

## **Adaptive Positionierung großer Arbeitsobjekte in der industriellen Montage zur Reduktion von physischen Belastungen**

Maximilian PÄTZOLD

*Institut für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Darmstadt,  
Otto-Berndt Straße 2, D-64287 Darmstadt*

**Kurzfassung:** Das Institut für Arbeitswissenschaft entwickelt am Beispiel der Automobiltürmontage eine adaptive Arbeitsstation zur automatisierten Positionierung großer Arbeitsobjekte, um deren Auswirkung auf Belastung, Beanspruchung und Prozesseffizienz zu untersuchen. Für die Gestaltung des Adaptionprozesses sind die Einflüsse von Häufigkeit, Genauigkeit und des Zeitpunktes der einzelnen Adaptionsschritte mit einzubeziehen. Zur reaktiven Regelung in Echtzeit bzw. präventiven Steuerung des Systems durch die Adaptionlogik muss eine geeignete Datengrundlage geschaffen werden. Die positive Wirkung einer Repositionierung auf die Expositionszeit in kritischen Flexions- bzw. Extensionswinkeln in Schulter und Nacken wurde in einer Proof of Concept Studie nachgewiesen.

**Schlüsselwörter:** Adaptivität, Montagearbeitsplatz, Individualisierung, Belastungsreduktion, adaptive Produktionssysteme

### **1. Einleitung**

Menschliche Arbeit wird auch in Zukunft ein wichtiger Bestandteil für die Produktion von Kleinserien oder Bauteilen mit vielen Produktvarianten bleiben, denn der Mensch bleibt der Maschine besonders durch seine Flexibilität, Kreativität und Problemlösefähigkeit überlegen (Beuß et al. 2020; Kim et al. 2019). Der menschenzentrierten Produktion als Treiber von flexiblen, agilen und wettbewerbsfähigen Fabriken der Zukunft stehen dagegen wachsende soziale Herausforderungen gegenüber (Romero et al. 2015).

Neben der effizienten Nutzung von Betriebsmitteln und Werkstoffen gilt es im Angesicht des demografischen Wandels, die menschlichen Ressourcen durch belastungs- und beanspruchungsgerechte Gestaltung des Arbeitsplatzes zu erhalten und muskuloskelettalen Beschwerden bzw. Erkrankungen vorzubeugen (Reinhart et al. 2010a). Dennoch wird prognostiziert, dass die Zahl leistungsgewandelter Arbeitspersonen in Zukunft zunehmen wird (Reinhart et al. 2010b). Hohe physische Belastungen am Arbeitsplatz aufgrund von Körperzwangshaltungen stellen insbesondere ein Risiko für die Gesundheit der Arbeitspersonen in der manuellen Montage dar. Krankheiten im Zusammenhang mit dem Muskel-Skelett-System sowie des Bindegewebes sind für etwa 22,5 % aller Arbeitsunfähigkeitstage in Deutschland verantwortlich (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2017).

Um Produktivität, Gesundheit und Zufriedenheit zu erhalten, sollten sich manuelle Arbeitsplätze stärker an die individuellen Bedürfnisse der Beschäftigten anpassen können (Bruder 2010; Fletcher 2020). Dadurch können verbliebene Potenziale zur

Reduktion von Belastungen am Arbeitsplatz ausgeschöpft werden. Die Individualisierung des Arbeitsplatzes bietet die Möglichkeit, eine auf die Person abgestimmte Unterstützung anzubieten, anstatt einen klassischen Gestaltungsansatz zu verfolgen, der darauf abzielt, den Arbeitsplatz einer möglichst großen Population innerhalb der Belegschaft zur Verfügung zu stellen. Die Automatisierung und Digitalisierung der modernen Produktion eröffnet hierbei neue Forschungsfelder in der Individualisierung von Arbeitsplätzen (Schlund et al. 2018).

Die Möglichkeit der individuellen Positionierung des Arbeitsobjektes oder der Arbeitsfläche, hat das Potenzial, Körperzwangshaltungen an Montagelinien zu vermeiden und das Risiko für muskuloskelettale Erkrankungen zu reduzieren. In der Praxis ist jedoch zu beobachten, dass die Möglichkeit, seinen Arbeitsplatz ergonomisch anzupassen, nicht immer wahrgenommen wird, um z. B. Nebenzeiten zu sparen, die aus der Durchführung von Individualisierungsprozessen entstehen (Jagusch et al. 2018). Weiterhin besteht das Risiko, dass der Arbeitsplatz falsch eingerichtet wird.

