Arbeitsplätze nach den Grundsätzen ergonomischer Gestaltung sowie den Einsatz spezieller fähigkeitsverstärkender Hilfsmittel wie Hebehilfen wird verstärkt auf die Bedürfnisse einer älter werdenden Belegschaft eingegangen (Latos et al. 2018). Der Ansatz individualisierbarer Arbeitssystemgestaltung basiert auf der Grundidee, dass ein individuell anpassbarer Arbeitsplatz nicht nur ältere MitarbeiterInnen unterstützt, sondern jegliche persönlichen Unterschiede berücksichtigt. Damit geht der Ansatz über die traditionelle Gestaltung altersgerechter Arbeitsplätze hinaus und erweitert diesen vor der Grundannahme, dass Unterschiedlichkeit nicht nur eine Dimension des Alters, sondern vieler weiterer Dimensionen (bspw. Körpermaße, Geschlecht, Händigkeit, psychisch/kognitive Konstitution) darstellt und sich zudem dynamisch über den Zeitverlauf, bspw. einer Erwerbsbiografie, entwickelt.

Das Forschungsfeld individualisierbarer Arbeitsplatzgestaltung wird durch technologische Entwicklungen digitaler und physischer Assistenzsysteme angetrieben. Des Weiteren gibt es verstärktes Interesse an der Digitalisierung industrieller Wertschöpfung mit dem Ziel einer echtzeitfähigen, intelligenten Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten unter dem Überbegriff „Industrie 4.0“ (Heng 2014; acatech 2012). Dadurch ergeben sich vielfältige neue Möglichkeiten der Anpassung an physiologische Eigenschaften, individuelle Bedürfnisse und Fähigkeiten sowie persönlichen Vorlieben der NutzerInnen. Es gilt

diese unter Berücksichtigung arbeitswissenschaftlicher und ergonomischer Erkenntnisse zu nutzen um die Defizite des „one-size-fits all“ Ansatzes der Arbeitsplatzgestaltung zu überwinden.

3.1 Individualisierbare Montagearbeitsplätze

Jeder Arbeitsplatz sollte individuelle Körpermaße bzw. spezifische Bewegungsmöglichkeiten berücksichtigen, wobei die einfache Veränderbarkeit der Parameter des Arbeitsplatzes gewährleistet werden muss (Lotter & Wiendahl 2012). Heute werden standardisierte Baukastensysteme zur Gestaltung von Montagearbeitsplätzen angeboten. Eine spezifische, automatisierte und flexible Anpassung entsprechend individueller Gegebenheiten und Vorlieben der MitarbeiterInnen existiert nur fragmentarisch und prototypenhaft. Als individualisierbare Montagesysteme werden adaptierbare Montagesysteme verstanden, die sich eigenständig an sich verändernde Nutzer(eigenschaften) anpassen. Adaptierbare Systeme stellen Systeme dar, die vom Nutzer an sich verändernde Umfeldbedingungen (kontextadaptierbar) angepasst werden können (Oppermann 1994). Im Unterschied zu adaptiven Systemen (eigenständige Anpassung), zeigen diese höhere Akzeptanz und Systemtransparenz, dürfen allerdings nicht mit zu hohem Einstell- oder Programmieraufwand verbunden sein (Reinhart et al. 2017).

In der sozio-technischen Arbeitssystemgestaltung bieten individualisierbare Montagesysteme viele Möglichkeiten der Erhöhung der Produktivität und Zufriedenheit der MitarbeiterInnen. Individualisierbarkeit bedeutet, dass eine Initialeinstellung der Individualisierungsdimensionen und -parameter des Montagearbeitsplatzes (Default-Setting), intuitiv und leichtgängig vom Nutzer übersteuert bzw. verstellt werden kann. Oft muss die Individualisierung eingefordert werden, da vorhandene Einstellmöglichkeiten aus unterschiedlichsten Gründen (Unwissenheit, Zeitmangel, Umständlichkeit) nicht genutzt werden.

Die Dimensionen und Parameter, welche bei einem Montagearbeitsplatz an spezifische Charakteristika der NutzerInnen individualisierbar angepasst werden können sowie die Potenziale und der Mehrwert für MitarbeiterInnen und Unternehmen werden nachfolgend dargestellt.

3.2 Aktuelle technologische Entwicklungen

Bei der Entwicklung und Gestaltung von Montagearbeitsplätzen fließen vermehrt Lösungen digitaler Vernetzung und physischer Assistenz ein. Physische Assistenzsysteme bezwecken eine physische Entlastung der MitarbeiterInnen im Sinne einer Verbesserung in Bezug auf Kraftumleitung, Krafteinleitung, Kraftverstärkung, Stabilisierung, Abstützung, Verbesserungen der Ergonomie oder der Präzision der Arbeitsausführung (Wulfsberg 2017).

Beispiele sind Handgabelhubwagen, Balancer, zunehmend auch Cobots für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit, Exoskelette und andere Fähigkeitsverstärker. Digitale Vernetzung im Sinne von Assistenzsystemen zur kognitiven, kommunikativen und organisatorischen Entlastung und Unterstützung der MitarbeiterInnen, umfasst beispielhaft folgende Einsatzbereiche:

- Überwachung von Arbeitstätigkeiten, Belastung, Kompensation von Leistungs- und Gefühlsschwankungen, Zeitmanagement, Verteilung von Aktivitäten, Sicherheit am Arbeitsplatz (kognitive Assistenz)
- Kontakterleichterung, Glättung von Hierarchien, Teamarbeit, Aktivitätenverteilung, Verbesserung des Kommunikationsflusses, Förderung des Arbeitsklimas und Ermunterung der MitarbeiterInnen (kommunikative Assistenz)
- Bessere Überwachung von Systemzuständen, Arbeitsreihenfolgen, Prozessen, Management von Verbesserungsvorschlägen, Anregungen und Ideen, Teilen und Verbreitung von Wissen (organisatorische Assistenz)

Beispiele für die digitale Vernetzung von Montagearbeitsplätzen sind Systeme der Werkerinformation und -führung, Entscheidungsunterstützungssysteme, arbeitsplatznahe Lernassistenzsysteme (Spath 2013), Instrumente der selbstorganisierten Aufgaben- und Personaleinsatzplanung (Bauer et al. 2014) und des Störungsmanagements (Spath et al. 2014). Durch die zunehmende Verbreitung der Assistenzsysteme steht bereits die informatorische Basis zur Verfügung, die Arbeitsplätze in Abhängigkeit kontextbezogener Informationen anzupassen (sogenannte Cognitive Environments).

