

Untersuchungen zur Bewegungsvarianz bei der Ausführung von Arbeitsprozessen und deren Integration in das Menschmodell ema

Michael SPITZHORN, Sascha ULLMANN

*imk automotive GmbH
Amselgrund 30, D-09128 Chemnitz*

Kurzfassung: Die Bewegungsvarianz ist ein wichtiger Bestandteil der menschlichen Bewegung, wird jedoch bei der Planung von Arbeitsplätzen und -prozessen meist nicht berücksichtigt. Eine fehlende Einbeziehung kann zu ineffizienten Arbeitsausführungen und erhöhten Verletzungsrisiko führen. So sind bei der Planung von Mensch-Roboter-Interaktionen mögliche Bewegungsvarianzen zur Absicherung des Prozesses einzubeziehen. Digitale Planungstools wie der Editor menschlicher Arbeit (ema) ermöglichen eine Abbildung möglicher Varianzen. Um adäquate Daten zur Integration zu erhalten, wurde eine Studie zur Bewegungsvarianz durchgeführt.

Schlüsselwörter: Bewegungsvarianz, Digitale Menschmodelle, ema

1. Notwendigkeit zur Erzeugung von Bewegungsvarianz

Die Bewegungsvarianz ist ein wichtiger Bestandteil der menschlichen Bewegung (Savin et al. 2017). Eine zielgerichtete Bewegungsvarianz kann den Körper vor Überbeanspruchung und Verletzungen schützen (Savin et al. 2017). Auch in Hinblick auf aktuelle technische Neuerungen (z.B. Mensch-Roboter-Kollaboration) kann eine Vorhersage menschlicher Bewegungen und Bewegungsräume eine prospektive Absicherung ergonomisch günstiger und effizienter Arbeitsplätze unterstützen.

Mit Hilfe von Planungstools wie dem Editor Menschlicher Arbeit („ema“) können bereits im Planungsprozess Arbeitsprozesse simuliert und nach ergonomischen sowie zeitwirtschaftlichen Aspekten bewertet und gestaltet werden (Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt 2016). Die notwendigen Bewegungen für die Ausübung des Arbeitsprozesses werden mittels ema-Verrichtungsbibliothek auf Basis parametrisierter Tätigkeitsbeschreibungen modelliert. Alternativ können menschliche Bewegungen mittels importierter Motion Capturing Daten in die Simulation übertragen werden.

Beim Planen eines Prozesses wird im Normalfall ein Standard für eine Bewegungsausführung festgelegt, welcher im ema auf vielfältige Art angepasst werden kann. Über die Verteilung der Bewegungsvariationen während eines Prozesses fehlt jedoch das Wissen. Für die Erhebung der wissenschaftlichen Grundlage für die Integration von Bewegungsvarianzen in die ema-Bewegungserzeugung wird eine Laborstudie zur Bewegungsvarianz bei typischen Produktionsabläufen erhoben.

2. Aktuelle Einstellmöglichkeiten zur Bewegungsvarianz im ema

Auf Basis eines Bewegungsgenerators wird im ema anhand einer Interpolation von erzeugten Posen eine automatische Bewegung erzeugt, welche durch verschiedene Einflussgrößen variiert werden kann (Bauer 2016). Anhand der Verrichtungen

Aufnehmen, Platzieren und Gehen wird auf einzelne Möglichkeiten zur Erzeugung von Bewegungsvarianz eingegangen. Eine örtliche Veränderung des Menschmodells kann im ema manuell mittels Laufpfad, semiautomatisch (zum Ziel, zum Objekt) oder mittels der Funktionalität „automatisches Laufen“ generiert werden. Aufnahme- und Platziervorgänge lassen sich mittels der Vorrichtungen „Objekt aufnehmen“ und „Objekt platzieren“ simulieren. Durch verschiedene einstellbare Parameter kann im ema Einfluss auf die Bewegungserzeugung bzgl. der Anfangs-/Endpose sowie der Art der Bewegungsausführung zwischen Start und Ende genommen werden. Die Bewegungserzeugung kann durch verrichtungsunabhängige Einstellungen wie der Sicherheitsabstände zu Objekten oder die verwendete Kollisionsprüfung (einfache, erweiterte) wesentlich beeinflusst werden. Tabelle 1 listet die Einflussgrößen auf.

