

Modellierung und altersgerechte ergonomische Gestaltung von manuellen Arbeitsprozessen

Digitale altersgerechte Arbeitsgestaltung

M. Tröster, B. Hu, M. Spitzhirn, V. Kopp, U. Daub, U. Schneider, T. Bauernhansl

ZUSAMMENFASSUNG Ungünstig gestaltete Arbeitsplätze und -prozesse können das Risiko für Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) erhöhen und insbesondere die Einsatzfähigkeit älterer Beschäftigter einschränken. Anhand eines Arbeitsplatzes in der Kosmetikindustrie wird gezeigt, wie mittels ema Work Designer Arbeitsprozesse unter Einsatz von digitalen Menschmodellen simuliert und optimiert werden. Dadurch konnten ergonomische und wirtschaftliche Probleme identifiziert und gezielte Maßnahmen ableitet werden, die jungen als auch älteren Mitarbeitenden eine gesundheitsgerechte und effiziente Arbeit ermöglichen.

STICHWÖRTER

Digitalisierung, Mensch und Technik,
CAE (Computer-Aided Engineering)

Digital work design - Ergonomic and age-appropriate design of manual work processes

ABSTRACT Unfavourably designed workplaces and processes may increase the risk of musculoskeletal disorders (MSDs) and limit the ability to work, especially of older workers. A workplace in the cosmetics industry demonstrates how the ema Work Designer can be used to simulate and optimize work processes using digital human models. It allows for identifying ergonomic and economic problems and deriving targeted measures, enabling both young and older employees to work more efficiently and healthily.

1 Einleitung

Trotz fortschreitender Automatisierung sind in vielen Produktionsbereichen weiterhin zahlreiche manuelle Tätigkeiten nötig. Sie sind häufig durch das Heben schwerer Lasten, ungünstige Körperhaltungen und repetitive Bewegungen geprägt, führen zu hohen körperlichen Belastungen und stellen langfristig ein Risiko für gesundheitliche Beeinträchtigungen dar [1, 2]. Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) gehören zu den häufigsten Ursachen für krankheitsbedingte Arbeitsunfähigkeit, sowohl in Deutschland als auch europaweit [3, 4]. Besonders betroffen sind der Rücken und der Nacken-/Schulterbereich [3–6]. Mit zunehmendem Alter steigt das Risiko für MSE [4].

Die altersbedingte Zunahme der MSE resultiert aus einem Verschleiß des Körpers durch ungünstige Arbeiten wie schweres Heben, repetitive Tätigkeiten und wird durch die altersbedingte Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit noch begünstigt [7]. So nimmt insbesondere die sensorische und körperliche Leistungsfähigkeit (Beweglichkeit, Kraft, Ausdauer) mit dem Alter ab. Das führt dazu, dass bestimmte Tätigkeiten und Arbeiten wie schweres Heben, Arbeiten mit hohen Reichweiten oder Prüftätigkeiten für ältere Mitarbeitende kritisch sind und einer vollkommenen Leistungsentfaltung entgegenwirken [8].

Angesichts des demografischen Wandels und der alternden Belegschaft wird die alter(n)sgerechte Arbeitsgestaltung immer wichtiger. Ziel ist es, die Arbeitsbedingungen für Jung bis Alt so zu gestalten, dass diese möglichst gesund und motiviert über die

gesamte Erwerbszeit arbeiten können und ein langfristiger Einsatz der Beschäftigten sichergestellt ist [9]. Dazu sind die Arbeitsprozesse auf die Einsatzfähigkeit der Mitarbeitenden und den altersgerechten Anforderungen zu untersuchen und zu gestalten.

Befragungen, Profilvergleichsverfahren, Ergonomieverfahren wie EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet) oder spezifische Bewertungsverfahren wie der „CheckAge“ [10] helfen, Defizite in den Produktionsprozessen zu erkennen. Dies muss präventiv erfolgen, vor der Entstehung bestimmter Erkrankungen wie MSE. Dabei bieten die digitale Arbeitsplanung/Ergonomie und damit verbundene Methoden eine effektive und prospektive Möglichkeit zur Gestaltung gesunder und wirtschaftlicher Arbeitsbedingungen.

Im Kontext der Industrie 4.0 gewinnt die menschzentrierte Gestaltung unter Verwendung digitaler Methoden und Modelle zunehmend an Bedeutung. Mithilfe von digitaler Arbeits- und Prozessmodellierung können komplexe Arbeitsprozesse bereits in der Planungsphase ergonomisch und wirtschaftlich gestaltet und optimiert werden. Dabei werden auch digitale Menschmodelle eingesetzt, um die menschlichen Eigenschaften in der virtuellen Arbeitsumgebung abzubilden und diese bei der Arbeitsgestaltung zu berücksichtigen [11]. Zudem bieten digitale Menschmodelle die Möglichkeit, altersbedingte physiologische Veränderungen präventiv und prospektiv in die Arbeitsgestaltung miteinzubeziehen [12]. Die valide Abbildung der altersabhängigen Eigenschaften durch digitale Menschmodelle ist ein aktives Forschungsfeld.

Der vorliegende Beitrag zeigt anhand eines Beispiels aus der Kosmetikindustrie mithilfe der Simulationssoftware „ema Work Designer“, wie digitale Arbeits- und Prozessmodellierung genutzt werden kann, um komplexe manuelle Arbeitsprozesse systematisch hinsichtlich Ergonomie und Wirtschaftlichkeit zu bewerten und zu verbessern. Dabei werden verschiedene Altersgruppen mit jeweils spezifischen Fähigkeiten einbezogen und passende ergonomische Gestaltungsmaßnahmen abgeleitet.

2 Digitale Ergonomie

Die digitale Ergonomie umfasst rechnergestützte Methoden zur ergonomischen und wirtschaftlichen Analyse und Gestaltung von Produkten und Arbeitssystemen. Digitale Menschmodelle sind dabei ein wesentlicher Bestandteil, da diese die modellhaft geometrischen und weiteren Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen oder Elemente abbilden, simulieren und zur Nutzung bereitstellen können [11]. Durch die Simulation unter Einbeziehung der digitalen Menschmodelle können verschiedene „Was-wäre-wenn“-Szenarien und Designalternativen erstellt werden, ohne aufwendige Umbauten oder physische Prototypen zu erfordern. Anhand spezifischer Softwaresysteme mit digitalen Menschmodellen können Arbeitsprozesse nach ergonomischen und wirtschaftlichen Kriterien unter Einbeziehung der Eigenschaften und Fähigkeit des Menschen simuliert und bewertet werden. Häufig genutzte digitale Menschmodelle sind „ema Work Designer“, „Human Builder“, „Jack“ und „Ramsis“. Sie finden Anwendung in verschiedenen Branchen wie der Automobilindustrie, im Krankenhaus und der Luftfahrt [11].

Im Beitrag wird das Planungssystem ema Work Designer (emaWD) eingesetzt. emaWD ist Teil der ema Software Suite, mit der eine kombinierte Fabrik- und Arbeitsplanung durchgeführt werden kann [13, 14]. Mithilfe anthropometrischer Menschmodelle mit verschiedenen Fähigkeiten (zum Beispiel Alter, Kraft, Beweglichkeit) können manuelle und teilautomatisierte Prozesse sowie Mensch-Roboter-Interaktionen unter ergonomischen, zeitwirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Kriterien simuliert und analysiert werden [15, 16]. Die Arbeitsprozesssimulation erfolgt auf Basis der ema-Verrichtungsbibliothek mithilfe einer parametrisierten Tätigkeitsbeschreibung unter Angabe von Rahmenbedingungen (wie zu handhabende Objekte, Zielposition). Dabei werden die Bewegungsausführungen automatisch unter Beachtung einer Kollisionsvermeidung erzeugt und in der Ausführung (beispielsweise Bücken statt Beugen) je nach Prozessanforderung variiert. Alternativ können auch die realen Bewegungen einer Prozessausführung, die mittels Motion Capturing aufgenommen wurde, in ema übertragen und analysiert werden [17].