3.3 Synopsis der Individualisierbarkeitmöglichkeiten

Der vorliegende Beitrag sammelt relevante Individualisierungsparameter von Montagearbeitsplätzen und ordnet sie in sieben Dimensionen ein. Dabei wird auf anthropometrische und physiologische Aspekte sowie die individualisierbare Gestaltung von Assistenzsystemen fokussiert. Tab. 1 zeigt eine Synopsis der grundsätzlichen Dimensionen eines Montagesystems mit nachfolgender kurzer Beschreibung.

3.3.1 Arbeitshöhe

Körperhaltungen sollten so gewählt werden, dass eine möglichst geringe Beanspruchung für die betroffene Person resultiert. Eine aufrechte Körperhaltung im Stehen oder Sitzen mit möglichst geringen Anteilen gebeugter Haltung und Überkopparbeit ist anzustreben. Montagevorgänge über Herzhöhe sollten vermieden werden, denn dabei wird die Blutzirkulation beeinträchtigt (Lotter & Wiendahl 2012).

Bei der Unterscheidung zwischen Sitz- und Steharbeitsplätzen nimmt die Eignung für kraftaufwändige Tätigkeiten sowie die Größe der Funktionsräume im Sitzen ab; jedoch steigt die Eignung für Präzisionsarbeiten. Die optimale Tischhöhe hängt maßgeblich von der individuellen Körperhöhe bzw. Körpersitzhöhe (für Sitz- bzw. Steharbeitsplätze) ab. Zwischen dem 5. Perzentil weiblich und dem 95. Perzentil männlich unterscheiden sich die optimalen Arbeitshöhen bereits um 21,5 cm (96 bzw. 117,5 cm) (Schmauder & Spanner-Ulmer 2014). Wird dies mit einer Nutzung des Arbeitsplatzes für feine und mittelschwere Arbeiten kombiniert, kommen bis zu 30 cm hinzu. Nationale Unterschiede können in extremen Fällen (z. B. Vietnam/Deutschland) weitere 15 cm ausmachen (Jürgens et al. 1989).

3.3.2 Blick- und Greifbereich, Händigkeit

Der ergonomische Blick- und Greifbereich bei einem Arbeitsplatz sollte innerhalb des horizontalen Blickwinkelbereichs von 35 Grad nach rechts und links liegen. Die Montagevorrichtung, der Fügebereich und die Teilebereitstellung von häufig benötigten Einzelteilen soll zwischen 15 Grad nach rechts und links liegen, was dem optimalen Blickwinkelbereich entspricht. Weiters muss auf mögliche anatomischen Bewegungen, Bewegungsgeschwindigkeiten und erreichbare Körperkräfte sowie den notwendigen persönlichen Komfort bei den ausführenden Tätigkeiten eingegangen werden (Bullinger-Hoffmann et al. 2016). Zusammenfassend soll sich der Greifbereich in einer optimalen winkelmäßigen bzw. höhenmäßigen Lage befinden und die Greifwege und -längen sowie die Teilebereitstellung soll auf den Greifbereich angepasst werden.

Aktuell sind vorwiegend standardisierte Greifbereiche definiert, die für alle MitarbeiterInnen und jeden Arbeitsplatz gelten. Die Individualisierung des Greifbereichs und die Berücksichtigung der Bedürfnisse der MitarbeiterInnen erlauben die Nutzung weiterer Potenziale. Die individualisierte Anpassung der Dimensionen kann manuell oder auch automatisch durch Erkennung der Mitarbeitermerkmale durch Kameras oder durch Eingabe von personenspezifischen Daten geschehen.

Die Händigkeit ist für feinmotorische Tätigkeiten, speziell in der industriellen Montage von höchster Bedeutung. Um Montagetätigkeiten effizient durchzuführen, braucht es ein gewisses Maß an Feingefühl und Fertigkeit, meist einer bestimmten Hand (Sattler & Klußmann 2014). Europa hat einem Linkshänderanteil von 10 bis 15 % (Schmauder 1996; Chapman et al. 1987). Arbeitsplätze, Maschinen und Hilfsmittel mit asymmetrischen Handhabungsanforderungen sollen für Rechts- und Linkshänder adaptierbar sein. Eine individuelle Einstellung auf die Händigkeit vermeidet

Tab. 1 Synopsis der Individualisierbarkeitmöglichkeiten von Montagearbeitsplätzen**Table 1** Synopsis of possibilities for individualization of assembly work stations

