

Digitale Ergonomie – Ableitung und Erprobung möglicher Präventionsansätze mithilfe digitaler Werkzeuge auf der Grundlage der messwertbasierten Gefährdungsbeurteilung

Kai HEINRICH¹, Michael SPITZHORN², Ingo HERMANN¹, Andre KAISER³

¹ *Institut für Arbeitsschutz der DGUV, Alte Heerstr. 111, D-53757 Sankt Augustin,*

² *imk Industrial Intelligence GmbH, Amselgrund 30, D-09128 Chemnitz,*

³ *Institut Chemnitzer Maschinen und Anlagenbau e. V.,
Otto-Schmerbachstraße 19, D-09117 Chemnitz*

Kurzfassung: Um gesundheitliche Risiken von Arbeitsprozessen zu identifizieren und diese menschengerecht zu gestalten, werden Methoden der digitalen Ergonomie mit verschiedenen Detaillierungsgrad eingesetzt. Eine kombinierte Anwendung von Motion Capturing (MoCap), digitalen Menschmodellen und Bewertungsmethoden mit verschiedenen Detailtiefen verspricht wesentliche Vorteile bei der Bewertung und Gestaltung gesunder Arbeitsplätze. Dazu wird ein Ansatz zur kombinierten Anwendung von Planungs- und Analysewerkzeugen (emaWD, alaska/Dynamicus, CUELA-Methode) anhand einer Logistiktätigkeit vorgestellt. Es werden Daten zwischen den Systemen ausgetauscht sowie Analysen und Gestaltungsempfehlungen anhand MoCap- und Simulationsdaten abgeleitet. Mittels der Ergebnisse (u. a. Gelenkmomenten, EAWS-, Zeitanalysen) wurden zwei Präventivmaßnahmen ausgearbeitet. Durch den Ansatz können detaillierte Analysen sowie Maßnahmen abgeleitet und simulativ überprüft werden.

Schlüsselwörter: Digitale Arbeitsplanung, ema Work Designer, WIDAAN, Dynamicus, Motion Capturing, Prozesssimulation

1. Gestaltung und Analyse von Arbeitsprozessen

Ungünstige Belastungen wie Zwangshaltungen, hohe Lastenhandhabungen begünstigen die Entstehung muskuloskelettaler Erkrankungen wie Arthrose (Holzgreve et al. 2023). Um diese zu identifizieren und menschengerecht zu gestalten, werden verschiedene Methoden mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad eingesetzt. So können Checklisten (z. B. DGUV Checkliste), Screeningverfahren (z. B. EAWS) bis zu detaillierten Messverfahren (z. B. EMG-Messungen) genutzt werden (DGUV 2020).

Messwertbasierte Verfahren für die Gefährdungsbeurteilung, die Bewertungsansätze für muskuloskelettale Belastungen mittels kontinuierlich gemessener Expositionsdaten nutzen, waren bisher nur mit Expertenmesssystemen möglich. Im Zuge der Digitalisierung und des technischen Fortschritts haben sich Motion Capturing Systeme (MoCap) zur exakten Erfassung menschlicher Bewegung und Belastung sowie Softwarelösungen zur Simulation von Arbeitsplätzen und -prozessen in der digitalen Ergonomie etabliert. Mit MoCap kann die Arbeitsausführung des Ist-Prozesses exakt erfasst und die auftretenden Belastungen des Muskel-Skelett-Systems z. B. mit dem CUELA-Verfahren (DGUV 2020) biomechanisch bewertet werden. Der Einsatz digitaler Menschmodelle in Bewegungssimulationen oder anhand von MoCap-Bewegungs-

