

Individuelle Arbeitsplatzgestaltung für Mensch-Roboter-Kollaborationen unter Verwendung digitaler Menschmodelle – Identifikation relevanter altersabhängiger muskuloskelettaler Beschwerden und Einschränkungen

Alexander GRÖTSCH, Sascha WISCHNIEWSKI

Gruppe „Human Factors, Ergonomie“, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Friedrich-Henkel-Weg 1-25, D-44149 Dortmund

Kurzfassung: Die individuelle Gestaltung von Arbeitsplätzen stellt eine Voraussetzung für ihre menschenorientierte, ergonomische und gesundheitsgerechte Planung in der industriellen Produktion dar. Insbesondere der Einsatz von Arbeitsplatzassistenzen ist unter Berücksichtigung flexibler und adaptiver Gesichtspunkte zu betrachten. Verstärkt wird diese Notwendigkeit durch den demographischen Wandel der Arbeitswelt und einer intra- und interindividuellen Leistungsstreuung. In diesem Beitrag werden auf der Grundlage einer Literaturrecherche sowie der anwendungsbezogenen Auswertung einer für Deutschland repräsentativen Stichprobe der Erwerbsbevölkerung relevante altersabhängige muskuloskelettale Beschwerden und Einschränkungen identifiziert. Diese bilden die Grundlage einer individuellen digital gestützten Arbeitsplatzplanung für Mensch-Roboter-Kollaborationen.

Schlüsselwörter: Anthropometrie und Biomechanik, digitale Ergonomie, demographischer Wandel, adaptive Arbeitsplatzassistentz, Individualisierung digitaler Menschmodelle, Mensch-Roboter-Kollaboration

1. Einleitung

Die Auswirkungen des demographischen Wandels verstärken die Notwendigkeit, sich bei der Planung von Arbeitsplätzen und Produktionssystemen am Menschen zu orientieren. Betrachtet man die Kosten der Arbeitsunfähigkeit in Bezug auf die Diagnosegruppen, fallen 12,4 Mrd. Euro von insgesamt 53,0 Mrd. Euro bzgl. des Produktionsausfalls auf Muskel-Skelett-Erkrankungen (BAuA 2014). Angesichts der zunehmenden Zahl leistungsgewandelter Mitarbeiter (Schrader et al. 1995), ist die Förderung gesunder, sicherer und wettbewerbsfähiger Arbeit ein wichtiger Baustein für die Planung und Gestaltung industrieller Produktion. Die digitale Menschmodellierung dient in diesem Zusammenhang zur Produktionsgestaltung, Prozess- und Arbeitsplanung sowie Arbeitsplatzgestaltung in frühen Phasen des Gestaltungszyklus (Busch et al. 2013). Um die Abschätzung gesundheitlicher Belastungen eines Arbeitsplatzsystems individuell abschätzen zu können, müssen personenbezogene Daten hinsichtlich der Körpermaße, Haltung und Bewegungsmöglichkeiten berücksichtigt werden. Die verstärkte Notwendigkeit, sich der Einbindung individueller Parameter zu widmen, besteht in der mit dem Alter einhergehenden Veränderung physischer Leistungsparameter und der dies bezogenen Intra- und Interindividualität. Jene lässt sich sowohl auf die Reduzierung der Leistungsfähigkeit als auch auf die Veränderung der Adaptationsfähigkeit in Bezug auf die altersbedingten Veränderungen der motorischen

Hauptbeanspruchungsformen zurückführen (Hollmann & Strüder 2009). Zur Berücksichtigung der intra- und interindividuellen Leistungsfähigkeit können unter Verwendung von digitalen Menschmodellen individuelle anthropometrische und biomechanische Parameter bereits frühzeitig in den Planungsprozess mit einfließen, wobei die Einhaltung des Datenschutzes stets gewahrt werden muss (Thüsing 2014). Die direkte Einbindung dieser Informationen, insbesondere die Berücksichtigung von Mitarbeiter spezifischen Bewegungseinschränkungen ermöglicht den Aufbau eines flexiblen, hybriden Arbeitssystem mit selektivem Automatisierungsgrad und die fähigkeitsorientierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine.