Einstellmöglichkeiten	Nutzung zur Individualisierbarkeit	Erwarteter Nutzen
<i>1) Dimension: Arbeitshöhe</i>		
<ul style="list-style-type: none"> – Höhe der Arbeitsfläche – Nutzung der Arbeitsfläche als Sitz- oder Steh-Arbeitsplatz 	<ul style="list-style-type: none"> – Einstellung der optimalen Arbeitshöhe nach Körpergröße – Einstellung optimale Arbeitshöhe nach Arbeitstätigkeit – Wechsel der Höheneinstellung der Arbeitsfläche nach definierter Nutzungsdauer, um Wechsel zwischen Sitzen und Stehen zu unterstützen 	<ul style="list-style-type: none"> – Beanspruchungsreduzierung durch Vermeidung ergonomisch ungünstiger Körperhaltungen – Effizienzsteigerung durch passgerechte Arbeitshöhe (bessere Greifwege, geringere Ermüdung, weniger Fehler)
<i>2) Dimension: Blick- und Greifbereich, Händigkeit</i>		
<ul style="list-style-type: none"> – Länge, Breite, Tiefe, Winkel der Arbeitsfläche – Material- und Werkzeugbereitstellung 	<ul style="list-style-type: none"> – Sich automatisch anpassende Arbeitsfläche (in Breite, Tiefe, Neigung) – Material- und Werkzeugbereitstellung im individuell optimalen Greifbereich – Anpassung der Bereitstellung an Händigkeit (Rechtshänder, Linkshänder, Beidhändigkeit, Handhaltung) – Automatische Einstellung der Montagevorrichtung, Fügestation – Handlingassistenten – Automatische Haltungskontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> – Beanspruchungsreduzierung durch Vermeidung ergonomisch ungünstiger Greifwege, Kräfte/Momente, bspw. keine Arbeit über Herzhöhe – Produktivere Arbeit durch optimierten Greifbereich, dadurch: Effizientere Abläufe, Geringere Ermüdung, Weniger Fehler
<i>3) Dimension: Beleuchtung</i>		
<ul style="list-style-type: none"> – Beleuchtungsstärke – Anzahl Lichtquellen/Spots – Lichtfarbe – Einfallswinkel – Blendung 	<ul style="list-style-type: none"> – Sich automatisch anpassende Arbeitsplatzbeleuchtung (individuelle Präferenzen bei Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe) – Anpassung der Lichtfarbe an die Tageszeit – Nutzung zusätzlicher Lichtquellen bei besonders sensiblen Arbeitsgängen 	<ul style="list-style-type: none"> – Produktivere Arbeit durch individualisierte/aufgabenspezifische Beleuchtung – Geringere Ermüdung – Weniger Fehler – Gezielte Stimulation (Aufmerksamkeit, zirkadiane Rhythmik) – Höhere Mitarbeiterzufriedenheit/Wohlbefinden
<i>4) Dimension: Belüftung und Klima</i>		
<ul style="list-style-type: none"> – Lufttemperatur – Luftfeuchtigkeit – Luftgeschwindigkeit – Wärmestrahlung – Luftaustauschrate 	<ul style="list-style-type: none"> – Individualisierbare Heizungs- und Kühlgeräte – Individualisierbare Luftbe- und -entfeuchter, Ventilatoren – Individuell einstellbare Beschattungseinrichtungen – Erhöhte Luftgeschwindigkeit/temporäre Temperaturabsenkung bei Ermüdung 	<ul style="list-style-type: none"> – Vermeidung klimabegünstigter Erkrankungen (z. B. Atemwegserkrankungen durch zu trockene Luft, Muskelverspannungen durch Zugluft, etc.) – Erhöhung des individuellen Leistungsvermögens und Wohlbefindens
<i>5) Dimension: Akustische Situation</i>		
<ul style="list-style-type: none"> – Hintergrundrauschen – Geräuschpegel am Arbeitsplatz (dB) – Schwingungen – Musik 	<ul style="list-style-type: none"> – (Noise cancelling) Kopfhörer – (Bewegliche) Lärmschutzwände – Noise Killer – Anpassung von (Hintergrund) Musik/Radio am Arbeitsplatz 	<ul style="list-style-type: none"> – Vermeidung belastender akustischer Situation – Erhöhung des individuellen Leistungsvermögens und Wohlbefindens
<i>6) Dimension: Nutzung von Informations- und Assistenzsystemen</i>		
<ul style="list-style-type: none"> – Art der angebotenen Assistenz (physisch, kognitiv, organisatorisch, kommunikativ) – Individuelle Einstellbarkeit von Fähigkeitsverstärkern (z. B. Exoskeletten) – Umfang und Häufigkeit der Nutzung von Assistenzsystemen – Design und Gestaltung (Schriftgröße, Interaktionsmodus) – Informationsumfang und -granularität – Interaktionsmedium (Ein-/Ausgabe) 	<ul style="list-style-type: none"> – Auf individuellen Nutzer anpassbare Assistenz- und Lernassistenzsysteme – Informationsbereitstellung in Abhängigkeit der individuellen Unterstützungsbedarfe (erfahrungsbasierte Informationsbereitstellung: weniger bei häufiger Nutzung; mehr nach z. B. Urlaub; Zusatzassistenz nach Fehlern) – Individualisiert angepasste Interaktionsmedien (bspw. nach Vorlieben der genutzten Sinneskanäle – optisch, akustisch, haptisch) 	<ul style="list-style-type: none"> – Durch Anpassung der Unterstützung auf Kompetenzniveau des Nutzers und zu bewältigende Arbeitsaufgabe hohes Potenzial für Lernen und Effizienzsteigerungen – Steigerung von Akzeptanz und Nutzungintensität

Tab. 1 (Fortsetzung)
Table 1 (Continued)

Einstellmöglichkeiten	Nutzung zur Individualisierbarkeit	Erwarteter Nutzen
7) Dimension: Weitere Aspekte		
– Arbeitsorganisation (bspw. Taktlänge, Vorgabezeit)	– Individualisiert anpassbare Taktlänge	– Integration von leistungsgewandelten MitarbeiterInnen in abgetaktete Systeme
– Sicherheitsempfinden, Sichtschutz	– Individuell verschiedene Vorgabezeiten und dynamische Abtaktung	– Höhere Mitarbeiterbindung und geringere Fluktuation
– Wertschätzung, Status und Geltungsbedürfnis	– Arbeitsplatzgestaltung, die auf individuelle psychologische Aspekte Rücksicht nimmt	– Erhöhung Eigeninitiative, Leistungsbereitschaft und Verantwortungsbewusstsein
– Farbe und Materialität	– Berücksichtigung individueller Präferenzen bei der Arbeitsorganisation (Disposition, Schichtplanung)	– Höhere Produktivität

unproduktives Umgreifen oder das Anlernen der anderen Hand und die „starke“ Hand wird ausgenützt.