Tabelle 1: aktuelle Einflussgrößen auf Darstellung und Einstellung der Bewegungsvarianz im ema

Einfluss auf die Anfangs-/Endposition	Einfluss auf Bewegungsausführung
<ul style="list-style-type: none"> • Aktivierung Kollisionsvermeidung (einfache / erweiterte) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnehmen: Art der direkten Bewegung (Objekt von vorne, von hinten aufnehmen etc.)
<ul style="list-style-type: none"> • Aktivierung und Sicherheitsabstand beim automatischen Laufen 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnehmen: Objekte anheben (vertikales Anheben beim Aufnehmen)
<ul style="list-style-type: none"> • Position des Menschmodells (Abstand zum Objekt wie bspw. Tisch) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnehmen: Tragehaltung (keine Veränderung, Brust-, Bauch- Hüfthöhe etc.)
<ul style="list-style-type: none"> • Definition manueller Greifpunkte am zu greifenden / platzierenden Objekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Platzieren: Ziel- Versatz in [mm]
<ul style="list-style-type: none"> • Erzwingen einzelner Körperhaltungsparameter (z.B. erzwingen Verdrehung nach rechts) 	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter zur Prozessbeschreibung (Sollzeit; Aufnahmezeit / Greifbedingung nach MTM-UAS etc.)

3. Versuchsdesign zur Erhebung der Bewegungsvarianz

Zur Erhebung von Bewegungsvarianzen bei der Ausführung typischer Produktionsstätigkeiten wird eine Laborstudie nach dem dargestellten Strukturschema in Abb. 1 durchgeführt. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die Versuchsvorbereitung mit der Auswahl eines repräsentativen Samples. Die Ansprache der Probanden erfolgte über Flyer, soziale Netzwerke und E-Mailverteiler verschiedener Firmen. Eingeschlossen wurden gesunde Männer und Frauen im Alter von 18 bis 65 Jahren, ausgeschlossen wurden Personen mit krankheitsbedingten Einschränkungen oder Verletzungen im Bewegungsapparat (Arthrose, Knochenbrüche etc.) sowie weiteren Erkrankungen, die die körperliche oder geistige Leistungsfähigkeit beeinflussen können.

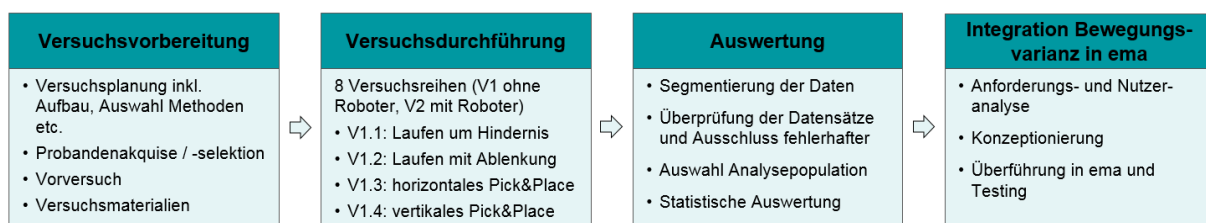


Abbildung 1: Strukturschema zur Erfassung der Bewegungsvarianz und deren Integration in ema