Diese Problematik kann mithilfe von adaptiven Systemen vermieden werden, welche eine automatisierte und datenbasierte Positionierung des Arbeitsobjektes, der Arbeitsfläche oder Materialbereitstellung nach objektiven Kriterien vornehmen. Die Einstellung entlang der gewählten (rotatorisch bzw. translatorisch) Freiheitsgrade wird automatisiert durch die Software des adaptiven Systems, bspw. mittels elektrischer bzw. elektrisch-pneumatischer Aktorik, durchgeführt.

Allerdings fehlen Aussagen und Erfahrungen zu den Effekten individualisierbarer Arbeitsplatzgestaltung und deren wirtschaftlicher Umsetzung und Nutzung (Schlund et al. 2018). Verfügbare adaptive Montageassistenzsysteme sind weiterhin meist für kleinere Bauteile ausgelegt (Jagusch et al. 2018). In der Regel handelt es sich hierbei um einen Steharbeitsplatz mit adaptiver Höhenverstellung der Arbeitsplatte oder beweglicher Materialbereitstellungsebene. Die Auswirkungen solcher Systeme wurden für kleine Bauteile bereits in Studien untersucht (Rönick 2020; Reinhart et al. 2010a; Peruzzini & Pellicciari 2017; Busch et al. 2017; Bortolini et al. 2021; Turk et al. 2022). Die adaptive Positionierung führt hier in der Regel zu einer Steigerung der Produktivität. Entweder weil eine einzige optimierte Einstellung der Arbeitshöhe existiert, welche initial während der Arbeitsvorbereitung eingestellt werden kann, oder weil die Montage während des Adaptionprozesses nicht unterbrochen werden muss.

Für die adaptive Positionierung von großen Arbeitsobjekten sind in der Literatur dagegen nur Konzepte bekannt (Schlund et al. 2018; Papetti et al. 2022; Beuß et al. 2020; Jagusch et al. 2018). Das Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt entwickelt und implementiert im Rahmen des EU-Forschungsprojektes FELICE ein Konzept für eine adaptive Arbeitsstation für die manuelle Montage großer Arbeitsobjekte am Beispiel der Automobiltürmontage. Ziel ist die Ableitung von Gestaltungsprinzipien für die adaptive Positionierung von großen Arbeitsobjekten sowie die Untersuchung des Einflusses der adaptiven Positionierung an taktgebundenen Montagelinien auf die Prozesseffizienz sowie die Belastung und Beanspruchung der Arbeitsperson.

## 2. Problemstellung

Für große Arbeitsobjekte ist insbesondere zu diskutieren, wie häufig und wie genau Adaption- bzw. Individualisierungsprozesse ausgelöst werden sollten und zu welchem Zeitpunkt im Zyklus diese ausgeführt werden. Weiterhin ist die Auswahl und

Generierung von Daten als Entscheidungsgrundlage für die zugrundeliegende Adaptionlogik des Systems zu untersuchen, anhand welcher die Software Adaptionsprozesse plant und durchführt.

### *2.1 Auswirkungen von Häufigkeit und Genauigkeit der Adaptionsprozesse*

Gängige Empfehlungen für die anthropometrische und biomechanische Arbeitsplatzgestaltung stoßen für große Arbeitsobjekte an ihre Grenzen. In der Automobilmontage gibt es für große Arbeitsobjekte wie Autotüren keine feste Positionseinstellung, in der sich alle Arbeitspunkte des Objekts in einem ergonomischen Arbeitsraum befinden. Insgesamt sind bei der Automobiltürmontage je nach Modell ca. 40 Arbeitspunkte über Innen-, Außen- und Seitenfläche verteilt. Abhängig von der Körpergröße der Arbeitsperson müssen teils Körperzwangshaltungen eingenommen werden, um Vorrichtungen am Arbeitsobjekt vorzunehmen. Die optimale Arbeitshöhe von Steharbeitsplätzen hängt nach DIN EN ISO 14738 von den Körpermaßen sowie den Genauigkeitsanforderungen des Arbeitsschrittes ab. Es folgt, dass für große Arbeitsobjekte mehrere Repositionierungen in Abhängigkeit von Bauteilgestalt, Körpermaßen der Arbeitsperson und Arbeitsschritt nötig sein können, um Körperzwangshaltungen über die gesamte Zyklusdauer zu reduzieren.