Auf Basis der Bewegungsausführung sowie der Tätigkeitsbeschreibung, inklusive Prozessinformationen wie etwa Gewicht und Art des Aufnehmens, wird der Prozess analysiert. Zur Bewertung der Ergonomie können Sicht- und Erreichbarkeitsanalyse sowie biomechanische Bewertungen, zum Beispiel mittels EAWS oder NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), genutzt werden. Zudem können die Arbeitsanforderungen mit den Fähigkeitsprofilen von Mitarbeitenden abgeglichen werden [15]. Zur wirtschaftlichen Betrachtung können auch Ausführungszeiten nach MTM-UAS (Methods-Time Measurement – Universal Analysis System), Kosten, notwendige Arbeitsflächen sowie wertschöpfende Tätigkeiten bewertet werden.

Die erstellten Simulationen können direkt in VR (Virtual Reality) betrachtet, angepasst sowie von den Personen in Tryouts selbst in virtuellen Cardboard-Engineering-Prozessen durchgeführt werden. Über eine bidirektionale USD (Universal Scene Description)-Schnittstelle zwischen ema und dem „Nvidia Omniverse“ ist kollaboratives Arbeiten in einem gemeinsamen Datenraum auch unter Nutzung weiterer Programme wie der virtuellen Inbetriebnahme oder Konstruktion möglich. Damit wird ein Schritt hin zur ganzheitlichen Produkt- und Arbeitsgestaltung ermöglicht [18]. Gleichzeitig unterstützt emaWD damit die direkte Einbindung der Mitarbeitenden in den Planungs- und Umgestaltungsprozess, sodass Lösungen gemeinsam in Gruppen entwickelt und erprobt werden können. Diese partizipative Herangehensweise fördert die Akzeptanz neuer Lösungen und verbessert die Qualität der Ergebnisse.

3 Methodik zur Entwicklung altersgerechter Gestaltungskonzepte

Zur Untersuchung der ergonomischen Belastungen und der Einsatzfähigkeit verschiedener Altersgruppen mit spezifischen Fähigkeiten wird die Prozesssimulationssoftware emaWD eingesetzt. Die hier beschriebenen Arbeiten nehmen mithilfe von emaWD eine korrektive alter(n)sgerechte Arbeitsgestaltung für manuelle Arbeitsprozesse in einer Kosmetikproduktion vor. Der Fokus liegt auf der Reduzierung der physischen Belastung. Dabei wird ein bestehender Arbeitsprozess analysiert und anschließend umgestaltet. Im ersten Schritt wird eine Arbeitssystemanalyse für den zu betrachtenden Arbeitsbereich durchgeführt, um die Prozessschritte sowie die Wechselwirkungen zwischen den Arbeitspersonen und anderen Elementen innerhalb des Arbeitssystems zu erfassen [2]. Damit soll sichergestellt werden, dass die anschließenden Modellierungen die realen Arbeitssysteme und -prozesse möglichst genau abbilden.

Im Vergleich zu Branchen wie der Automobilindustrie, in der ergonomische Standards existieren, gehört die Kosmetikproduktion zu den Branchen, in denen sich bisher vergleichsweise wenige Studien mit der Ergonomie der Arbeitsprozesse beschäftigt haben [19]. Die Herstellung von Kosmetikprodukten zeichnet sich durch eine hohe Produktvarianz und vielfältige manuelle Tätigkeiten aus. Insbesondere sind Rohstoffe in unterschiedlichen Formen zu handhaben und der Herstellungsprozess erfordert oft das genaue Abmessen sowie das Mischen der Rohstoffe. Diese vielfältigen Anforderungen und die räumlichen Gegebenheiten, die oftmals ungünstige Körperhaltungen erzwingen, erhöhen langfristig das Risiko von MSE.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf einen solchen Arbeitsprozess in der Kosmetikindustrie, analysiert und bewertet die dabei auftretenden Belastungen und zeigt Verbesserungsmöglichkeiten auf.

3.1 Anwendungsfall: Manuelle Arbeitsprozesse in einer Kosmetikproduktion

Der Arbeitsprozess besteht aus Teilabschnitten für die Herstellung von kosmetischen Produkten wie etwa Cremes. Der Arbeitsauftrag besteht darin, die benötigten Rohstoffe für die Produktion gemäß der Rezeptur abzuwiegen und in die Produktionsanlagen einzufüllen. Zweimal je 8-Stunden-Schicht muss dieser Arbeitsauftrag ausgeführt werden. Durchschnittlich zehn verschiedene

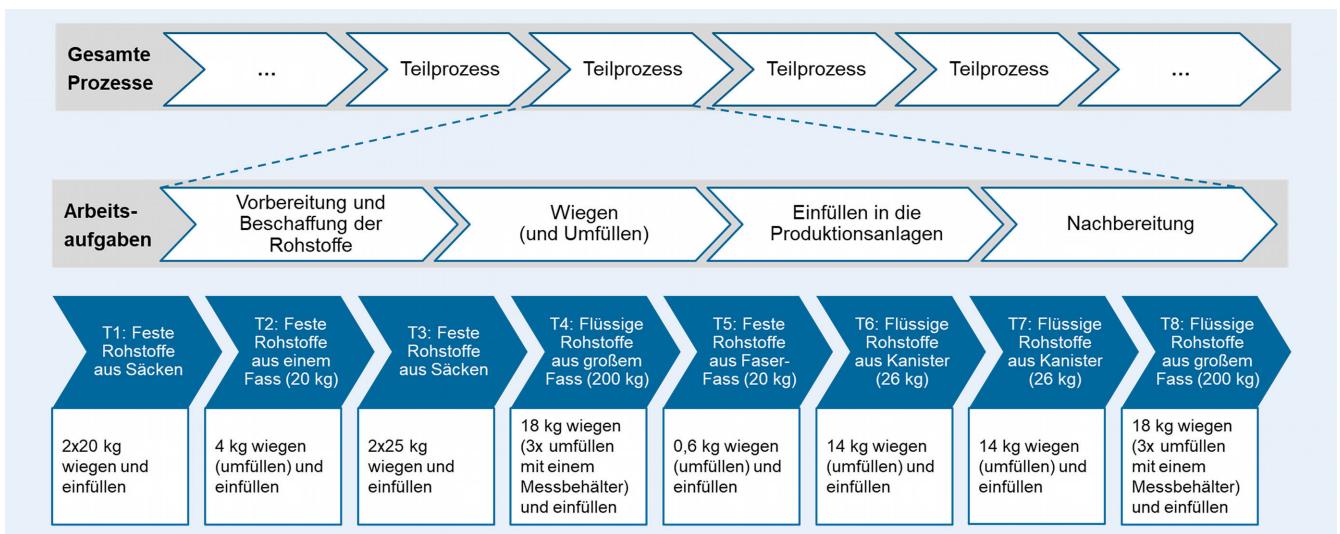


Bild 1. Prozessdarstellung der modellierten repräsentativen Arbeitsprozesse: Die Arbeitsprozesse entsprechen einem Arbeitsauftrag. Grafik: Fraunhofer IPA