daten ermöglicht die Analyse und Bewertung berufsbedingter Belastungen des Muskel-Skelett-Systems sowie die Gestaltung gesunder und sicherer Arbeitsprozesse (Paul 2021). Mithilfe von Planungssystemen mit anthropometrischen Menschmodellen wie emaWD können Arbeitsplätze bereits im Planungsprozess virtuell aufgebaut und mit etablierten Verfahren wie MTM-UAS oder EAWS ergonomisch und wirtschaftlich bewertet und gestaltet werden (Spitzhörn et al. 2023). Systeme mit biomechanischen digitalen Menschmodellen wie alaska/Dynamicus oder CUELA-Methode können detaillierte kinematische und dynamische Belastungsparameter wie Gelenkmomente berechnen, sind jedoch aufwendiger und komplexer in der Anwendung. Eine kombinierte Anwendung der o.g. Systeme und Methoden verspricht erhebliche Vorteile. Im Beitrag wird kombinierter Einsatz der Planungs- und Analysewerkzeuge (emaWD, alaska/Dynamicus, CUELA-Methode) für die Gestaltung gesunder Arbeitsplätze und -prozesse anhand einer Logistiktätigkeit vorgestellt.

2. Methodenvergleich zur Gestaltung humaner Arbeitsprozesse

emaWD ermöglicht die ganzheitliche, fähigkeitsgerechte, prospektive Planung, Bewertung und 3D-Simulation und Visualisierung. So können Arbeitsprozesse (mit / ohne Roboterverhalten) unter Nutzung anthropometrischer Menschmodelle mit unterschiedlichen Fähigkeiten (z. B. Alter, Kräfte, Beweglichkeiten) simuliert und nach ergonomischen, zeitwirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Kriterien bewertet und gestaltet werden (Spitzhörn et al. 2023). Dabei werden die Bewegungen mittels parametrisierter Tätigkeitsbeschreibung unter Angabe von Rahmenbedingungen (z. B. zu handhabende Objekte, Zielposition) simuliert oder MoCap-Daten als *bvh in ema eingeladen (Spitzhörn et al. 2022). Der Arbeitsprozess kann mittels 3D-Simulation, Visualisierung und Auswertungen (z. B. Zeitanalysen MTM-UAS, EAWS-, Gelenkwinkel-, Sicht-, Erreichbarkeitsanalysen) analysiert und gestaltet werden.

Der Dynamicus des ICM ist ein MKS-Menschmodell und in eine Softwaresuite eingebettet (Kaiser et al. 2022). Diese umfasst Werkzeuge zur modellgestützten Datenerfassung (Videodaten, Motion Capturing, Kraft- und Drucksensoren, Eyetracking etc.) und Kalibrierung für Menschmodelle auf individuelle Eigenschaften sowie zeitliche und räumliche Kalibrierung von Umgebungsobjekten (Kontext). Damit können in Echtzeit konsistente Bewegungsdaten berechnet, Prozesse automatisiert untergliedert und Interaktionen zwischen Menschen und Umgebung analysiert werden. Zur Analyse können Verfahren der Inversen Dynamik zur Berechnung von Kräften und Momenten sowie weitere Analysen wie z. B. RULA, EAWS, Gelenkwinkel-, Sichtanalysen genutzt werden.

Die CUELA-Methode ermöglicht die Untersuchung und Bewertung einzelner Situationen, umfangreicher Tätigkeiten oder Schichten bzgl. Risikofaktoren auf der Basis kontinuierlicher und präziser Messungen (DGUV 2020). Je nach Umfang der Fragestellung werden unterschiedlich komplexe Messsysteme (Kategorie 1–3) eingesetzt (Holtermann et al. 2017). Zur Bewegungserfassung werden i. d. R. inertielle Bewegungssensoren (IMUs) verwendet. Weitere Messmethoden zur Quantifizierung von Muskelaktivität, Herzfrequenz, Kraft oder Vibration ergänzen die Untersuchungen. Zur Dokumentation und Unterstützung der Analyse dienen zeitsynchrone Videoaufzeichnungen. Die Messdaten werden in der CUELA-Software WIDAAN verarbeitet und visualisiert. Die biomechanischen und physiologischen Belastungsparameter werden

auf verschiedenen Berechnungsebenen berechnet, bewertet und dargestellt. Dazu gehören beispielsweise Gelenkwinkelverläufe, Perzentile der Winkelgeschwindigkeitsverteilung und Dosis der Gelenkmomente.