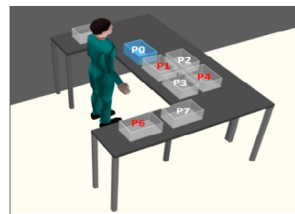
Insgesamt erfüllten 100 Probanden von 153 akquirierten Probanden die Einschlusskriterien. Davon sind aktuell 54 Personen (Testkollektiv) ausgewertet. Der Altersdurchschnitt des Teilkollektives beträgt 34 ± 16 Jahre. Der Studie besteht aus 8 Versuchsreihen, die je zur Hälfte ohne (V1) bzw. mit mittelbarer Interaktion eines industrieüblichen Schwerlast-Roboters (V2) vollzogen werden. Innerhalb der Versuchsreihen werden die jeweiligen variierten Bedingungen (mit / ohne Last, Entfernung 6 oder 3m) in randomisierter Reihenfolge jeweils 2 Mal wiederholt. In Abb. 2 ist der Aufbau der manuellen Versuche ohne Roboter (V1) dargestellt. Nachfolgend wird sich auf V1.1 und V1.3 konzentriert. Ziel von V1.1 ist die Ermittlung der Vorzugsrichtung, des Verlaufs und des Abstands beim Passieren eines Hindernisses. Hierbei wird nach dem ersten Durchgang (DG1) das Hindernis von der Grundposition um jeweils 100mm je DG entsprechend der Vorzugsrichtung aus dem 1. DG verschoben. V1.3 dient zur Erfassung der Bewegungsmuster während des Aufnehmens und Platzierens eines KLT (3147) nach und von 7 verschiedenen Positionen auf die Grundposition P0. Dabei wird jede Position 3 Mal randomisiert angesteuert.



V1.1 Laufen um Hindernis



V1.2 Laufen mit Ablenkung



V1.3 horizontales Pick & Place



V1.4 vertikales Pick&Place

Abbildung 2: Darstellung des Versuchsaufbaus der ausgewählten Versuchsreihen V1.1 bis V1.4

Zur Erfassung der Bewegungsdaten wird das Inertial-basierte 3D-Motion Capture System „Xsens“ verwendet. Dieses ermöglicht eine hinreichend genaue Erfassung der gesamten Körperbewegung ohne Begrenzung des Aufnahmebereiches (Gudehus 2009; Rettig 2012). Zur Verringerung des Drifts wird eine regelmäßige Kalibrierung während der Versuchsreihen durchgeführt. Die aufgenommenen Daten werden im BVH-Format abgespeichert und mittels der Software Blender geschnitten. Anschließend werden diese Daten auf eventuelle Konvertierungs- und Aufnahmefehler überprüft und in ema überführt. Auf Basis einer Batch-Datei werden die Größen für die Auswertung wie Armreichweite etc. ermittelt.

Zur Kodierung der eingenommenen Körperhaltungen während des Aufnehmens und Platzierens (V1.3, V1.4) wurde in Anlehnung an die Ergonomieverfahren EAWS, RULA, DIN 1005-4 ein Kodierungssystem erarbeitet. Zur statistischen Analyse wird SPSS Version 25 eingesetzt und je nach Skalenniveau der adäquate Test verwendet. Als Signifikanzniveau wird 0,05 angesetzt. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse aus V1.1 und V1.3 präsentiert.

4. Ergebnisse zur Bewegungsvarianz

4.1 Bewegungsvarianz beim Gehen

Beim Passieren des Hindernisses waren 4 Richtungsentscheidungen in Bezug zum Objekt in Abhängigkeit der Vorzugsrichtung (rechts, links) zu unterscheiden (vgl. Abb. 3). Diese lassen sich in Linienläufer, der jeweils die gleiche Strecke im Hin- und Rückweg wählt, und in Kreisläufer, welche unterschiedliche Wege hin und zurück

nutzen, einteilen. Die Vorzugsrichtung ergibt sich aus der im DG1 ermittelten Mehrzahl der Richtungsentscheidungen. 91% der Probanden im DG 1 liefen rechts am Hindernis vorbei. Bei Vorzugsrichtung rechts wird im DG1 in 81% der Fälle auf dem Hinweg und in 61% der Fälle auf dem Rückweg rechts das Objekt passiert. Mit zunehmender Verschiebung des Hindernisses nach rechts (DG 0mm bis auf + 400mm in DG4) ist eine signifikante Abnahme (McNemar(222) = 75.013, $p = .000$) der Richtungsentscheidung rechts beim Hinweg (43%) und eine signifikante Zunahme beim Rückweg auf 81% (McNemar(73) = 17.053, $p = .000$) zu verzeichnen. Das Lastgewicht (ohne / mit 10 kg) hat keinen Einfluss auf die Richtungsentscheidungen (Chi-Quadrat(7) = 4.101, $p = .768$). Zwischen Männern und Frauen sind signifikante Unterschiede (Chi-Quadrat(7) = 23.401, $p = .001$) vorhanden. Frauen sind im Vergleich zu Männern häufiger Kreislauf. Die Veränderung der Hindernisposition wird von 10% der Personen nach DG1, von 16% nach DG2, von 47% nach DG3 und von 4% nach DG4 bemerkt. 24% der Probanden nahmen keine Kenntnis davon.