3.3.3 Beleuchtung

Eine ausreichende und schattenfreie Beleuchtung des Montagearbeitsplatzes wird als außerordentlich wichtig eingeschätzt. Für die meisten Montageaufgaben liegt die Standardlichtintensität bei 500 lx. Bei sehr kleinen Bauteilen, komplizierten Montagevorgängen und hoher Fügegenauigkeit werden 1000 bis 1500 lx benötigt (Lotter & Wiendahl 2012), für Sondersituationen bis zu 20.000 lx und mehr. (OP-Säle, Operationsfeldbeleuchtung). Hinsichtlich der Individualisierbarkeit der Beleuchtung von Montagearbeitsplätzen bestehen prinzipiell folgende Einstellmöglichkeiten:

- Anpassung der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit individueller Präferenzen, sinnvollerweise in Kopplung mit einer Default-Einstellung, die durchschnittliche Präferenzen der NutzerInnen (bspw. in Abhängigkeit des Alters) berücksichtigt
- Anpassung der Lichtfarbe in Abhängigkeit der Tageszeit (bspw. höhere Rotanteile/weniger Blauanteile während der Nachtschicht, Anpassung der Lichtfarbe an den zirkadianischen Rhythmus des Menschen bzw. des natürlichen Lichts)
- Anpassung der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Tätigkeit (bspw. geringere Beleuchtungsstärke für einfache Sehaufgaben [100 lx] und höhere Beleuchtungsstärke für schwierige Sehaufgaben [1000 lx])
- Zusatzbeleuchtung bei sensiblen Tätigkeiten zur Steigerung der Aufmerksamkeit
- Individuelle Lichtprofile (Lichtaura) zur arbeitsplatzübergreifenden Nutzung; individualisiertes Lichtprofil wird zum aktuellen Arbeitsplatz mitgenommen

Bei der Gestaltung individualisierbarer Beleuchtungssituationen und der späteren Evaluierung sind zu berücksichtigen, dass mögliche Ermüdungseffekte durch Adaptionsprozesse des Sehapparats auftreten können.

3.3.4 Belüftung und Klima

Belüftung und Klima sind arbeitswissenschaftlich gut untersuchte Faktoren (Wenzel 1993; Bullinger 1994; Schmauder & Spanner-Ulmer 2014). Das Empfinden, welche klimatischen Bedingungen der Mensch als angenehm empfindet, ist individuell sehr unterschiedlich (Fanger 1972). Die Belüftungs- und Klimaparameter Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, Luftaustauschrate und Wärmestrahlung haben subjektive Bedürfnissteuerung und Potenzial für eine Individualisierung von Montagearbeitsplätzen. Oft wird eine individualisierte Belüftungs- und Klimasteuerung als Komfortfaktor eingestuft und daher unterbewertet. Dabei sind Belüftung und Klima nicht nur unter Komfortaspekten zu betrachten, sondern anormale Klimabedingungen haben aus arbeitswissenschaftlicher Sicht durchaus ernstzunehmende Auswirkungen wie die Minderung des Denkvermögens, der Aufmerksamkeit und des Reaktionsvermögens sowie der Arbeitsfreude. Hinzu kommen betriebliche Auswirkungen wie die Minderung der Leistung, höherer Erholungszuschläge sowie höhere Fehlzeiten und Unfälle (Schlick et al. 2018).

3.3.5 Akustische Situation

Dauerhafte Lärmeinwirkung am Arbeitsplatz führt zu Schwerhörigkeit und zählt zu den häufigsten Berufskrankheiten. Die Schalleinwirkung auf eine Arbeitsumgebung kann in Form von Lärm, Musik oder akustischen Rückmeldungen (Signale, Gespräche, etc.) erfolgen. Das akustische Wohlbefinden der MitarbeiterInnen am Arbeitsplatz hängt nicht ausschließlich nur von der Höhe des Schallpegels ab, sondern auch von der Entfernung zur Schallquelle und der raumakustischen Situation. Maßnahmen zur Schallminderung sollten stets angestrebt und umgesetzt werden (Bullinger 1994). Eine individualisierbare Anpassung entsprechend den akustischen Bedürfnissen erscheint sehr wichtig. Dadurch werden belastende akustische Einflüsse spezifisch reduziert und das individuelle und persönliche Leistungsvermögen gesteigert. Akustische Merkmale, welche individuell angepasst werden können und somit für

das Wohlbefinden und für die Leistungsbereitschaft einen Mehrwert erzeugen, sind:

- Einstellung bzw. Reduzierung des Hintergrundrauschens
- Geräusch-/Schallpegeleinstellung am Arbeitsplatz (dB) oder in direkter Umgebung
- Individuelle Dämpfung der erzeugten Schwingungen
- Individuelle Einstellung von Musik am Arbeitsplatz (Genre, Lautstärke, Dauer)
- Individuelle Anpassung von Schallabsorbern

3.3.6 Nutzung von Informations- und Assistenzsystemen

Neue Entwicklungen der Informationstechnologie und des „Internet of Things“ erlauben heute eine Vielzahl von Informations- und Assistenzsystemen in der Montage. Eines der Hauptprobleme für den Nutzer derartiger Systeme ist ein zu breites und unspezifisches Angebot von Information und Assistenz, welches zu wenig auf die konkreten Aufgaben und die individuellen Bedürfnisse eingeht. Weiters greifen Informations- und Assistenzsysteme in den individuellen Arbeitsablauf ein und zwingen die MitarbeiterInnen, ihre Arbeitsschritte auf die verwendeten Systeme anzupassen, was zu verringerter Akzeptanz und Effizienz der Verwendung führt (Kuhlmann et al. 2018).