3. Vorgehensweise und Use Case zur kombinierten Arbeitsprozessanalyse

In Abb. 1 ist eine Vorgehensweise zur kombinierten Analyse und Gestaltung von Arbeitsprozessen auf Basis von MoCap-Daten und Bewegungssimulationen unter Anwendung der Softwaretools emaWD, Dynamicus und WIDAAN dargestellt. Diese wird anhand einer Laborstudie am Beispiel einer Logistiktätigkeit demonstriert, bei der eine Kiste in verschiedene Regalhöhen (450 mm, 1750 mm, 2085 mm) gehoben und anschließend per Wagen transportiert wird. Das Gewicht der Kiste wurde im Rahmen mehrerer Wiederholungen von 0,3 kg (Kiste A) auf 7,8 kg (Kiste B) und 15,3 kg (Kiste C) erhöht. Darüber hinaus bietet jedes System auch die Möglichkeiten, weitere Datenquellen zu verarbeiten und Auswertungen zur Verfügung zu stellen.

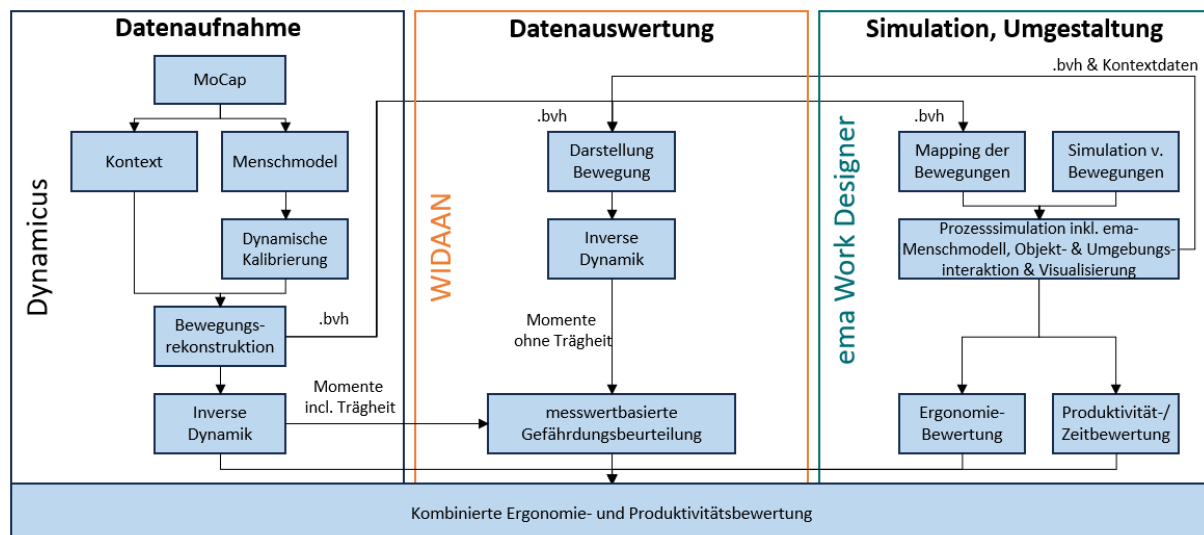


Abbildung 1: Vorgehensmodell zur kombinierten Anwendung Dynamicus, WIDAAN, emaWD

Im Schritt 1 erfolgt die Bewegungserfassung mittels eines MoCap-Systems (hier: ART). Die Daten werden parallel im Dynamicus aufgezeichnet und weiterverarbeitet. Dabei erfolgt eine Kalibrierung des Modells zur Bestimmung der Rotationszentren der Gelenke und eine Bewegungsrekonstruktion der Sensordaten mit einer modellierten Wirbelsäule sowie einem mit drei Rumpfsegmenten. Die aufgenommenen Bewegungsdaten werden im Standardformat *BVH an die Systeme CULEA/WIDAAN und emaWD weitergegeben. Zwangskräfte und -momente inkl. Trägheit werden mittels inverser Dynamik auf Basis der aufgezeichneten Bewegung, Masse, Trägheit und Schwerpunkt der Kisten im Dynamicus berechnet und WIDAAN bereitgestellt.