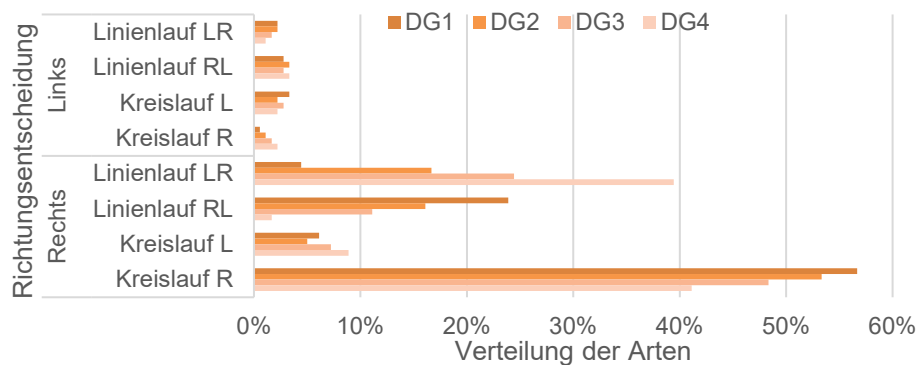


Abbildung 3: Verteilung Richtungsentscheidung (Laufarten) bei Hindernis Hin- und Rückweg

Der Verlauf der Bewegungsbahn mit Abstand zum Hindernis für die Personen sowie statistisch Werten (Median, Max, Min) kann Abb. 4 entnommen werden.