2. Das Projekt „INDIVA“ zur Individualisierung der Arbeitsplatzgestaltung

INDIVA ist die Kurzform des Projektes „Individualisierte sozio-technische“ Arbeitsplatzassistenz für die Produktion“, welches die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) im Rahmen eines vom BMBF geförderten Drittmittelprojektes in Kooperation mit dem Institut für Produktionssysteme der Technischen Universität Dortmund sowie industriellen Systemanbietern und Anwendern durchführt. Eine der Hauptmotivation des Projekts ist der Aspekt des zunehmenden Durchschnittsalters des Erwerbstätigenpotentials und die große Leistungsstreuung. Statistiken des Statistischen Bundesamtes zeigen, dass bis 2060 ein erheblicher Teil der Beschäftigten älter als 50 Jahre sein wird (DeStatis 2013). Ein weiterer motivierender Faktor ist der hohe Anteil der Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems hinsichtlich des Produktionsausfalls in Deutschland, wobei diese mit 23,4% den größten Teil ausmachen (BAuA 2014). Im Projektkontext werden die in Kapitel 1 diskutierten Gesichtspunkte forschungs- und anwendungsbezogen adressiert. Wesentlicher Beitrag der Gruppe „Human Factors, Ergonomie“ der BAuA ist die Entwicklung eines rechnergestützten Verfahrens zur aufwandsarmen Erhebung und Verarbeitung anthropometrischer (Körpergröße, Körpersegmentlängen) und biomechanischer (Bewegungsumfänge/-einschränken der Gelenke („range of motion“)) Parameter. Diese stellen die Grundlage für die Planung und Umsetzung einer individualisierten fähigkeitsorientierten Arbeitsaufteilung zwischen Mensch und Maschine dar.

3. Identifikation des Handlungsbedarfs und relevanter physischer Parameter

3.1 Literaturrecherche

In der Analysephase des Projektes wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um den projektbezogenen Handlungsbedarf auf Basis entsprechender wissenschaftlicher Veröffentlichungen zu belegen. So ist eine altersabhängige Abnahme der Arbeitsfähigkeit und Arbeitsbewältigung belegt (Schmidtke 1993, Rademacher 2010, Egbers 2013). Ein weiterer projektbezogen relevanter Gesichtspunkt ist die Erkenntnis, dass nicht das Alter per se von entscheidender Bedeutung ist, sondern die Differenz zwischen der Arbeitsanforderung und der physischen Leistungsfähigkeit (Okunribido et al. 2009). Dies stellt heraus, dass eine individuelle Betrachtung der jeweiligen Personen unabdingbar ist.

Zahlreiche wissenschaftliche Studien belegen zudem einen Zusammenhang zwischen dem Alter und dem Bewegungsausmaß der menschlichen Gelenke.

Methodisch wurde nach Artikeln gesucht, die sich mit der altersbedingten Veränderung physischer Parameter, insbesondere der Einschränkungen des Bewegungsumfanges der Gelenke befassten. Hierdurch konnte die Reduktion des Bewegungsausmaßes in vier verschiedenen Bereichen identifiziert werden, die oberen und unteren Extremitäten, die Hüfte und die Wirbelsäule (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Studien zur altersabhängigen Reduktion des Bewegungsausmaßes der Gelenke

Muskuloskelettaler Bereich	Studien
obere Extremitäten	Allander et al. 1974, Stubbs et al. 1993, Chaffin et al. 2000, Barnes et al. 2001, Soucie et al. 2011
Wirbelsäule	Loebl 1967, Moll & Wright 1971, Youdas et al. 1992, Chen et al. 1999, Ferguson & Steffen 2003, Doriot & Wang 2006, Intolo et al. 2009, Chateauroux et al. 2011, Song & Qu 2014
Hüfte	Allander et al. 1974, Svenningssen et al. 1989, Roach & Miles 1991, Kerrigan et al. 2001, Soucie et al. 2011, Kouyoumdjian et al. 2012
untere Extremitäten	Roach & Miles 1991, Stubbs et al. 1993, Soucie et al. 2011, Song und Qu 2014

Neben der Betrachtung der physischen Leistungsfähigkeit ist zudem der Aspekt des Erfahrungswissens für den Projektkontext von Bedeutung, der unter anderem den Erhalt des Mitarbeiters mitsamt seinem Erfahrungswissen an seinem Arbeitsplatz adressiert. Insbesondere Kumashiro (2000) stellte das darauf aufbauende Kompetenzmodell in den Vordergrund und prägte den Begriff der synergistischen Kapazität, welche die allgemeine Fähigkeit beschreibt, Tätigkeiten unter Einbeziehung eines Reichtums an Erfahrung und Wissen auszuführen. Der individuelle Charakter altersbedingter Veränderungen spiegelt sich auch in der großen Inter- und Intraindividualität der altersabhängigen Veränderung der Arbeits- und Leistungsfähigkeit wider (Ilmarinen 2001, Kenny et al. 2008, Soucie et al. 2011, Hwang et al. 2013).