Im emaWD werden die importierten MoCap-Daten (*bvh) mit den drei Rumpfsegmenten unter Hinzunahme von Kontextinformationen segmentiert und auf das ema Menschmodell gemappt (Spitzhörn et al. 2022a). Hierzu wurde das Menschmodell ema bzgl. der anthropometrischen Maße des aufgenommenen Probanden angepasst. Zusätzlich wird die Umgebung inkl. Interaktion mit Objekten (z. B. Transportwagen, Kisten) erstellt und die MoCap-Daten auf Basis von ema-Verrichtungen mit den ge-

handhabten Objekten (Kisten, Transportwagen) verknüpft. Der Prozess wird anschließend zeitlich sowie ergonomisch (hier mittels EAWS zur Risikoermittlung bzgl. muskuloskelettaler Erkrankungen) ausgewertet.

In CUELA/WIDAAN wurden die Bewegungsdaten mit modellierter Wirbelsäule weiterverarbeitet und die wirkenden Schultergelenkmomente in einem invers-dynamischen Ansatz quasi-statisch berechnet, wobei die Masse der Kiste, wie in Dynamicus, gleichverteilt zwischen den beiden Händen angenommen wurde.

Die Ergebnisse werden zu kombinierten Ergonomie- und Produktivitätsbewertung zusammengefasst, daraus Präventionsmaßnahmen abgeleitet und diese bewertet.

4. Ergebnisse

Im Ergebnis der Datenaufnahme steht der IST-Prozess der Kistenhandhabung in allen drei Systemen emaWD, Dynamicus und WIDAAN (vgl. Abb. 2) zur Verfügung.

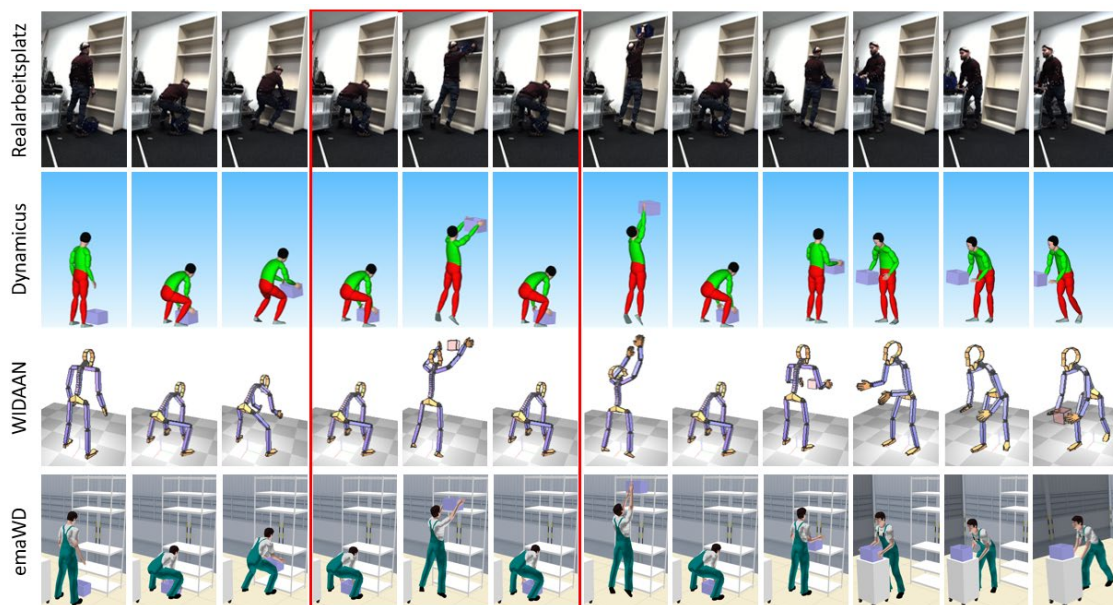


Abbildung 2: Auszug der Motion Capturing-Aufnahme des Use Cases und dessen Abbildung in den verschiedenen Systemen Dynamicus, WIDAAN, emaWD mit deren Menschmodellen