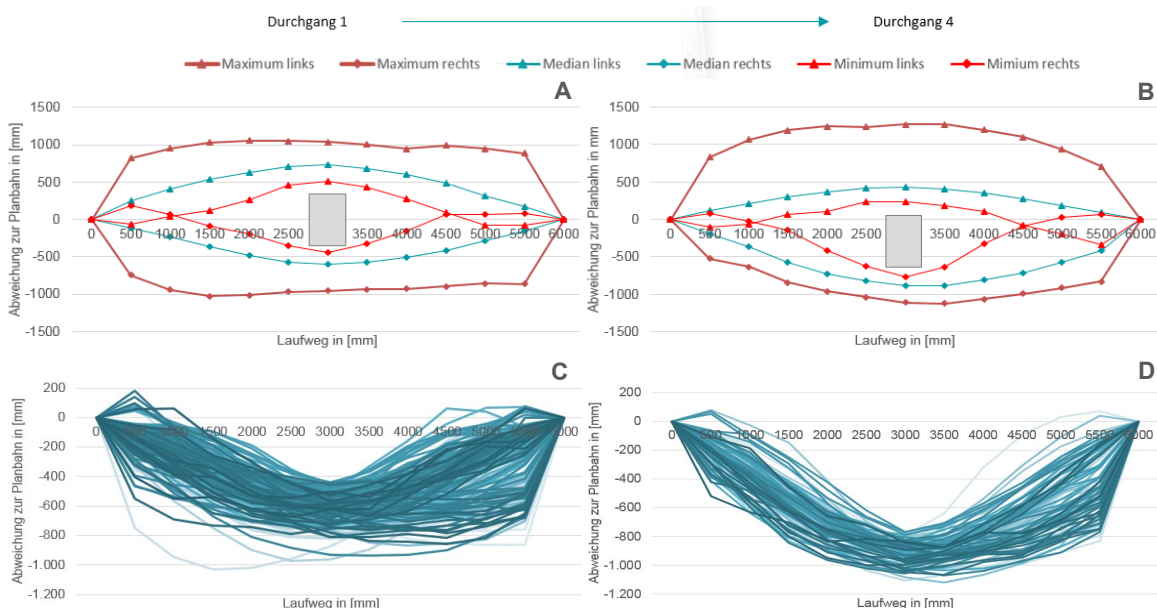


Abbildung 4: Laufwege in Form der Abweichung zur Planbahn in Abhängigkeit zum Abstand zum Hindernis (A / B: statistische Maße (Max, Median, Min) für DG1 (A), DG4 (B) sowie C / D: einzelne Bewegungsbahnen für DG1 (C) und DG4(D)

Der mittlere Abstand für Rechtsläufer steigt auf der rechten Seite von DG1 von 612 ± 98 mm auf 901 ± 79 mm in DG4. Auf der linken Seite ist für Rechtsläufer eine Abnahme in DG1 von 741 ± 95 mm auf 465 ± 151 mm zu verzeichnen. Ein ähnliches Verhalten ist für Linksläufer auf der rechten und linken Seite zu beobachten. Der Abstand zum Hindernis bleibt zwischen DG1 und DG4 im Mittel gleich und beträgt -256 mm (DG1, rechts), -237 mm (DG4, rechts), +382 mm (links, DG1) und 378 mm (links, DG4). Frauen halten im Vergleich zu Männern einen höheren Abstand von 30mm zum Hindernis ($F_{(1, 193)} = 5,871$, $p = 0.016$). Hinsichtlich Alter sind keine signifikanten und relevanten Unterschiede vorhanden ($F_{(2,193)} = 0,003$, $p = 0.997$).

4.2 Bewegungsvarianz beim horizontalen Aufnehmen & Platzieren

Insgesamt konnten 122 Bewegungsmuster für das Aufnehmen und Platzieren identifiziert werden, wobei an Position 1 (P1) (28), P4 (35) und P7 (43) vorhanden sind. Die höchste Anzahl ist bei P5 mit 50 Mustern feststellbar. 50% der 122 Bewegungsmuster lassen sich durch die 5 häufigsten beschreiben. An P1 beträgt dies 71,7% (häufigste: 30,8%), 66% an P4 (häufigste: 37,4%) und 64,8% an P7 (häufigste: 28,6%). Abbildung 5 zeigt die 5 häufigsten an P4. Frauen nutzen häufiger Ausfallschritte (w: 38%, m: 21%), Männer Seitenschritte (w: 45%, m: 55%) oder Laufen (w:11%, m: 21%), um Distanzen zu überbrücken. Bzgl. Alter sind keine sign. Unterschiede vorhanden.

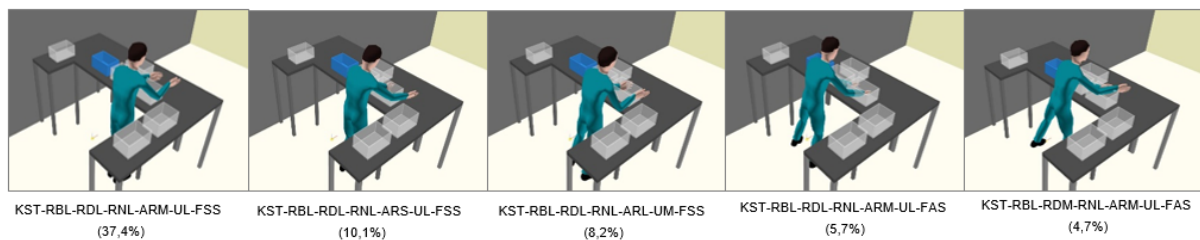


Abbildung 5: Häufigste Bewegungsmuster beim Aufnehmen & Platzieren in P4 (Verteilung in %)

Die Gelenkwinkel und Armreichweiten weisen eine hohe Streuung auf (Tab. 2). Wesentliche Unterschiede sind zwischen den Positionen P1 bis P7 vorhanden. P4 erfordert bspw. eine mittlere Reichweite ($71 \pm 8,8\%$), wohingegen für das Erreichen von P1 ($52 \pm 13,1\%$) und P7 ($55 \pm 10,7\%$) eine geringere Reichweite benötigt wird.