3.2 BIBB/BAuA – Erwerbstätigenbefragung 2011/2012

Der skizzierte Handlungsbedarf wird im Weiteren auf Basis eines Datensatzes der für die deutsche Erwerbsbevölkerung repräsentativen Stichprobe erläutert. Die Erwerbstätigenbefragung wurde vom Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) in Kooperation mit der BAuA durchgeführt und stellt ein Instrumentarium dar, das in einem Turnus von fünf Jahren den Wandel der Arbeitswelt abzubilden versucht. Die BAuA war inhaltlich insbesondere für Fragenteile hinsichtlich der Arbeitsbelastung, Arbeitsbeanspruchung und gesundheitlicher Beschwerden verantwortlich. Die Befragung umfasste eine Stichprobenanzahl von $N \approx 20000$, wobei sich diese aus Erwerbstätigen ab 15 Jahren und einer wöchentlichen Arbeitszeit von mindestens zehn Stunden zusammensetzte. Methodisch kamen Computer unterstützte Telefoninterviews zum Einsatz (Hall et al. 2014). Das Vorliegen einer Normalverteilung der Gesamtstichprobe und der reduzierten Stichprobe (s. Kapitel 4) wurde mittels Kolmogorov – Smirnov – Test (KS) überprüft (s. Abbildung 1). Trotz asymptotischer Signifikanz von $p < 0,05$ wurden die Verteilungen hinsichtlich der Variable „Alter der Zielperson“ als normalverteilt angenommen, da bei der Durchführung des KS einer sehr großen Stichprobe die Signifikanz durch eine geringe Abweichung von der Normalität stark beeinflusst werden kann (Field 2009).

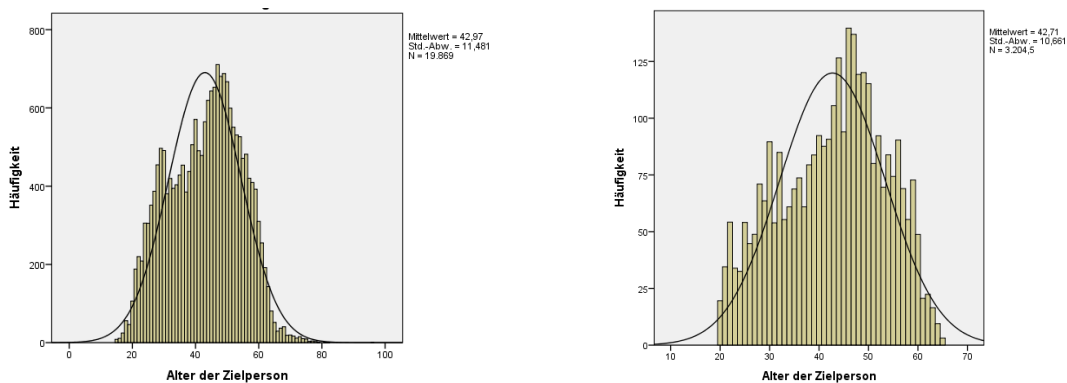


Abbildung 1: links: Altersverteilung der gesamten Anzahl an Befragten, rechts: Altersverteilung der Befragten der differenziert betrachteten Variable (basierend auf Hall et al.: BIBB/BAuA, 2012, eigene Berechnungen)

4. Ergebnisse zur BIBB/BAuA - Erwerbstätigenbefragung

Hinsichtlich des Projektkontextes wurden spezifische erhobene Variablen differenziert betrachtet. Hierzu wurde eine neue unabhängige Variable definiert, welche männliche Arbeiter und Angestellte beinhaltet, die in Vollzeit im Wirtschaftsbereich Industrie arbeiten. Beschäftigte in Teilzeit wurden nicht berücksichtigt, da ein Vergleich hinsichtlich muskuloskelettaler Belastung nicht sinnvoll wäre. Die Stichprobe wurde hinsichtlich eines altersabhängigen Vergleichs in zwei Altersgruppen aufgeteilt, in 20- bis 49- Jährige und 50- bis 65- Jährige. Es sei darauf hingewiesen, dass durch die Reduzierung auf $N \approx 3000$ eine Repräsentativität für die deutsche Erwerbsbevölkerung nicht mehr gegeben ist. Für die Auswertung wurden verschiedene abhängige Variablen aus dem Datensatz gewählt, die die Fragestellungen des Projektes widerspiegeln. Zunächst wurden muskuloskelettale Schmerzen im unteren Rücken, dem Nacken- und Schulterbereich, den Armen, der Hüfte, den Knien und den Beinen und Füßen, betrachtet und hinsichtlich der beiden definierten Altersgruppen unterschieden (s. Tabelle 2). Weitere abhängige Variablen sind die Belastung durch die Arbeit an der Grenze der Leitungsfähigkeit sowie durch das Heben und Tragen schwerer Lasten. Zudem wurden Aussagen in Bezug auf den allgemeinen Gesundheitszustand sowie das Erfahrungswissen mit berücksichtigt.