Durch die Individualisierung der Unterstützung, abgestimmt auf zu bewältigende Arbeitsaufgabe und persönlichen Bedürfnisse der MitarbeiterInnen, lassen sich Akzeptanz und Nutzungsintensität und somit auch die Effizienz der Verwendung der Systeme beträchtlich steigern. Kriterien, die eine Individualisierung erlauben, sind:

- Art der Unterstützung (physisch, kognitiv, organisatorisch, kommunikativ)
- Umfang der Unterstützung (in Teilbereichen bis vollständig)
- Frequenz der Unterstützung (fakultativ bis dauernd)
- Medium (Papier, Bildschirm, Brille, Projektion, etc.)
- Design und Gestaltung, Softwareergonomie
- Informationsumfang und -granularität
- Interaktion (Ein-/Ausgabe)
- Statische oder dynamische (auf die momentane Arbeitsaufgabe oder Erfordernis angepasste) Informationsbereitstellung/Assistenz
- Kompetenzniveaus der Nutzer

Dem Wunsch nach individueller Unterstützung stehen Aufwände für die Individualisierung der Informations- und Assistenzsysteme gegenüber. Ein Ansatz, Aufwände in einen vertretbaren Rahmen zu halten, ist die automatische Generierung individualisierter Inhalte aus bereits digital vorhandenen Informationen (CAD-Daten, MES/Warenwirtschaftssystemen, Arbeitsplänen, Stücklisten, etc.) (Gerlach 2010). Neben Akzeptanz- und Effizienz-

gewinnen birgt die Anpassung der Unterstützung auf das individuelle Kompetenzniveau der Nutzer mittel- und langfristig Potenzial für persönliches Lernen und Erhöhung des allgemeinen Systemverständnisses (Ansari et al. 2018).

3.3.7 Weitere Aspekte

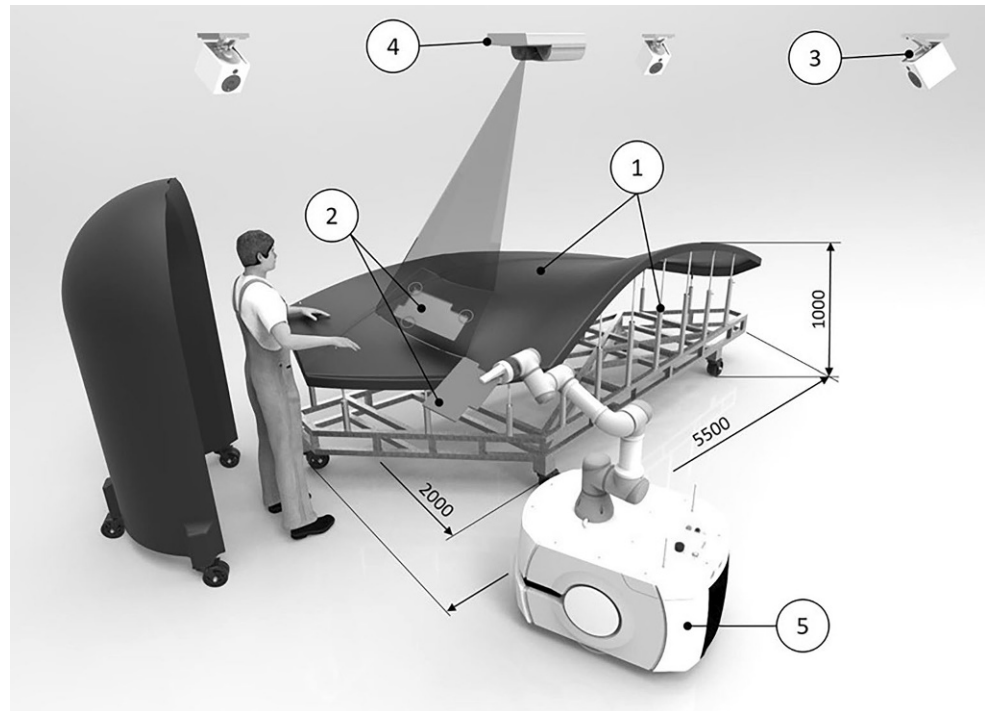
Arbeitsorganisatorische Maßnahmen, wie eine individualisierbare Personaleinsatzplanung, erlaubt die Berücksichtigung persönlicher Präferenzen von Arbeitszeit und Arbeitsort. Digital unterstützte Assistenzsysteme ermöglichen bereits heute eine hohe, selbstorganisierte Personalflexibilität (Bauer et al. 2014). Assistenzsysteme bieten auch Potenzial, unterschiedliche Leistungsgrade der MitarbeiterInnen im Sinne einer arbeitswissenschaftlich optimalen Austaktung von verketteten Systemen (bspw. Fließlinien) durchzuführen. Zudem nehmen psychologische Aspekte am Arbeitsplatz eine zunehmend wichtige Rolle ein. Laut Gallup Engagement Index gaben im Jahr 2016 15 % der befragten deutschen Belegschaft an, eine hohe emotionale Bindung zu ihrem Unternehmen zu besitzen, während 70 % eine niedrige Bindung konstatierten. Arbeitnehmer, die eine niedrige Bindung zum Arbeitgeber haben, zeigen weniger Eigeninitiative, Leistungsbereitschaft und Verantwortungsbewusstsein (Gallup 2016). Durch die individuelle Gestaltung psychologischer, organisatorischer und persönlicher Aspekte wird die emotionale Bindung zum Unternehmen erhöht, was meist Arbeitszufriedenheit und damit verbunden die Produktivität steigert und die Personalfuktuation senkt.