Theoretisch kann analog zu Jagusch et al. (2018) je Arbeitsschritt eine adaptive Repositionierung des Arbeitsobjektes mit dem Ziel, die resultierende Belastung zu minimieren, durchgeführt werden. Ein Zielkonflikt entsteht allerdings dann, wenn die Fortführung des Montageprozesses während der Repositionierung, bspw. aufgrund von Sicherheits- oder Qualitätsbedenken, nicht möglich ist. Werden Adaptionsprozesse außerhalb nicht-wertschöpfender Tätigkeiten durchgeführt, führen diese zu höheren Nebenzeiten. In diesem Fall muss der in der taktgebundenen Produktion entstehende Produktivitätsverlust gegenüber der erzielten Belastungsreduktion abgewogen werden. Der Adaptionsprozess sollte so gestaltet werden, dass möglichst viele Arbeitspunkte pro Positionierungsvorgang in ergonomische Arbeitsräume verlagert und die bestehenden nichtproduktiven Zeitfenster bestmöglich zur Adaption genutzt werden.

### *2.2 Auswirkungen reaktiver oder präventiver Adaptionslogiken*

Eine weitere Herausforderung bei der Gestaltung des Adaptionsprozesses spielt die Generierung und Auswahl von Daten, die vom System als Entscheidungsgrundlage für eine Anpassung genutzt werden können. Entscheidend hierfür ist, ob durch das adaptive System ein präventiver oder reaktiver Interventionsansatz verfolgt werden soll.

Eine reaktive Adaptionslogik hat zum Ziel, eine auf Echtzeitdaten basierende Anpassung der Systemkonfiguration vorzunehmen. Motion-Capture Systeme oder Kamerasysteme können zur Echtzeitmessung der Arbeitshaltungen als Maß der physischen Belastung verwendet werden und diese Daten an die Software des adaptiven Systems übermitteln. Nguyen et al. (2016) und Kim et al. (2019) bspw. Beschreiben eine kamerabasierte Körperhaltungsanalyse zur Erfassung der Arbeitshaltung und die Ableitung einer optimierten, ergonomischen Position des Arbeitsobjektes.

Nachteile einer reaktiven Adaptionlogik sind zum einen die dynamischen, nicht planbaren Einflüsse auf die Prozesszeit, die Reaktion des Systems auf bereits wirkende Belastungen sowie eine mit der Adaption verbundene Störung des Arbeitsablaufs während der Montage.

Eine präventive Adaptionlogik hat dagegen zum Ziel, eine Anpassung vor der Belastungsexposition durchzuführen. Hierzu wäre es denkbar, anhand der gemessenen Körpergelenksdaten optimierte Positionen des Arbeitsobjektes im Montagezyklus abzuleiten und auf zukünftige Arbeitszyklen anzuwenden. Eine andere Möglichkeit ist die Erstellung verschiedener Adaptionpläne auf Basis einer klassischen Arbeitsanalyse oder einer Simulation des Montageprozesses in Abhängigkeit der Anthropometrie der beobachteten Zielpopulation. In diesem Fall kann die Software eine geeignete vordefinierte Interventionsstrategie in Abhängigkeit von bspw. Körpergröße und individuellem Unterstützungsbedarf der Arbeitsperson auswählen.

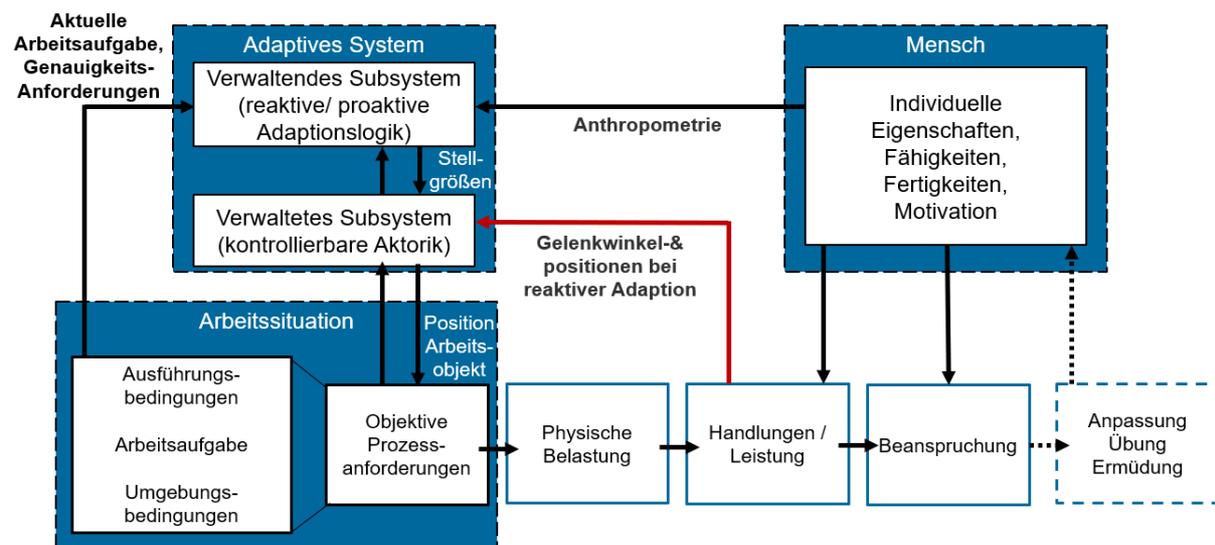
### 3. Arbeitsmodell und Forschungsfragen