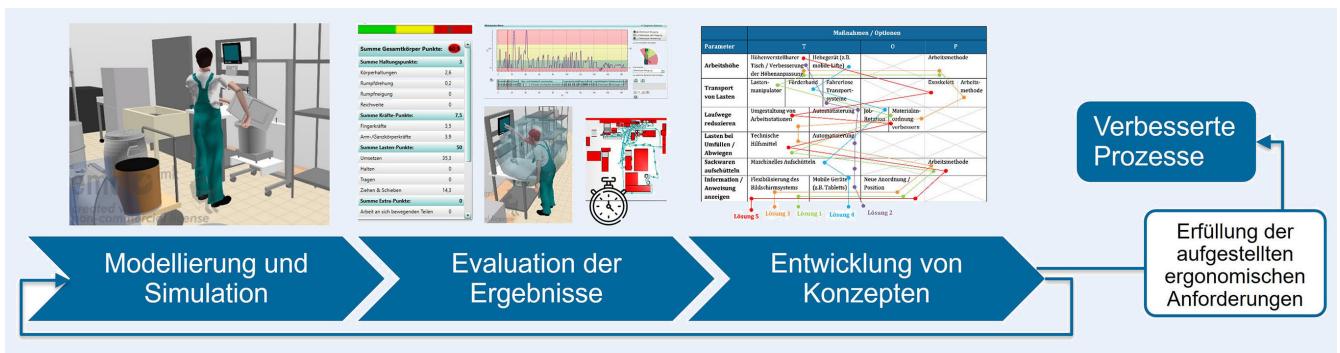


Bild 2. Workflow zur iterativen Verbesserung der Arbeitsprozesse mit „ema Work Designer“. Grafik: Fraunhofer IPA

Rohstoffarten werden dabei benötigt. Die Rohstoffe können entweder in flüssiger oder fester Form als Granulate vorliegen und werden in Säcken, Fässern sowie Kanistern in unterschiedlichen Größen gelagert. Die Arbeitsprozesse finden vorwiegend an den zwei Arbeitsstationen Wiegearbeitsplatz (Station 1) und Produktionsanlagen (Station 2) statt. Zudem gehören die Beschaffung von Materialien sowie nachbereitende Tätigkeiten zur Arbeitsaufgabe der Person. In **Bild 1** sind die Tätigkeiten für die zwei Hauptaufgaben „Wiegen und Umfüllen“ sowie „Einfüllen in die Produktionsanlage“ inklusive der zu handhabenden Lasten dargestellt. Diese wiederholen sich für mehrere Rohstoffarten in den gesamten Prozessen.

3.2 Iterative Verbesserung der Arbeitsprozesse

Der Workflow zur iterativen Verbesserung der Arbeitsprozesse mithilfe von emaWD (**Bild 2**) wurde unter Berücksichtigung verschiedener bewährter Methoden und Ansätze erarbeitet, darunter der menschzentrierte Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241–210 [20], der Analysemethode virtueller Ergonomie nach Bullinger-Hoffmann & Mühlstedt [10] und der allgemeinen Methodik der Systemgestaltung im technischen Regelwerk (vergleiche VDI 2221). Diese iterative Vorgehensweise erlaubt eine sukzessive Implementierung von Verbesserungen und eignet sich besonders zur Modellierung von komplexen Arbeitsprozessen.

Zur Bewertung der physischen Belastung wird das Ergonomic Assessment Work Sheet (EAWS) als Hauptansatz verwendet, um potenzielle muskuloskelettale Risiken für den Gesamtkörper sowie für die oberen Extremitäten resultierend aus der Ausübung der Arbeitsprozesse für eine 8-Stunden-Schicht zu identifizieren [20]. Dies erlaubt eine kombinierte Bewertung von Belastungen aus den Lastenhandhabungen, Finger-, Arm-, Ganzkörperkräften, ungünstigen Körperhaltungen und Repetition. Zusätzlich unterstützen weitere Analysen zu Sichtbarkeit und Erreichbarkeit sowie Gelenkwinkel nach DIN EN 1005–4 vor allem bei der Bewertung von Arbeitsplätzen. In Kombination mit Kennzahlen der Produktivität, den Zeitwerten der MTM-UAS-Analyse sowie Simulationszeit und Laufwege werden ergonomische Verbesserungspotenziale in jeder Iteration identifiziert.

Darauf aufbauend werden Gestaltungsmaßnahmen entwickelt. Für ein systematisches Vorgehen werden die ergonomischen Gestaltungsmaßnahmen nach dem sogenannten TOP-Prinzip (technische vor organisatorische vor personenbezogenen Maßnahmen) der Arbeitssicherheit (nach ArbSchG § 4) mithilfe eines morphologischen Kastens im Rahmen einer Nutzwertanalyse abgeleitet. Die Entwicklung von Gestaltungsmaßnahmen bezieht die altersbedingten Veränderungen der Leistungsfähigkeiten ein, indem sie die physiologische Fähigkeitentwicklung im Alter sowie Daten zu häufigen MSE unter älteren Mitarbeitenden als ein Kriterium bei der Auswahl von Gestaltungsmaßnahmen in der Nutzwertanalyse berücksichtigt. Dabei sollen die Gestaltungsmaßnahmen darauf

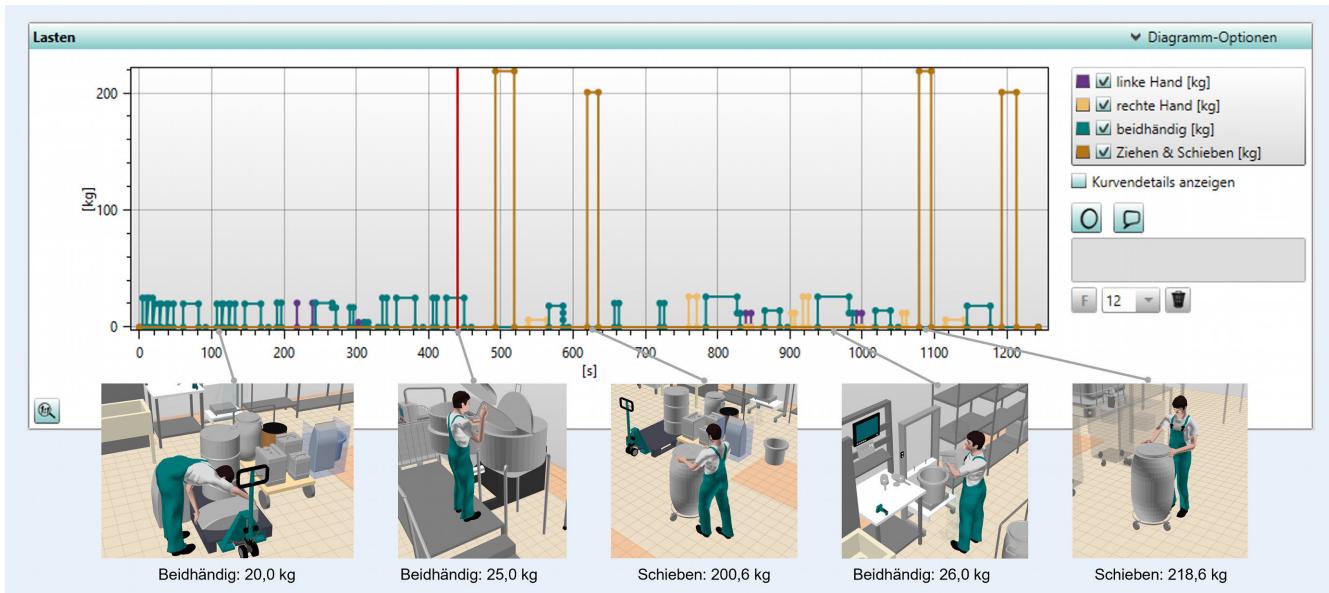


Bild 3. Zeitlicher Verlauf und Höhe der zu handhabenden Lasten pro Takt. Grafik: Fraunhofer IPA; imk GmbH

zielen, ungünstige Arbeitsbedingungen wie stark nach vorn gebeugte Körperhaltungen zu vermeiden und manuelle Lastenhandhabung mit schweren Lasten zu reduzieren.