4 Anwendung der Individualisierungsdimensionen für einen Pilotarbeitsplatz in der Baustellenmontage

Einsatzmöglichkeiten für die Individualisierungsdimensionen werden anhand eines Pilotarbeitsplatzes für die variantenreiche Einzel- und Kleinserienmontage untersucht und konzipiert. Im konkreten Beispiel wird ein Produkt nach dem Prinzip einer Baustellenmontage stationär montiert. Konkret wird ein Werkzeug für die Herstellung von Flugzeugkomponenten, mit der Abmessung 5500 × 2000 × 1000 mm und einem Gewicht von ca. 800 kg, dargestellt (1). Im Montageprozess werden Materialkomponenten in Form von mehreren Lagen von CFK-Matten (2) auf das Werkzeug aufgelegt und fixiert. Die Arbeitspläne stehen zentral an einem Terminal-PC zur Verfügung. Das Werkzeug ist momentan fix platziert und kann nicht in Höhe und Winkel verändert werden. Die heutigen Herausforderungen bestehen darin, dass die MitarbeiterInnen für die Montage teils gebeugte Haltungen einnehmen, fallweise auf das Werkzeug steigen und mitunter auf diesem

Abb. 2 Anwendung der Individualisierungsdimensionen für einen Pilotarbeitsplatz

Fig. 2 Application of the dimensions of individualization for a pilot work station



liegen müssen. Zudem ist es nötig einzelne Arbeitsschritte an einem stationären Terminal-PC zu quittieren. Material und zusätzliche Spezialwerkzeuge werden zentral gelagert, was lange Weg- und Suchzeiten entstehen lässt. Ein Konzept für die Optimierung des Prozesses bei gleichzeitiger Umsetzung ausgewählter Individualisierungsdimensionen ist in Abb. 2 exemplarisch dargestellt.

Das Werkzeug wird auf Rollen und höhenverstellbaren Hydraulikzylindern (1) gelagert, welche eine individuelle Einstellung des Bauteils in Höhe und Aufstellwinkel gestatten. Dies ermöglicht die Reduktion unergonomischer Positionen und Bewegungen und hilft schwer zugängliche Stellen besser zu erreichen. Dazu kann die individuell gewünschte Arbeitshöhe und der Arbeitsflächenwinkel frei über die Steuerung der Zylinder eingestellt werden. Über dem Bauteil sind drei 3D-Kameras (3) angebracht, die Translationen, Höhendifferenzen sowie optische Merkmale erfassen. Die Informationen werden softwaretechnisch analysiert und an Assistenzsysteme zur weiteren Steuerung der Individualisierung weitergegeben. Es ist vorgesehen, die Höhendaten dazu zu verwenden, um die Ausrichtung des Bauteils in Bezug auf individuelle Merkmale der Mitarbeiter vorzunehmen. Um benötigte Informationen direkt am Verbauort anzuzeigen, wurde ein Projektor (4) über dem Werkzeug platziert, welcher direkt auf das Werkzeug projiziert. Der Projektor ist mit den 3D-Kameras gekoppelt, um die Informationen mitarbeiternah und auf dessen Blickbereich abgestimmt anzuzeigen. In der Abbildung wird die Kontur einer CFK-Matte inklusive kritischer Merkmale (2)

dargestellt. Um das Problem der weit entfernten Lagerung von Materialien und Anbauteilen zu lösen, ist ein „Fahrerloses Transportsystem“ (FTS) mit aufgebautem Roboterarm (5) geplant, um Bauteilkomponenten ergonomisch anzureichen und persönliche Präferenzen, wie Händigkeit, Greiforte, etc. zu berücksichtigen. Durch die automatische Anreicherung werden sowohl unnötige Wegzeiten als auch Fehler durch Aufnahme und Verbau falscher Komponenten vermieden. Weiters bietet die Rückkopplung über die 3D-Kameras das Potenzial zur automatischen Fortschrittsüberwachung und Qualitätskontrolle.

5 Fazit und Ausblick

Mit einer gesammelten Darstellung einzelner Individualisierungsdimensionen eines Montagearbeitsplatzes führt der Beitrag bestehende Teilaspekte der Gestaltung individualisierbarer Arbeitsplätze zusammen. Er bietet dadurch eine Grundlage für die umfassende Gestaltung von Montagearbeitsplätzen, die sich an individuelle physische und psychische Merkmale und Bedürfnisse ihrer NutzerInnen anpassen. Die präsentierte Synopsis einsetzbarer Individualisierungsdimensionen stellt einen Optionen katalog für die Gestaltung individualisierbarer Arbeitsplätze dar und wird anhand eines Pilotarbeitsplatzes für die Baustellenmontage variantenreicher Einzel- und Kleinserien in der Umsetzung konzeptionell dargestellt. In weiteren Arbeiten werden die Umsetzungspotenziale durch Möglichkeiten

physischer Assistenz und digitaler Vernetzung experimentell erprobt und Auswirkungen auf zentrale Zielgrößen arbeitswissenschaftlicher Gestaltung (Produktivität, Ergonomie, Nutzerakzeptanz) sowie die Einbettung individualisierbarer Arbeitsplatzgestaltung in Arbeitsorganisation und Konzepte des arbeitsplatznahen Lernens untersucht.