Im emaWD wurde eine zeitliche und ergonomische Auswertung der Einzel- und Gesamtsituation während einer Schicht durchgeführt. Es fällt auf, dass die Handhabung schwerer Lasten wesentlich mehr Zeit ($T(0,3 \text{ kg}) = 54,4\text{s}$; $T(7,8 \text{ kg}) = 57\text{s}$; $T(15,3\text{s}) = 70,1\text{s}$) benötigt. Bei einer Taktzeit von 75s für die jeweiligen Lastenhandhabungen ergibt sich nach EAWS 20,5 Pkt. bei Kiste A (0,3 kg), 127 Pkt. bei Kiste B (7,8 kg) und 143 Pkt. bei Kiste C (15,3 kg). Werden alle Kisten gleich verteilt für die Schichtbewertung einbezogen, beträgt die Ausführungszeit 184s mit einer EAWS-Bewertung von 135 Pkt. Nach EAWS besteht für Einzel- und Gesamttätigkeit (außer Kiste A) ein hohes Risiko für muskuloskelettaler Beschwerden (EAWS >50 Pkt.). Die Gelenkwinkelanalyse nach DIN EN 1005-4 in emaWD bestätigt dies.

Basierend auf den Ergebnissen wurde eine detaillierte Betrachtung des Hebevorgangs für Kiste C (vgl. roter Rahmen in Abb. 2) in WIDAAN und Dynamicus durchgeführt. Für die ausgewählte Bewegungsphase wurde u. a. ein Belastungseingpass an

der Schulter identifiziert und mittels Muskelkraftausnutzungsgrad (MUR, Intensität der Schulterbelastung) ausgewertet (Heinrich et al. 2023). Der MUR beim Hoch- und Herunterheben der 15,3 kg Kiste in bzw. aus Regalhöhe 1750 mm ist in Abb. 3 dargestellt. Beim Hochheben liegen die MUR bzgl. den in WIDAAN und den in Dynamicus ermittelten Schultergelenkmomenten (MUR_W, MUR_D) im P50-Wert bei 50,2 % bzw. 58,7 %. Die Belastungsspitzen (P95-Werte) liegen bei 75,8 % bzw. 81,8 %. Beim Herunterheben liegen die P50-Werte bei 29,9 % bzw. 34,6 %, die P95-Werte bei 61,8 % bzw. 71,5 %. Auf dieser Grundlage kann die situative Spitzenbelastung der Schultergelenke beim Hochheben als sehr schwer (rot) und beim Herunterheben als schwer (orange) bewertet werden.

Mittels kombinierter Betrachtung in emaWD, Dynamicus und WIDAAN wurden zwei Präventionsmaßnahmen (M1, M2) erarbeitet und bewertet. M1 wurde in emaWD simuliert und dazu das Regal umgestaltet und neue Arbeitshöhen (920 mm, 1350 mm statt 1750 mm und 2085 mm) bewertet. Damit ist die Kistenhandhabung für ein breites Kollektiv von kleiner Frau (F05) bis großen Mann (M95) durchführbar. Wie die Ergebnisse für die Lastenhandhabung Kiste C (15,3 kg) zeigen, reduziert sich die Ausführungszeit nach MTM-UAS (M1 55,7s) um 21 % und die EAWS-Punkte von 143 Pkt. auf 89,5 Pkt. Trotz dieser Verbesserung ist es weiterhin ein roter Arbeitsplatz mit hohem Risiko. Als M2 wurde ein Einsatz eines schulterunterstützenden Exoskeletts (Ottobock Shoulder) mit stärkster Unterstützungsstufe in CUELA/WIDAAN simuliert. Die durch das Exoskelett erzeugte Reduktion des MUR (MUR_eW; MUR_eD) beträgt $\bar{\Delta} 6,7 \pm 3,8 \%$ beim Hochheben und $\bar{\Delta} 6,7 \pm 3,5 \%$ beim Herunterheben (vgl. Abb. 3).