Die Gestaltungsmaßnahmen werden iterativ unter Berücksichtigung der anthropometrischen Anforderungen nach DIN EN ISO 14738 [21] und einer fähigkeitsgerechten Arbeitsgestaltung mit folgenden drei deutschen Populationen nach Spitzhirn *et al.* [15] simuliert:

- M50-AK40, männlich, Altersklasse 40 Jahre, 50. Perzentil Körpergröße (175,5 cm), Reichweite; altersspezifische Beweglichkeit 50. Perzentil (Standard)
- F05-AK60: weiblich, Altersklasse 60 Jahre, 5. Perzentil Körpergröße (154 cm), altersbedingte reduzierte Beweglichkeit 5. Perzentil, altersbedingte Reduktion im Sehen und der Kräfte
- M95-AK20: männlich, Altersklasse 40 Jahre, 95. Perzentil Körpergröße (185,5 cm), altersbedingte reduzierte Beweglichkeit 5. Perzentil

Die altersabhängigen anthropometrischen Daten der Nationalität Deutsch basiert auf der Norm DIN 33402-2 [22].

Für die Altersklasse 60 werden die maximalen Aktionskräfte durch Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der Richtung der auszuübenden Kraft nach dem montagespezifischen Kraftatlas modifiziert [23]. Die Gelenkwinkelbereiche für Altersklasse 20 basiert auf Angaben aus Kapandji [24]. Für die Altersklassen 40 und 60 wurden mittels einer umfassenden systematischen Meta-Analyse die Daten für Gelenkbeweglichkeit in emaWD ergänzt [11, 25].

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der wirtschaftlichen und ergonomischen Auswertung des beschriebenen Anwendungsfalls im Istzustand-Szenario und in den verbesserten Szenarien vorgestellt. Zudem werden anhand zweier ausgewählter Bewegungssequenzen die Auswirkungen der Eigenschaftsveränderungen auf die Simulationsergebnisse durch Gegenüberstellung ausgewählter Menschmodelle unterschiedlicher Altersklassen dargestellt.

4.1 Zeitliche und ergonomische Auswertung

Die Ausführung der zwei Hauptaufgaben „Wiegen und Umfüllen“ sowie „Einfüllen in Produktionsanlage“ dauert nach MTM-UAS 1268 s (21,14 min), sodass diese Aufgaben während einer Netto-Schichtdauer von 440 min 21 mal erledigt werden können. Die wesentlichen Aufgaben bestehen in der Handhabung von Rohstoffen in unterschiedlichen Säcken, Fässern und Kanistern. Zusätzlich sind Eingaben am Bildschirm sowie am Bedienkasten der Anlage zu tätigen. Dabei sind während eines „Takts“ 425,7 m zurückzulegen. Wie das Spaghetti-Diagramm (siehe unten Bild 4) zeigt, sind zum Teil sehr lange Wegstrecken zurückzulegen, die sich unter anderem aus ungünstigen Anordnungen von Materialien und Layoutanordnungen ergeben.

Die ergonomische Auswertung des Istzustands unter Verwendung des Standardmenschmodells M50-AK40 (50. Körpergrößen-Perzentil, Altersklasse 40 Jahre) ergibt bei Annahme einer durchgehenden Ausführung der Tätigkeit über eine 8-Stunden-Schicht nach EAWS mit 235 Punkten ein erhebliches Risiko für die Entstehung muskuloskelettaler Beschwerden. Dies resultiert primär daraus, dass allein bei einem durchschnittlichen Takt 122 Lastenhandhabungen (108 Umsetz-, 10 Halte-, 4 Ziehen-&-Schieben-Vorgänge) durchzuführen sind, wie in Bild 3 dargestellt. Dies ergibt 227 Punkte für die Lastenhandhabung.

Dabei werden manuelle Handhabung von schweren Lasten sowie die ungünstigen Körperhaltungen als kritische physische Belastungsfaktoren identifiziert. Die zu handhabenden Lasten betragen zwischen 12 und 26 kg beim Umsetzen und Halten sowie circa 200 kg beim Ziehen & Schieben mit Transportwagen. Die ungünstigen Körperhaltungen entstehen aufgrund ungünstiger Arbeitshöhen. Zusätzlich erhöht die ungünstige Anordnung der Materialbereitstellung die Laufwege mit Lasten und die Umsetzvorgänge, da benötigte Rohstoffe von verschiedenen Standorten beschafft werden müssen und sich diese nicht in unmittelbarer Nähe zum Wiegearbeitsplatz befinden.

Die zwei Hauptaufgaben „Wiegen und Umfüllen“ sowie „Einfüllen in Produktionsanlage“ werden pro Schicht im Durchschnitt nur zweimal durchgeführt und mit anderen Logistikaufgaben

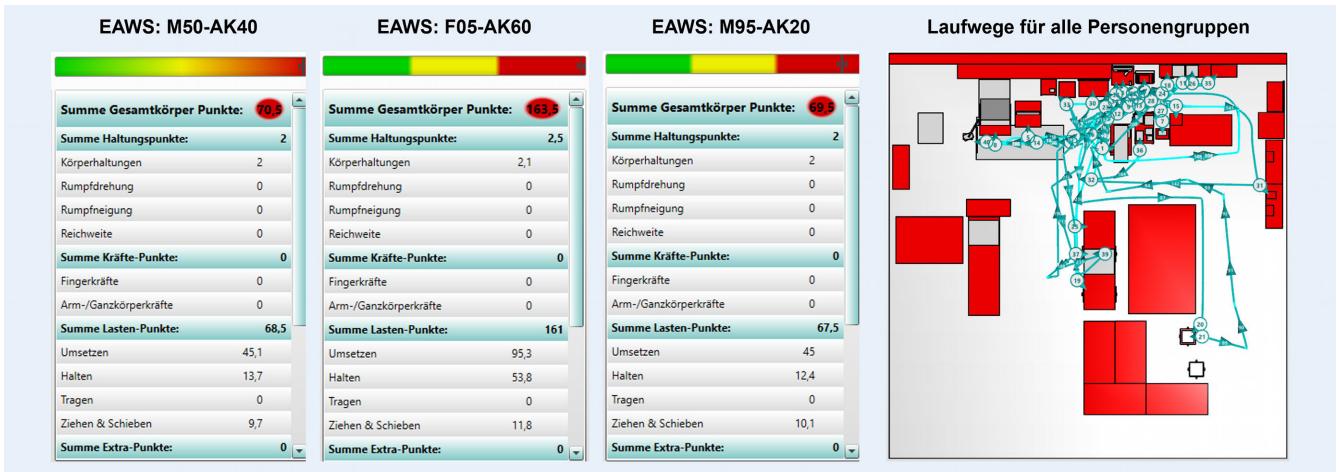


Bild 4. EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet)-Bewertung für Menschmodelle M50-AK40, F05-AK60, M95-AK20 sowie Laufweganalyse nach Spaghetti-Diagramm. Grafik: Fraunhofer IPA; imk GmbH

sowie weiteren weniger stark körperlich anstrengenden Aufgaben, wie Dateneingabe kombiniert. Dies trägt zur Erholung und Entlastung des Mitarbeitenden bei. Dies ist auch bei der Bestimmung nach EAWS zu berücksichtigen, sodass sich ein Punktewert von 70,5 Punkten für M50-AK40 ergibt. Damit besteht ein hohes ergonomisches Risiko sowie eine eingeschränkte Ausführbarkeit für bestimmte Personenkreise.