Die durch ein Assistenzsystem gesteuerte individualisierte Einstellbarkeit des Montagearbeitsplatzes ermöglicht ein doppeltes Nutzenpotenzial für die praktische Anwendung. Der Hauptvorteil liegt in einer automatischen Einstellung der Arbeitsplatzdimensionen und untergeordneter Parameter auf die individuellen Merkmale jeder einzelnen MitarbeiterIn. Durch die individuell angepasste Einstellung der Dimensionen Arbeitshöhe, Greifbereich und die Greifwege lassen sich sowohl Gesamtmontagezeit als auch die ergonomische Belastung der MitarbeiterInnen verringern. Eine Individualisierung der Dimension Informationsbereitstellung stellt zudem die Verringerung der kognitiven Rüstzeitanteile sowie eine Reduzierung der Fehlerrate in Aussicht. Indirekt ermöglicht die individualisierbare Arbeitsplatzgestaltung eine direkte Anpassung an persönliche Präferenzen, passt somit den Arbeitsplatz an jeden Einzelnen an und hat somit einen positiven (Teil-)Einfluss auf Gesundheit, Motivation und Wohlbefinden.

Aktuelle Schwierigkeiten der Umsetzung betreffen vor allem fehlende Aussagen und Erfahrungen zu den tatsächlichen Effekten individualisierbarer Arbeitsplatzgestaltung, insbesondere zu deren wirtschaftlicher Umsetzung und Nutzung. Die Risiken liegen hierbei vielfach nicht auf der heute verfügbaren Hardware in den Bereichen der Sensorik, Bildverarbeitung und Aktorik, sondern vor allem in der teuren Integration und fehlenden Interoperabilität der Hard- und Software (Rodriguez et al., 2015). Der daraus resultierende weitere Forschungsbedarf betrifft vor allem die Berücksichtigung von Individualisierung bei der Schaffung übergreifender Standards, Basismodellen und Plattformen zur Gestaltung von Werkerassistenzsystemen sowie den Aufbau bewerteter und skalierbarer Umsetzungslösungen für die dominierenden Arbeitsplätze und Arbeitstätigkeiten.

Weiters basiert die individualisierbare Einstellbarkeit von Arbeitsplätzen auf der Nutzung personenbezogener Daten der MitarbeiterInnen (Strang et al. 2016). Dies stellt heute eine Umsetzungsschwierigkeit und eine mögliche Akzeptanzbarriere dar. Mit zunehmender Integration von digitalen Assistenzsystemen in unseren Alltag, der Orientierung an allgemein akzeptierten Mitarbeiterdatenschutzmodellen (bspw. APPSist 2016) und der Einbindung der MitarbeiterInnen besteht jedoch die Chance auf eine beteiligungsorientierte Einführung. Diese bedingt jedoch die Schaffung neuer Vertrauensgrenzen für die betriebliche Nutzung personenbezogener Daten sowie die Übersetzung in allgemeingültig anwendbare Gestaltungsregeln.

Obwohl in den letzten Jahren in Bezug auf die ergonomische Gestaltung der Produktionsarbeitsplätze viel geleistet wurde, sind in Bezug auf mitarbeiterspezifische Anpassungsmöglichkeiten hohe Verbesserungspotenziale festzustellen. Die verstärkte Berücksichtigung des Faktors „Individualisierbarkeit“ in der Arbeitsplatzgestaltung stellt einen nötigen und wertvollen Schritt zur Humanisierung und Attraktivierung von Produktionsarbeit dar und bedarf einer intensiven wissenschaftlichen Aufarbeitung und industriellen Umsetzung.

Funding Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) 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.

Literatur

- acatech (2012) Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften / Plattform Industrie 4.0, Frankfurt am Main
- Ansari F, Hold P, Mayrhofer W, Schlund S (2018) Autodidact: introducing the concept of mutual learning into a smart factory industry 4.0. CELDA, Budapest
- APPSist (2016) APPSist-Einführungsleitfaden. Mitarbeiterdatenschutzmodell Effiziente Fabrik 4.0. TU Darmstadt, Darmstadt, S 137
- Bauer W, Ganschar O, Gerlach S, Hämmerle M, Krause T, Schlund S (2014) Industrie 4.0 – flexiblere und reaktionsfähigere Produktionsarbeit – Ergebnisse der Industrie-4.0-Leitstudie des Fraunhofer IAO. *Werkstatttech Online* 104(3):134–138
- Bauer W, Pross A, Stefani O, Brosenmaier S, Bues D (2015) Light-Work: Benutzerakzeptanz und Energieeffizienz von LED-Beleuchtung am Wissensarbeitsplatz. Studie Fraunhofer IAO Light-FusionLab, Stuttgart
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016) Forschungsagenda Industrie 4.0 – Aktualisierung des Forschungsbedarfs: Ergebnispapier. BMWi, Berlin
- Bormann J, Kurzweg A, Heinrich K (2016) Tragbare Assistenzsysteme in der Automobilmontage. In: Weidner R (Hrsg) Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg
- Brandl C, Hellig T, Mertens A, Schlick CM (2016) Approaches for the efficient use of range sensors-based ergonomic assessment results in the ergonomic intervention process of awkward working postures. *Advances in ergonomics of manufacturing: managing the enterprise of the future. AHFE 2016 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing*, 27.–31. July, S 445–453
- Bullinger H-J (1994) Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. Springer, Wiesbaden
- Bullinger-Hoffmann AC, Mühlstedt J (2016) Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Springer, Berlin Heidelberg
- Chapman LJ, Chapman JP (1987) The measurement of handedness. *Brain Cogn* 6(2):175–183