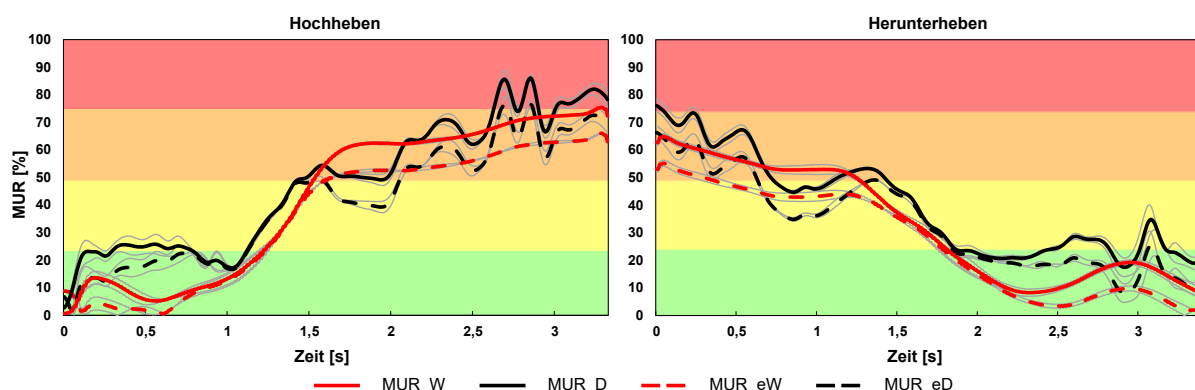


Abbildung 3: Verlauf des MUR beim Hochheben und Herunterheben einer etwa 15 kg schweren Kiste aus 1750 mm Höhe. Grau: jeweilige MUR-Verläufe für das rechte und linke Schultergelenk; situative Bewertung via Bewertungsskala nach Heinrich et al. (2023)

4. Diskussion und weitere Schritte

Die hier vorgestellte kombinierte Anwendung ermöglicht es detailliert Belastungssituationen aufzuzeichnen, zu simulieren, zu bewerten und Verbesserungen zu gestalten. Dabei werden die Stärken der drei Softwaretools emaWD, CUELA/WIDAAN und Dynamicus kombiniert. Während Dynamicus im Bereich der Sensordatenaufzeichnung eingesetzt wird, liegen die Stärken von CUELA/WIDAAN zusätzlich im Bereich der Interpretation messwertbasierter Gefährdungsbeurteilung. Die Kurvenverläufe in Abb. 3 verdeutlichen jedoch auch, dass CUELA/WIDAAN Kräfte und Momente in Gelenken unter quasi-statischen Bedingungen berechnet und keine Trägheitseigenschaf-