Tabelle 2: Altersabhängiger Vergleich muskuloskelettaler Schmerzen

männliche Angestellte/Arbeiter, Vollzeit, Industrie	20 – 49 Jahre	50 – 65 Jahre
Schmerzen im unteren Rücken	40 %	50 %
Schmerzen im Nacken- und Schulterbereich	34 %	43 %
Schmerzen in den Armen	17 %	26 %
Schmerzen in der Hüfte	8 %	16 %
Schmerzen in den Knien	20 %	28 %
Schmerzen in Beinen und Füßen	19 %	24 %

Tabelle 3 zeigt die prozentualen Werte für den altersabhängigen Vergleich der neu definierten unabhängigen Variable hinsichtlich dieser unabhängigen Variablen.

Tabelle 3: Altersabhängiger Vergleich relevanter unabhängiger Variablen der BIBB/BAuA - Erwerbstätigenbefragung

männliche Angestellte/Arbeiter, Vollzeit, Industrie	20 – 49 Jahre	50 – 65 Jahre
Belastung durch Arbeit an der Grenze der Leistungsfähigkeit	69 %	77 %
Belastung durch Heben und Tragen schwerer Lasten	47 %	53 %
Allgemeiner Gesundheitszustand (= weniger gut/schlecht)	9 %	21 %
Kenntnisse und Fähigkeiten aus Berufserfahrung	43 %	51 %

5. Ausblick

Nach Erhebung der individuellen Leistungsparameter über ein markerloses Bewegungserfassungssystem, werden für die Planung und Simulation der individuell angepassten Mensch-Roboter-Kollaboration die individuellen Parameter in das digitale Menschmodell übertragen. Zudem sollen individuelle Programmablaufdaten für die optimale und bedarfsgerechte Unterstützung des Menschen durch das Arbeitsassistenzsystem bereitgestellt werden. Der beschriebene viergliedrige Ablaufplan soll im Rahmen eines Demonstrators für real existierende und mit den beteiligten Industrieunternehmen identifizierte Referenzarbeitssysteme/-plätze durchgeführt werden (s. Kongressbeitrag C.4.4). Das vorgestellte Projekt verfolgt somit den Ansatz einer verstärkten Einbindung individueller Leistungsstreuung von Arbeitnehmern (Buckle & Devereux 2002, Colombini & Occhipiti 2006) in die (digitale) Arbeitsplatzgestaltung und leistet somit einen wichtigen Beitrag für sichere, wettbewerbsfähige und insbesondere menschengerechte Arbeit.

6. Literatur

- Allander E, Björnsson OJ, Olafsson O, Sigfusson N, Thorsteinsson J (1974) Normal Range of Joint Movements in Shoulder, Hip, Wrist and Thumb with Special Reference to Side: a Comparison between Two Population. *International Journal of Epidemiology* 3:253-261.
- Barnes CJ, Van Steyn SJ, Fischer RA (2001) The effects of age, sex, and shoulder dominance on range of motion of the shoulder. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery* 10:242-246.
- Buckle PW, Devereux, JJ (2002) The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. *Applied Ergonomics* 3:207-217.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (2014): Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit 2012 – Unfallverhütungsbericht Arbeit. Dortmund.
- Busch F, Wischniewski S, Deuse J (2013) Application of a character animation SDK to design ergonomic human-robot-collaboration. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Digital Human Modeling (DHM)*. Ann Arbor, Michigan, USA, 1-7.
- Chaffin DB, Faraway JJ, Zhang X, Wooley C (2000) Stature, Age, and Gender Effects on Reach Motion Postures. *Human Factors* 42:408-420.
- Chateauroux E, Wang X, Pudlo P (2007) Age and gender effects on joint ranges of motion of the main joints involved in car accessibility movements. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 10:177-178.
- Chen J, Solinger AB, Poncet JF, Lantz CA (1999): Meta-Analysis of Normative Cervical Motion. *Spine* 24:1571-1578.
- Colombini D, Occhipinti E (2006) Preventing upper limb work-related musculoskeletal disorders (UL-WMSDs): New approaches in job (re)design and current trends in standardization. *Applied Ergonomics* 4:441-450.
- Doriot N, Wang X (2006) Effects of age and gender on maximum voluntary range of motion of the upper body joints. *Ergonomics* 49:269-281.