- Deuse J, Grötsch A, Stankiewicz L, Wischniewski S (2015) A customizable digital human model for assembly system design. In: Schlick C, Trzcielinski S (Hrsg) *Advances in ergonomics of manufacturing: managing the enterprise of the future*. Springer, Heidelberg, Berlin, New York, S 167–178
- Fanger P (1972) *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press, Kopenhagen
- Galaske N, Anderl R (2016) Approach for the development of an adaptive worker assistance system based on an individualized profile data model. *Advances in ergonomics of manufacturing: managing the enterprise of the future*. AHFE 2016 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing, 27.–31. July, S 543–556
- Gallup Incorporated (2016) *Engagement Index Deutschland*. <http://www.gallup.de/183104/engagement-index-deutschland.aspx>. Zugegriffen: 14. Mai 2018
- Gerlach S (2010) *Aufbau von produktionsnahen Teaminformationsportalen bei kundenindividueller Produktion mittels Entwurfsmustersprachen*. Universität Stuttgart, Stuttgart
- Goldhahn L, Müller-Eppendorfer K (2017) Integrierte Nutzung von Virtual Reality für die Materialbereitstellungsplanung. *Z Arbeitswiss* 71(4):233–241
- Heng S (2014) *Industrie 4.0 – Upgrade des Industriestandorts Deutschland steht bevor*. Deutsche Bank Research, Frankfurt
- Jürgens HW, Aune IA, Pieper U (1989) *Internationaler anthropometrischer Datenatlas*. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhafen
- Kuhlmann M, Splitt B, Wiegrefe S (2018) *Montagearbeit 4.0. Eine Fallstudie zu Arbeitswirkungen und Gestaltungsperspektiven digitaler Werkerführung*. *WSI Mitt* 71(3):182–188
- Latos B, Holtkötter C, Brinkjans J, Kalantar P, Przybysz PM, Mütze-Niewöhner S (2018) Partizipatives und simulationsgestütztes Vorgehen zur Konzeption einer flexiblen und demografierobusten Montagelinie. *Z Arbeitswiss* 72(1):90–98
- Lotter B, Wiendahl H-P (2012) *Montage in der industriellen Produktion*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
- Luczak H, Volpert W, Raeithel A, Schwier W (1989) *Arbeitswissenschaft, Kerndefinition – Gegenstandskatalog – Forschungsgebiete*, 3. Aufl. RKW-Verlag, TÜV Rheinland, Eschborn, Köln (Unter Mitarbeit von Müller, T., & Rötting, M.)
- Matt DT, Rauch E, Fraccaroli D (2016) Smart Factory für den Mittelstand. *ZWF Z Wirtsch Fabrikbetr* 111(1–2):52–55
- Müller R, Vette M, Mailahn O (2016) Process-oriented task assignment for assembly processes with human-robot interaction. *Procedia CIRP* 44:210–215
- Nguyen T, Krüger J, Bloch C (2016) The working posture controller: automated adaptation of the work piece pose to enable a natural working posture. *Procedia CIRP* 44:14–19
- Oppermann R (Hrsg) (1994) *Adaptive user support: ergonomic design of manually and automatically adaptable software*. CRC Press, Boca Raton
- Reinhart G, Spillner R, Egbers J, Schilp J (2010) Individualisierung an Montagearbeitsplätzen, Konzeption und Auslegung flexibel individualisierbarer Arbeitsplätze in der Montage. *Werkstatttech Online* 100(9):665–669
- Reinhart G, Bengler K, Dollinger Ch, Intra C, Lock C, Popova-Dlogosch S, Rimpau C, Schmidler J, Teubner S, Vernim S (2017) *Der Mensch in der Produktion von Morgen*. In: Reinhart G (Hrsg.) *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Hanser, München
- Rodriguez L, Quint F, Gorecky D, Romero D, Siller HR (2015) Developing a mixed reality assistance system based on projection mapping technology for manual operations at assembly workstations. *Procedia Comput Sci* 75:327–333
- Sattler JB, Klußmann A (2014) *Leitlinie Händigkeit – Bedeutung und Untersuchung*. AWMF online, Das Portal der wissenschaftlichen Medizin. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin, München
- Schembera-Kneifel T, Keil M (2016) *Future ergonomics tools – from the prototype to the serial product by comprehensive product optimization*. 16. Internationales Stuttgarter Symposium. Springer, Wiesbaden
- Schlick C, Bruder R, Luczak H (2018) *Arbeitswissenschaft*. Springer, Heidelberg
- Schmauder M (1996) *Händigkeitsgerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Schmauder M, Spanner-Ulmer B (2014) *Ergonomie: Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. REFA-Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung. Hanser, München
- Spath D (Hrsg) (2013) *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart
- Spath D, Schlund S, Gerlach S, Hämmerle M, Krause T (2012) Produktionsprozesse im Jahr 2030. *Inf Manag Consult* 27(3):50–55
- Spath D, Pokorni B, Ganschar O, Schlund S (2014) *Intelligenter Störungsassistent im Serienanlauf als Industrie 4.0-Anwendungsfall*. In: Kersten W (Hrsg) *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Schriftenreihe Hochschulgruppe Arbeits- und Betriebsorganisation. GITO, Berlin
- Strang D, Galaske N, Anderl R (2016) Dynamic, adaptive worker allocation for the integration of human factors in cyber-physical production systems. In: *Advances in ergonomics of manufacturing: managing the enterprise of the future*. Springer, Cham, S 517–529
- Thomas C, Stankiewicz L, Grötsch A, Wischniewski S, Deuse J, Kuhlentkötter B (2016) Intuitive work assistance by reciprocal human-robot interaction in the subject area of direct human-robot collaboration. *Procedia CIRP* 44:275–280
- Wenzel HG (1993) *Klima*. In: Schmidtke H (Hrsg) *Ergonomie*, 3. Aufl. Hanser, München, Wien, S 274–286
- Wulfsberg J (2017) *Technische Autonomie und Autonomie des Menschen ... gemeinsam stark*. 28. Deutscher Montagekongress, München (Vortrag)