ten von Menschen oder Objekten berücksichtigt, wie das in Dynamicus gemacht wird (mittlere absolute Abweichung MUR: $8,6 \pm 5,2$ % (Hochheben); $3,4 \pm 4,2$ % (Herunterheben)). Die quasi-statistische Berechnung weist in den meisten Fällen jedoch eine ausreichende Genauigkeit auf. Im emaWD kann wiederum der Ist-Prozesses mit in der Industrie etablierter Ergonomie- und Zeitbewertungsverfahren wie EAWS und MTM-UAS, die eine einfachere Interpretation ermöglichen. Dafür ist der Detailgrad im Vergleich zu Auswertungen des Dynamicus und CUELA/WIDAN geringer. Weiterhin ermöglicht ema WD die Simulationen, Bewertung und Diskussion verschiedener Alternativszenarien des aktuellen sowie des geplanten Prozesses ohne physischen Aufbau. So können unterschiedliche Arbeitsplatzkonfigurationen für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen (kleine Frau bis großer Mann) vorab und auch direkt in VR (emaVR) untersucht werden, wie die Untersuchung der Ausführbarkeit für Maßnahme M1 zeigt. Alle drei Systeme sind kombiniert einsetzbar und können je nach Anwendungsfall ausgewählt werden. Dabei erfolgt der Austausch zwischen den Systemen durch standardisierte Schnittstellen.

Im nächsten Schritt sind die Schnittstellen zwischen den Systemen weiter auszubauen. Zukünftig könnten die Modelleigenschaften des emaWD oder des CUELA/WIDAAN schon im Dynamicus bereitgestellt werden, sodass die aufgezeichneten Sensordaten direkt auf die gewünschten Modelle rekonstruiert werden. Auch eine Erweiterung des Datenaustausches auf die Bewegungen der Umgebungselemente und Zusatzinformationen zu Prozessbausteinen (Start- und Endzeit, Massen und Kräfte etc.) zwischen allen Softwaresystemen wäre hilfreich. Unter diesen Voraussetzungen könnten die Synergien erweitert werden und detaillierte Auswertungen wären mit geringerem Aufwand möglich.

5. Literatur

- DGUV (2020) DGUV Report 3/2020, MEGAPHYS. Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Berlin: DGUV, 1-984.
- Heinrich K, Weber B, Schellewald V, Hermanns I, Ellegast R (2023) Messwertbasierte Gefährdungsbeurteilung von Schulterbelastungen. In: DGUV (Hrsg.) DGUV Report 1/2023, 8. DGUV Fachgespräch Ergonomie 2023. Berlin: DGUV, 136-144.
- Holtermann A, Schellewald V, Mathiassen SE, Gupta N, Pinder A (2017). A. practical guidance for assessments of sedentary behavior at work: A PEROSH initiative. *Applied Ergonomics* 63: 41-52.
- Holzgreve F, Schulte L, Oremek G (2023). Allgemeine und arbeitsplatzbezogene Risikofaktoren von Muskel-Skelett-Erkrankungen und deren Bestimmungsmethoden. *Zbl Arbeitsmed* 73, 182–189
- Kaiser A, Hofmann N, Hermsdorf H. (2022) Das Menschmodell Dynamicus in der Arbeitswelt. *Zeitschrift für medizinische Prävention*. DOI: 10.17147/asu-1-240861
- Paul GE (2021) Modeling and Simulation of Human Systems. In: Salvendy G, Karwowski W (Hrsg.) *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. Fifth edition. John Wiley & Sons, New Jersey
- Spitzhirm M, Benter M, Heindl C, Heindl C, Scheder N, Strohmeier F, Behrendt W (2022a) Hybrid work systems – platform-based work planning – designing productive and human-centered work processes. *Z. Arb. Wiss.* 76, 489–509. <https://doi.org/10.1007/s41449-022-00342-6>
- Spitzhirm M, Ullmann S, Fritzsche L (2022b) Considering individual abilities and age-related changes in digital production planning – human centred design of industrial work tasks with ema software. pp. 459-477. *Z. Arb. Wiss.* 76. <https://doi.org/10.1007/s41449-022-00343-5>
- Spitzhirm M, Gärtner C, Ullmann S, Fritzsche L (2023) Considering Individual Abilities and Age-Related Changes in Digital Production Planning Using Digital Human Models. In: S. Scataglini et al. (Eds.): DHM 2023, LNNS 744, pp. 1–10, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37848-5_28



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration
und ihre Auswirkung auf Mensch,
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

GfA-Press

Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

office@internetkundenservice.de, www.internetkundenservice.de