Abgeleitet von der Problemstellung stellen sich folgende Forschungsfragen, welche am Beispiel der Automobiltürmontage diskutiert werden sollen:

1. Was sind die wesentlichen Gestaltungsprinzipien einer proaktiven bzw. reaktiven Adaptionlogik für die physische Adaption großer Arbeitsobjekte (Häufigkeit, Zeitpunkt, Genauigkeit der Adaptionsschritte)?
2. Wie wirkt sich eine proaktive und reaktive Adaptionlogik in Abhängigkeit des gewählten Adaptionsgrades auf die physische Belastung und Beanspruchung der Arbeitsperson sowie die Prozesseffizienz aus?

Abbildung 1 zeigt das Arbeitsmodell zur Untersuchung der Fragestellungen, welches die Wirkstellen des adaptiven Systems in das erweiterte Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) beschreibt. Der Aufbau des adaptiven Systems ist angelehnt an den Aufbau eines adaptiven Softwaresystems nach Weyns (2019) und umfasst ein verwaltendes Subsystem mit einer reaktiven oder präventiven Adaptionlogik, sowie die Aktorik. Abhängig der gewählten Adaptionlogik regelt bzw. steuert das adaptive System die Adaptionprozesse in Abhängigkeit von Arbeitsaufgabe, Genauigkeitsanforderungen und Anthropometrie des Menschen. Die reaktive Regelung erfolgt alternativ durch Rückführung der Körpergelenkwinkel und -positionen.

Die adaptive Positionierung großer Arbeitsobjekte hat zum Ziel, auf die objektiven Anforderungen der Arbeitsaufgabe einzuwirken und durch die bessere resultierende Belastungssituation die physische Beanspruchung zu verringern. Eine erste quantitative Proof of Concept Studie (n = 17) an einem Mock-up der adaptiven Arbeitsstation wurde mithilfe des Captiv Motion-Capture Systems durchgeführt. Bei der simulierten Türmontage traten bereits für eine einzelne Repositionierung eine statistisch signifikante Reduktion der Expositionszeit in kritischen Flexions- und Extensionswinkelbereichen von Schulter- und Nacken gemessen (Eggert 2022).



**Abbildung 1:** Arbeitsmodell angelehnt an das erweiterte Belastungs- Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) und dem Aufbau adaptiver Systeme nach Weys (2019)

#### 4. Fazit und Ausblick

Adaptive Montagesysteme sollen eine automatisierte Positionierung des Arbeitsobjektes zur Vermeidung von Körperzwangshaltungen am Arbeitsplatz ermöglichen und ungenutzte Potenziale bei der Reduktion physischer Belastungen ausschöpfen. Es fehlen Erkenntnisse, wie sich die adaptive Positionierung großer Arbeitsobjekte effizient in taktgesteuerte Montagelinien integrieren lässt. Herausforderungen bei der Gestaltung von adaptiven Systemen und eine mögliche Umsetzung nach einem reaktiven und präventiven Interventionsansatz wurden diskutiert. Insbesondere ist zu untersuchen, wie sich eine adaptive Positionierung auf die physische Belastung und Beanspruchung auswirkt.

In einer ersten Proof of Concept Studie wurde gezeigt, dass die adaptive Positionierung die Expositionszeit in kritischen Körpergelenkwinkeln reduzieren kann. Die Auswirkungen des entwickelten Adaptionprozesses auf die Prozesszeit und Körperhaltung der Arbeitsperson, als Maß der physischen Belastung, soll für verschiedene Nutzergruppen im Rahmen einer Simulationsstudie untersucht werden. Die gewonnenen Ergebnisse aus Simulation und Labor bilden die Grundlage für zukünftige Studien unter realen Arbeitsbedingungen an der entwickelten adaptiven Arbeitsstation.