- Egbers J (2013) Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses. Technische Universität München: Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik, Dissertation.
- Ferguson SJ, Steffen T (2003) Biomechanics of the aging spine. *European Spine Journal* 12: 97-103.
- Field, A (2009) *Discovering Statistics Using SPSS*. London: Sage Publications Ltd.
- Hall A, Siefer A, Tiemann M (2014) BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2012 – Arbeit und Beruf im Wandel. Forschungsdatenzentrum im BIBB (Hrsg). Bonn: Bundesinstitut für Berufsbildung.
- Hollmann W, Strüder HK (2009): *Sportmedizin – Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin*. Stuttgart: Schattauer Verlag.
- Hwang J, Shin H, Jung MC (2013) Joint motion pattern classification by cluster analysis of kinematic, demographic, and subjective variables. *Applied Ergonomics* 44:636-642.
- Ilmarinen JE (2001) Aging Workers. *Occupational and Environmental Medicine* 58:546-552.
- Intolo P, Milosavljevic S, Baxter DG, Carman AB, Pal P, Munn J (2009): The effect of age on lumbar range of motion: A systematic review. *Manual Therapy* 14:596-604.
- Kenny GP, Yardley JE, Martineau L, Jay O (2008) Physical work capacity in older adults: Implications for the aging worker. *American Journal of Industrial Medicine* 51:610-625.
- Kerrigan DC, Lee LW, Collins JJ, Riley PO, Lipsitz LA (2001) Reduced hip extension during walking: Healthy elderly and fallers versus young adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 82:26-30.
- Kouyoumdjian P, Coulomb R, Sanchez T, Asencio G (2012) Clinical evaluation of hip joint rotation range of motion in adults. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 98:17-23.
- Kumashiro M (2000) Ergonomic strategies and actions for achieving productive use of an aging workforce. *Ergonomics* 43:1007-1018.
- Loebl WY (1967) Measurement of spinal posture and range of spinal movement. *Annals of Physical Medicine* 9:103-110.
- Moll JM, Wright V (1971) Normal range of spinal mobility. An objective clinical study. *Annals of the Rheumatic Diseases* 30:381-386.
- Okunribido OO, Wynn T, Lewis D (2011) Are older workers at greater risk of musculoskeletal disorders in the workplace than young workers? – A literature review. *Occupational Ergonomics* 10:53-68.
- Rademacher H, Sinn-Behrendt A, Bruder R, Landau K (2010) Tätigkeitsbezogene Analyse körperlicher Fähigkeiten von jüngeren und älteren Beschäftigten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 64:187-203.
- Roach KE, Miles TP (1991) Normal Hip and Knee Active Range of Motion: The Relationship to Age. *Physical Therapy* 71:656-665.
- Song J, Qu X (2014) Effects of age and its interaction with task parameters on lifting parameters. *Ergonomics* 57:653-668.
- Soucie JM, Wang C, Forsyth A, Funk S, Denny M, Roach KE, Boone D, The Hemophilia Treatment Center Network (2010) Range of motion measurements: reference values and a database for comparison studies. *Haemophilia* 17:500-507.
- Schmidke H (Hrsg) (1993) *Ergonomie*. München Wien: Carl Hanser Verlag.
- Schrader K, Meyer-Falcke A, Munker H (1995) Einsatz leistungsgewandelter Mitarbeiter. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin Berlin, Sonderschrift 10.
- Statistisches Bundesamt (DeStatis) und Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (Hrsg) (2013) *Datenreport 2013 – Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. Bonn.
- Stubbs NB, Fernandez JE, Glenn WM (1993) Normative data on joint ranges of motion of 25- to 54-year-old males. *International Journal of Industrial Ergonomics* 12:265-272.
- Svenningsen S, Terjesen T, Auflem M, Berg V (1989) Hip motion related to age and sex. *Acta Orthopaedica Scandinavica* 60:97-100.
- Thüsing G (2014) *Ergonomie im Spannungsfeld von Arbeits-, Daten- und Diskriminierungsschutz*. Dortmund Berlin Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Youdas JW, Garrett TR, Suman VJ, Bogard CL, Hallman HO, Carey JR (1992) Normal Range of Motion of the Cervical Spine: An Initial Goniometric Study. *Physical Therapy* 72:770-780.

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.