4.2 Auswirkungen altersbedingter Eigenschaftsveränderungen

Für eine alter(n)sgerechte Arbeitsgestaltung sind weitere Kollektive wie Frauen sowie verschiedene Altersklassen einzubeziehen. Dies wird nach Spitzhirn et al. [12] mit zwei zusätzlichen Körperperzentilen (kleine Frau, Altersklasse 60 (F05 AK60) sowie großer Mann, Altersklasse 20 (M95 AK20)) umgesetzt. Das Geschlecht hat neben Alterseffekten einen wesentlichen Einfluss auf die EAWS-Punkte (Bild 4). Dabei ist eine wesentliche Zunahme der EAWS-Punkte und damit der Belastungen und Risiken für Frauen und vor allem für die F05-AK60 mit 163,5 Punkten vorhanden. Dies resultiert aus der Handhabung von Lasten nahe der maximalen Ausführbarkeit von etwa 25 kg und wesentliche Überschreitungen von Empfehlungen für häufige Handhabungen von 15 kg [26]. Gleiche Lastenhandhabungen führen zu wesentlich höheren Lastpunkten bei Frauen (25 kg = 25 Lastpunkte) im Vergleich zu Männern (25 kg = 4 Lastpunkte).

Mit zunehmendem Alter ist auch eine wesentliche Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit zu verzeichnen. So ist eine geschlechtsspezifische wie auch altersbedingte Abnahme in der Maximalkraft festzustellen. Dies wirkt sich zwar nach EAWS nur auf die Aktionskräfte in Sektion 2 aus, sollte aber auch bei der Lastenhandhabung berücksichtigt werden. Da im vorliegenden Beispiel keine Aktionskräfte von mindestens 30 N aufzubringen sind, ist die Betrachtung von diesem Leistungsfaktor an dieser Stelle zu vernachlässigen. Demgegenüber kann die Reduktion der Körpermaße und der Gelenkbeweglichkeit mit zunehmendem Alter sowie in den Altersklassen zu Einschränkungen in der Ausführbarkeit (zum Beispiel durch reduzierte Reichweite) sowie zu unterschiedlichen Bewegungsausführungen einer Tätigkeit in der Simulation führen. Dies wird anhand zweier kritischen Bewegungssequenzen aus dem Istzustand in Bild 5 und Bild 6 aufgezeigt.

Dazu wird ein Vergleich des Menschmodell M50 mit den Altersklassen AK40 und AK60 vorgenommen.

Bild 5 zeigt die Bewegung zu Beginn der bodennahen Aufnahme eines Sacks der Menschmodelle M50 für die Altersklassen 40 und 60 zu drei Zeitpunkten. Die Gelenkwinkel zeigen, dass durch die reduzierte Reichweite mehr Beugung des Rumpfes nötig ist. Zudem gibt es deutliche Unterschiede in Armflexion sowie Armabduktion im Schultergelenk. Die Gelenkwinkel der simulierten Bewegungen beim Menschmodell M50 der AK60 im Vergleich zum M50-AK40 nehmen tendenziell zu. Eine Ausnahme ist die rechte Armflexion bei der Aufnahme des Sacks. Dabei nimmt die rechte Armflexion einen negativen Wert an, da der Arm bei der Bewegung zu Beginn hinter dem Körper liegt.

Bild 6 ist die Ausführung des M50-AK40 der des F05-AK60 gegenübergestellt. Dabei wird der Einfluss der altersbedingten Abnahme der Beweglichkeit und insbesondere der Anthropometrie (unter anderem kürzere Armreichweite) sehr deutlich. So kommt die kleine Frau trotz höherer Oberkörperbeugung sowie Armflexion nicht mehr an die Bedienelemente des Bildschirms.

4.3 Alter(n)sgerechte Umgestaltung des Bereiches

Um eine allgemeine Einsatzfähigkeit eines breiten Kollektivs von Frauen über Männern sowie jungen bis älteren Mitarbeitenden zu gewährleisten, wurden unter Verwendung des Workflows aus Bild 2 drei Gestaltungslösungen (Lösung A, B1 und B2) erarbeitet. Sie wurden unter Einsatz der Menschmodelle F05-AK60, M50-AK40 und M95-AK20 simulativ abgeprüft. Dabei konnten ergonomische Risiken nach EAWS bei allen drei Gestaltungsvarianten wesentlich reduziert werden (Bild 7). Jedoch ist dabei zu beachten, dass nur Lösung B2 ein geringes Risiko für alle Personengruppen bedeutet. Zusätzlich sind wesentliche Zeiterparnisse aufgrund von reduzierten Laufwegen und optimierten Arbeitshöhen vorhanden. So können ergonomisch ungünstige Körperhaltungen wie das starke nach vorn Beugen vermieden werden, was sich auch positiv auf den Zeitaufwand auswirkt.

Lösung A sieht die Erweiterung der Plattform sowie Optimierung des Layouts vor, wodurch kürzere Laufwege und bessere Materialaufnahme ermöglicht werden. Trotz der Verbesserung verbleibt ein erhöhtes Risiko (gelber Bereich), da weiterhin alle Lastenhandhabungen manuell durchzuführen sind. Im Vergleich