#### 5. Literatur

- Beuß F, Jagusch K, Sender J, Flügge W, Coyen S (2020). Selbstlernende Arbeitsplatzsysteme für die Montage. In Fraunhofer-Gesellschaft PUBLICA (Bd. 25, issue 3, S. 21–24). Fraunhofer IGP.
- Bruder R: Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. Dortmund: GfA-Press 2010, S. 29–32.
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (2017). Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, Berichtsjahr 2017 (Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Hrsg.).
- Bortolini M, Faccio M, Galizia FG, Gamberi M, Pilati F (2021). Adaptive Automation Assembly Systems in the Industry 4.0 Era: A Reference Framework and Full-Scale Prototype. Applied Sciences, 11 (3), 1256. <https://doi.org/10.3390/app11031256>

- Busch B, Maeda G, Mollard Y, Demangeat M, Lopes M (2017). Postural optimization for an ergonomic human-robot interaction. In 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2017.8206107>
- Eggert H (2022). Implementation and Evaluation der ergonomischen und nutzeradaptiven Positionierung von Werkstücken an einer adaptiven Arbeitsstation. TU Darmstadt
- Fletcher SR, Johnson T, Adlon T, Larreina J, Casla P, Parigot L, Alfaro P J, Otero M del M (2020). Adaptive automation assembly: Identifying system requirements for technical efficiency and worker satisfaction. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105772. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.036>
- Jagusch K, Beuß F, Sender J, Flügge W (2018). Intelligente Montageassistenz. In *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (Bd. 113, Issue 6, S. 369–372). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.3139/104.111923>
- Kim W, Lorenzini M, Balatti P, Nguyen PDH, Pattacini U, Tikhanoff V, Peternel L, Fantacci C, Natale L, Metta G, Ajoudani A (2019). Adaptable Workstations for Human-Robot Collaboration: A Reconfigurable Framework for Improving Worker Ergonomics and Productivity. In *IEEE Robotics & Automation Magazine* (Bd. 26, Issue 3, S. 14–26). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/mra.2018.2890460>
- Nguyen TD, Bloch C, Krüger J (2016). The Working Posture Controller: Automated Adaptation of the Work Piece Pose to Enable a Natural Working Posture. In *Procedia CIRP* (Bd. 44, S. 14–19). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.172>
- Papetti A, Ciccarelli M, Scoccia C, Germani M (2022). Optimizing the operator posture by a smart workplace design. *Procedia Computer Science*, 204, 532–539.
- Peruzzini M, Pellicciari M (2017). A framework to design a human-centred adaptive manufacturing system for aging workers. In *Advanced Engineering Informatics* (Bd. 33, S. 330–349). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.02.003>
- Reinhart G, Spillner R, Egbers J, Schilp J (2010): Individualisierung von Montagearbeitsplätzen, *Werkstattstechnik online* 100 (H. 9), S. 665 ff.
- Reinhart G, Egbers J, Schilp J, Rimpau C: Demographiegerechte und doch wirtschaftliche Montageplanung. *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) Nr. 1/2, S. 9–14. Internet: [www.werkstattstechnik.de](http://www.werkstattstechnik.de). Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- Rohmert W (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In: *ZfA*, 38 (4), S. 193–200
- Romero D, Noran O, Stahre J, Bernus P, Fast-Berglund Å (2015). Towards a Human-Centred Reference Architecture for Next Generation Balanced Automation Systems: Human-Automation Symbiosis. In *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth* (S. 556–566). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_64)
- Rönick K (2020). Analyse des Einflusses unterschiedlicher Individualisierungsgrade eines Montagearbeitsplatzes. <https://doi.org/10.25534/TUPRINTS-00011497>
- Schlund S, Mayrhofer W, Rupprecht P (2018). Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen. In *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* (Bd. 72, Issue 4, S. 276–286). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s41449-018-0128-5>
- Turk M, Simic M, Pipan M, Herakovic, N. (2022). Multi-Criterial Algorithm for the Efficient and Ergonomic Manual Assembly Process. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (6).
- Weyns D (2019). Software Engineering of Self-adaptive Systems. In: Cha S, Taylor RN, Kang K (Hrsg.), *Handbook of Software Engineering*

**Danksagung:** Diese Forschungsarbeit wurde mit Mitteln aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union unter der Finanzierungsnummer 101017151 gefördert und spiegelt lediglich die Meinung des Autors wider.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

## Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher  
und nachhaltiger Arbeitssysteme  
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

---

## GfA-Press

---

**Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023**

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und  
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.  
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023  
ISBN 978-3-936804-32-4

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](mailto:info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de) · [www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](http://www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de)

### **Screen design und Umsetzung**

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de) · [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)