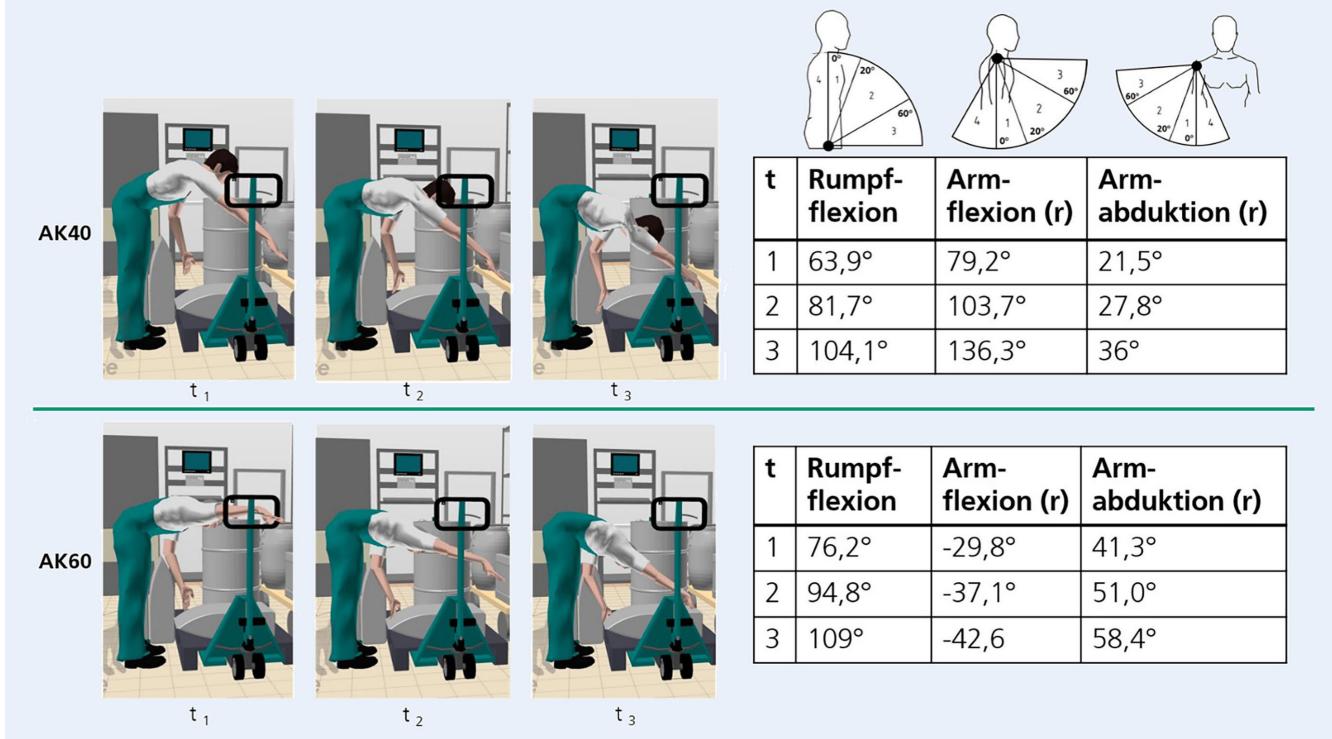


Bild 5. Vergleich altersabhängiger Bewegungen zur Sackaufnahme zu drei Zeitpunkten (links), Gelenkwinkel Rumpfflexion, rechte Armflexion sowie -abduktion zu den Zeitpunkten (rechts). Grafik: Fraunhofer IPA

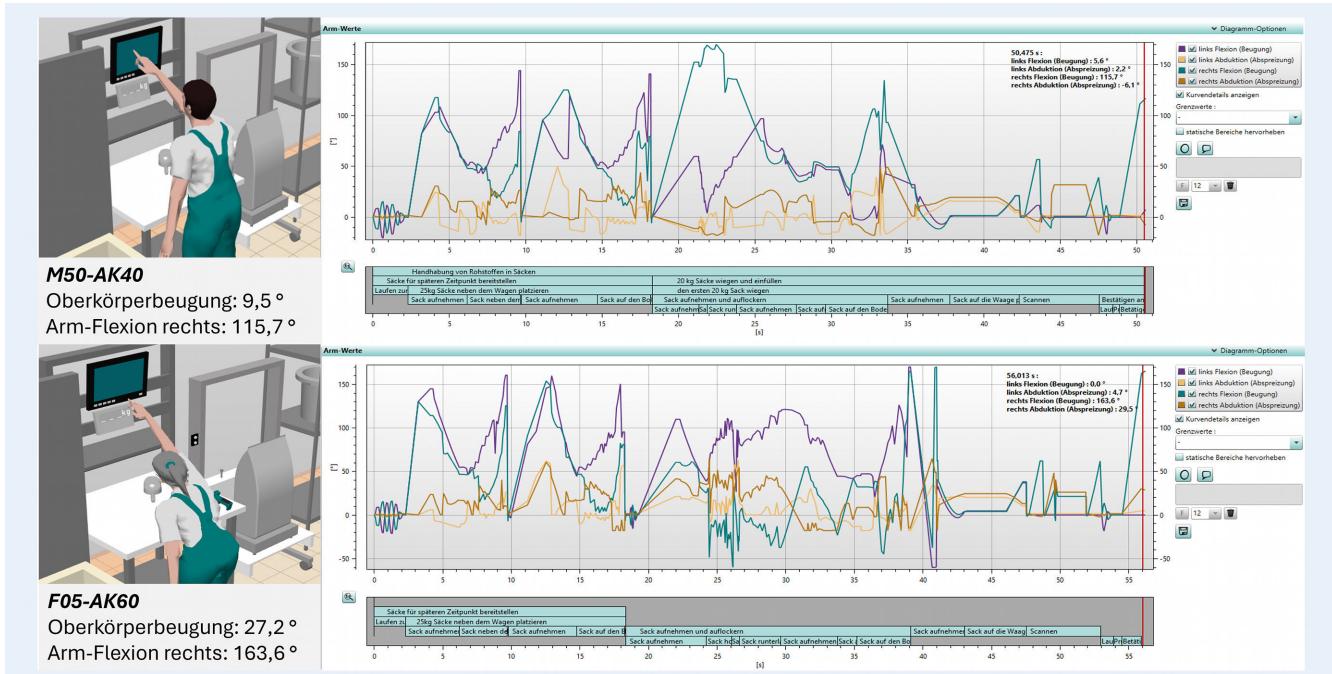


Bild 6. Vergleich altersabhängiger Bewegungen von M50-AK40 und F05-AK60 zum Betätigen des Bildschirms (links) mit dazugehörigen Gelenkwinkelverläufen für Oberarm für beide Personengruppen (rechts). Grafik: Fraunhofer IPA; imk GmbH

dazu werden in Lösung 2 durch den Einsatz von Lastenmanipulatoren die Handhabungen der Lasten signifikant reduziert. Aufgrund der Beschaffenheit der Podeste wurden zwei Varianten B1 und B2 aufgearbeitet. Damit wird den unterschiedlichen Komplexitätsgraden der Umsetzung sowie der Kostenstruktur Rechnung getragen. Lösung B1 schlägt die Anschaffung eines Lastenmani-

pulators für die Einfülvorgänge der abgewogenen Rohstoffe vor. Damit erreichen M50-AK40 und M95-AK20 den Bereich eines geringen Risikos nach EAWS, jedoch nicht F05-AK60. Die größte Reduzierung der EAWS-Gesamtpunkte erzielt die Variante B2, sodass für alle Personengruppen ein geringes Risiko nach EAWS besteht. Dabei wird der Lastenmanipulator für alle Umsetzvor-

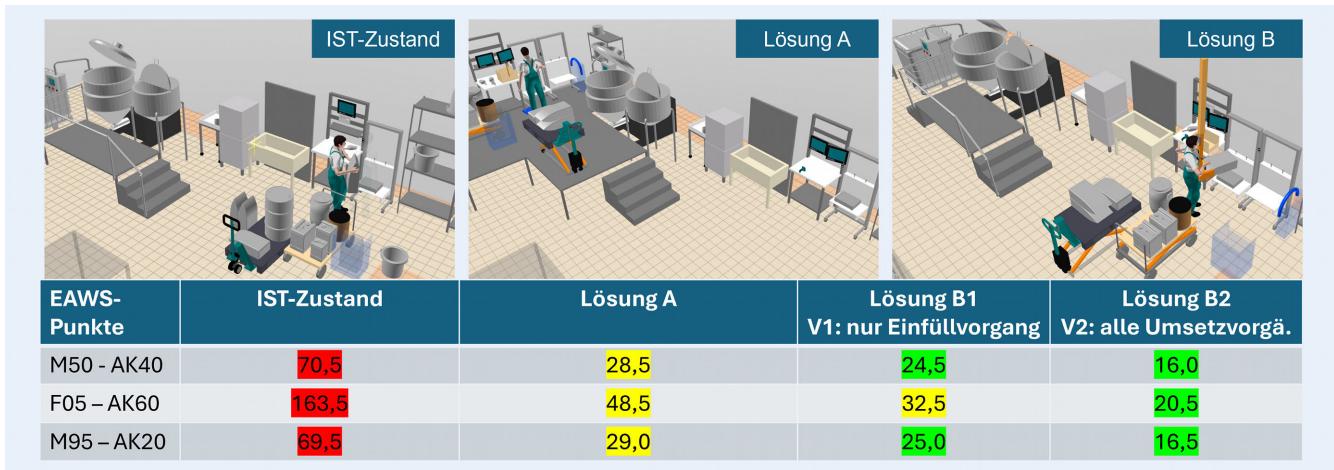


Bild 7. Vergleich der EAWS-Bewertung für M50-AK40, F05-AK60, M95-AK20 für Ist-Zustand und Lösung A und B; Beurteilung der EAWS-Ergebnisse nach Ampel-Risikostufen. *Grafik: Fraunhofer IPA; imk GmbH*

gänge eingesetzt. Dies ist zwar ergonomisch die beste Variante, jedoch auch die technisch anspruchsvollste Lösungsvariante.

5 Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen die erwartete hohe Wirksamkeit der technischen Maßnahmen zur Reduzierung der körperlichen Belastungen für ältere Arbeitspersonen. Es konnte gezeigt werden, dass individuell anpassbare Arbeitshöhen etwa durch höhenverstellbare Arbeitsmittel sowie der Einsatz technischer Hilfsmittel bei der Lastenhandhabung zu deutlichen ergonomischen Verbesserungen führen. Laut EAWS-Bewertung zeigt der Einsatz eines Lastenmanipulators ein großes Potenzial auf, indem hohe Belastungen aufgrund von Lastenhandhabungen wesentlich reduziert werden können. Aufgrund der konzeptionellen Modellierung ist jedoch eine weitere Analyse hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit sowie der potenziellen Risikofaktoren durch Schulterabduktion über 90° notwendig [27]. Außerdem konnte eine positive Wirkung durch die Kombination von technischen, organisatorischen und personenbezogenen Maßnahmen festgestellt werden. Als sinnvolle Ergänzungen zu den technischen Maßnahmen können beispielsweise eine effiziente Materialanordnung sowie eine ergonomische Handhabungstechnik genannt werden.

Dabei sollte auch bedacht werden, dass die Lösungsmaßnahmen nicht nur theoretische Anforderungen in der simulationsbasierten Evaluation erfüllen, sondern auch gleichzeitig in der Praxis realisierbar sein und Akzeptanz bei den Mitarbeitenden finden müssen [28, 29]. Umso wichtiger ist der Feedback- und Austauschprozess mit den Stakeholdern, der durch die 3D-Visualisierung sowie VR-Applikation von emaWD und gekoppelt mit den objektiven Kennzahlen (Ergonomiebewertung nach EAWS, Zeitbewertung nach MTM) transparent möglich ist.

Durch die Einbeziehung von altersbedingten Veränderungen der körperlichen Leistungsfähigkeiten, wie Anthropometrie und Gelenkbeweglichkeit, konnten zudem kritische Tätigkeiten und Bewegungsausführungen identifiziert werden. So sind wesentliche Unterschiede in der EAWS-Bewertung zwischen den genutzten Menschmodellen M50-AK40, F05-AK60, M95-AK20 vorhanden. Vor allem Frauen und insbesondere Frauen in der Altersklasse 60 sind einem erhöhten MSE-Risiko nach EAWS ausgesetzt. Durch die Umgestaltungslösungen, insbesondere B2, können wesentliche

Risiken reduziert und damit ein Beitrag für eine altersgerechte Gestaltung und Gesunderhaltung geleistet werden. Zudem weist der Vergleich der Bewegungsausführung für das Menschmodell M50 für die zwei Altersklassen AK40 und AK60 auf veränderte Bewegungsmuster hin. So sind mehr Rumpfbeugungen und größere Gelenkwinkel im Schultergelenk vorhanden. *Shojaei et al. [30]* zeigten ebenfalls in ihren Studien, dass die älteren Personen eine tendenzielle stärkere Rumpfbeugung beim Heben von Lasten aufweisen.

6 Fazit und zukünftige Arbeit

Dieser Beitrag stellt eine korrigierende Arbeitsgestaltung für einen bereits existierenden Anwendungsfall aus der Kosmetikproduktion vor. Dabei konnte gezeigt werden, wie die Arbeits- und Prozessmodellierung genutzt werden kann, um wenig standardisierte Arbeitsprozesse systematisch hinsichtlich der Ergonomie zu verbessern. Zudem werden die Potenziale digitaler Menschmodelle zur alters- und fähigkeitsgerechten Arbeitsgestaltung aufgezeigt.

Die dargestellte Vorgehensweise zum Ableiten ergonomischer Gestaltungsmaßnahmen unter Berücksichtigung altersbedingter Veränderungen, mithilfe des Prozesssimulationstools emaWD mit digitalen Menschmodellen unterschiedlicher Altersklassen und Fähigkeiten, kann auch auf die präventive und prospektive Gestaltung übertragen werden. Denn durch digitale Abbildungen sind keine echten Prototypen mehr erforderlich und die ergonomischen Verbesserungspotenziale können bereits in der Planungsphase identifiziert und transparent diskutiert werden.

Zudem liegt in emaWD, basierend auf den Simulationsergebnissen, das Arbeitsplatzanforderungsprofil (APA) vor, das eine kategorische Übersicht der Anforderungen an die Arbeitsplätze bietet. Im Gegensatz zum Profilvergleich, bei dem bestehende Arbeitsplätze mit den Fähigkeitsprofilen verglichen werden, kann das APA bereits in der Planungsphase für einen Vergleich mit Fähigkeitsprofilen verwendet werden. Dies ermöglicht die Identifizierung weiterer Verbesserungspotenziale sowie eine frühzeitige Anpassung in der Planungsphase. Durch die Visualisierungsmöglichkeiten wird zusätzlich Transparenz für die Gestaltungsmaßnahmen für diverse beteiligte Stakeholder und Entscheider geschaffen.

Allgemein besteht weiterer Forschungsbedarf zur altersabhängigen Leistungsfähigkeit, vor allem im industriellen Umfeld. Die altersphysiologischen Veränderungen sind komplex und weisen große individuelle Unterschiede auf. In Bezug auf die Leistungswandlung können neben altersbedingten Einflüssen weitere Faktoren eine Rolle spielen, etwa eine bereits vorliegende irreversible körperliche oder psychische Erkrankung [8]. Diese Aspekte sind im weiteren Vorgehen zu beachten. Weiterhin zeigen Exoskelette zur Integration von leistungsgewandelten Mitarbeitenden großes Potenzial, um die Beanspruchungen bei körperlichen Arbeiten zu reduzieren. Sie sollten in Zukunft systematisch berücksichtigt werden [31].

DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich recht herzlich bei der Firma La Biosthétique, insbesondere bei Herrn *Schmid* und Herrn Dr. *Ader*, für die Bereitstellung der Daten und den regen Austausch bei der Bearbeitung bedanken.

L iteratur

- [1] Liebers, F.; Brendler, C.; Latza, U.: Berufsspezifisches Risiko für das Auftreten von Arbeitsunfähigkeit durch Muskel-Skelett-Erkrankungen und Krankheiten des Herz-Kreislauf-Systems. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2016
- [2] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Heidelberg: Springer-Verlag 2018
- [3] European Agency for Safety and Health at Work; Kok, J.; Vroonhof, P. et al.: Work-related Musculoskeletal Disorders: Prevalence, Costs and Demographics in the EU. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2019, doi.org/10.2802/66947
- [4] Brenschmidt, S.; Siefer, A.; Hinnenkamp, H. et al.: Arbeitswelt im Wandel: Zahlen – Daten – Fakten. Ausgabe 2020. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2020, doi.org/10.21934/baua;praxis20200131
- [5] Eurofound; Wilczynska, A.; Cabrita, J. et al.: 6th European Working Conditions Survey: 2017 Update. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2017, doi.org/10.2806/422172
- [6] Holzgreve, F.; Schulte, L.; Oremek, G. et al.: Allgemeine und arbeitsplatzbezogene Risikofaktoren von Muskel-Skelett-Erkrankungen und deren Bestimmungsmethoden. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 73 (2023) 4, S. 182–189
- [7] Brendler, C.: Alters- und berufsspezifische Unterschiede für das Auftreten von Arbeitsunfähigkeit aufgrund ausgewählter Herz-Kreislauf- sowie Muskel-Skelett-Erkrankungen. Dissertation, Charité – Universitätsmedizin Berlin, 2023
- [8] Ilmarinen, J.; Tempel, J.: Erhaltung, Förderung und Entwicklung der Arbeitsfähigkeit – Konzepte und Forschungsergebnisse aus Finnland. In: Badura, B.; Schellschmidt, H.; Vetter, C. (Hrsg.): Demographischer Wandel: Herausforderung für die betriebliche Personal- und Gesundheitspolitik – Zahlen, Daten, Analysen aus allen Branchen der Wirtschaft. BerHeidelberg: Springer 2003, S. 85–99, doi. org/10.1007/978-3-642-59351-2_7
- [9] Rudow, B.; Neubauer, W.; Krüger, W. et al.: Die betriebliche Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter – Ein Arbeits- und Personalprojekt aus der Automobilindustrie. Arbeit 16 (2007) 2, S. 118–131
- [10] Börner, K.; Löffler, T.; Bullinger-Hoffmann, A. C. (Hrsg.): CheckAge – Screening-Verfahren für die Bewertung alter(n)sgerchter Arbeitsplätze. Chemnitz: aw&l – Wissenschaft und Praxis Verlag 2017, doi. org/10.14464/awir.v1i2.13
- [11] Bullinger-Hoffmann, A.C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Heidelberg: Springer-Verlag 2016
- [12] Spitzhirn, M.; Ullmann, S.; Fritzsche, L.: Considering individual abilities and age-related changes in digital production planning—human-centered design of industrial work tasks with ema software. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 76 (2022) 4, S. 459–477, doi. org/10.1007/s41449-022-00343-5
- [13] imk Industrial Intelligence GmbH: Homepage. Stand: 2024. Internet: imk-industrial-intelligence.com. Zugriff am 27.01.2025
- [14] Spitzhirn, M., Ullmann, S., Bauer, S. et al.: Digital production planning and human simulation of manual and hybrid work processes using the ema Software Suite. Proceedings of the 7th International Digital Human Modeling Symposium 7 (1), 2022, Iowa, USA, p.20–32, doi. org/10.17077/dhm.31816
- [15] Spitzhirn, M., Gärtner, C., Ullmann, S. et al.: Considering Individual Abilities and Age-Related Changes in Digital Production Planning Using Digital Human Models. In: Scataglini, S.; Harij, G.; Saeys, W.; Truijen, S. (eds.): DHM 2023, Lecture Notes in Networks and Systems 744, pp. 1–10, 2023, doi.org/10.1007/978-3-031-37848-5_28
- [16] Spitzhirn, M.; Gärtner, C.; Fritzsche F.: Digital planning of ability-appropriate and productive human-robot interactions in production. IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO), Berlin, 2023, pp. 166–171, doi.org/10.1109/AR506563.2023.10187520
- [17] Spitzhirn, M.; Benter, M.; Heindl, C. et al.: Hybrid work systems – platform-based work planning – designing productive and human-centered work processes. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 76 (2022), S. 489–509, doi.org/10.1007/s41449-022-00342-6
- [18] Spitzhirn, M.; Liedtke, M.; Grün, G. et al.: Simulation of work environment factors for human-oriented and efficient workplaces. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 76 (2022), S. 416–439, doi. org/10.1007/s41449-022-00337-3
- [19] Daub, U.; Ackermann, A.; Kopp, V.: Ergonomie-Benefits: Kriterien zur Bewertung ergonomischer Maßnahmen in der Kosten-Nutzen-Analyse. Stuttgart: Fraunhofer IPA 2019, doi.org/10.24406/ipa-n-559153
- [20] Schaub K.; Mühlstedt, J.; Illmann, B. et al.: Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the ergonomics assessment worksheet' (EAWS). International Journal of Human Factors Modelling and Simulation 3 (2012) 3/4, dx.doi. org/10.1504/IJHFMS.2012.051581
- [21] DIN EN ISO 14738:2009-07: Sicherheit von Maschinen – Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen. Ausgabe Juli 2009
- [22] DIN 33402-2: Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte. Berlin: Beuth Verlag 2020
- [23] Wakula, J.; Berg, K.; Schaub, K. et al.: Der montagespezifische Kraftatlas. BGIA-Report 3/2009. Sankt Augustin: BGIA 2009
- [24] Kapandji, I. A.: Funktionelle Anatomie: schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik. Stuttgart: Georg Thieme Verlag 2016
- [25] Spitzhirn, M.: Integration altersbedingter Veränderung der Beweglichkeit zur altersgerechten Arbeitsprozessgestaltung in digitalen Menschmodellen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels, 63. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press 2017, Beitrag C.1.7, S. 1–6
- [26] HVBG (Hrsg.): Leitfäden für die Beurteilung von hebe- und Tragetätigkeiten. Gesundheitsgefährdung, gesetzliche Regelungen, Messmethoden, Beurteilungskriterien und Beurteilungsverfahren. Stand: 1995. Internet: www.dguv.de/projektdatenbank/ffff0119/pr9119.pdf. Zugriff am 27.01.2025
- [27] Nimbarie, A. D.; Chowdhury, S. K.; Moore, C. W.: Effects of lift-assist device on trunk and shoulder kinematics. International Journal of Occupational Safety and Health 5 (2017) 1, pp. 1–6
- [28] Fritzsche, L.; Hözel, C.; Spitzhirn, M.: Weiterentwicklung der Kosten-Nutzen-Bewertung für Ergonomiemäßignahmen anhand von Praxisbeispielen der Automobilindustrie. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.): Arbeit interdisziplinär – analysieren, bewerten, gestalten. Dortmund: GfA-Press 2019, Beitrag A.7.2, S. 1–6
- [29] Kaltenbrunner, S.; Spillner, R.: Untersuchungen zur Akzeptanz von Handhabungsgeräten. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 4, S. 244–248
- [30] Shojaei, I.; Vazirian, M.; Croft, E. et al.: Age related differences in mechanical demands imposed on the lower back by manual material handling tasks. Journal of Biomechanics 49 (2016) 6, pp. 896–903
- [31] ASTM: New Standard for Use of Exoskeletons for Return-to-Work. Stand: 2024. Internet: sn.astm.org/update/exoskeletons-return-to-work.html. Zugriff am 27.01.2025



Dr.-Ing. Mark Tröster
mark.troester@ipa.fraunhofer.de
Foto: Autor



Binzi Hu, M.Sc.
Foto: Autorin

Verena Kopp, M.Sc.
Urban Daub, M.Sc.

**Prof. Dr.-Ing.
Thomas Bauernhansl**
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Dr. med. Urs Schneider

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Universität Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
IFF der Universität Stuttgart
Allmandring 35, 70569 Stuttgart
www.iff.uni-stuttgart.de/forschung/mensch-technik



Michael Spitzhirn
Foto: Autor

imk Industrial Intelligence GmbH
Amselgrund 30, 09128 Chemnitz
www.imk-ema.com

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)