Tabelle 2: Übersicht zu eingenommenen Körperwinkeln im Versuch V1.3 Pick& Place horizontal

Merkmale	RB [°]	RD [°]	RN [°]	KB [°]	ARM [%]	EB [°]
MW ± SD	27 ± 5,6	6 ± 5,6	3 ± 2,9	11 ± 7,3	61 ± 13,1	67 ± 18,0
Minimum	-8	0	0	0	25	8
Maximum	27	32	24	47	96	121



Legende: RB – Rumpfbeugung; RD – Rumpfdrehung; RN – Rumpfneigung; KB – Kniebeugung; ARM [%] – Armreichweite von maximaler ARM; EB – Ellenbogenbeugung

5. Diskussion

Die ermittelten Ergebnisse stellen einen ersten Ausschnitt zur möglichen Bewegungsvarianz dar. Die Ergebnisse zeigen, dass es z.T. erhebliche Bewegungsvari-

anzen beim Laufen und Handhaben von Objekten gibt. Die Position von Hindernissen oder die Positionierung von Objekten auf Tischen nimmt einen wesentlichen Einfluss auf die gewählte Strategie ein. Die Erkenntnisse decken sich mit Ergebnissen aus anderen Studien (vgl. Köneman et al., 2015; Vallis & McFadyen, 2005).

Mittels der vorliegenden Daten kann eine erste Anpassung der Bewegungsstrategien wie bzgl. der Richtungsentscheidung im *ema* vorgenommen werden. Dabei kann von einer angemessenen Qualität der Daten ausgegangen werden, da diese unter einem standardisierten Versuchsdesign mittels eines reliablen Messinstrument erhoben wurden sind. In Vorversuchen wurde sich insbesondere mit eventuellen Messungenauigkeiten des Xsens-Systems aufgrund der Drift beschäftigt. Eventuelle Abweichungen konnten durch regelmäßige Kalibrierungen wesentlich reduziert werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Laborstudie wurden umfassende Untersuchungen zur Bewegungsvarianz beim Gehen z.B. um Hindernisse und Aufnehmen & Platzieren mittels standardisiertem Versuchsdesign erhoben. Hierbei konnten verschiedene Bewegungsstrategien und -muster ermittelt werden. Zudem bestehen personenspezifische Einflussgrößen, die sich auf die Ausprägung der Bewegungsvarianz auswirken. Die Faktoren sind entsprechend bei einer Integration in den *ema* zu berücksichtigen.

Im nächsten Schritt ist das Gesamtkollektiv (N=100) auszuwerten, um abschließende Aussagen treffen zu können. Dazu gehört auch die Betrachtung des Einflusses des Roboters auf die Bewegungsbahn und die Bewegungsmuster beim Aufnehmen & Platzieren. Weiterhin wird eine vertiefte Analyse weiterer Parameter durchgeführt. Die gesamten Ergebnisse werden u.a. anschließend in ein parametrisierbares Modell überführt, mit dessen Hilfe eine Beschreibung der Bewegungsvarianz beim Ausweichen von Hindernissen sowie der Abstand zum Roboter berechnet werden kann, um die Mensch-Roboter-Interaktion prospektiv sicherer gestalten zu können.

7. Literatur

- Bauer, S. (2016). Prozesssprachenbasiertes System zur Ansteuerung digitaler Menschmodelle als Teilkomponente einer Software zur Planung und Visualisierung menschlicher Arbeit in der Digitalen Fabrik (1. Aufl.). Chemnitz: Univ.-Verl.
- Bullinger-Hoffmann, A. C. & Mühlstedt, J. (2016). Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Könemann, R., Bosch, T., Kingma, I., van Dieën, J. H. & Looze, M. P. de. (2015). Effect of horizontal pick and place locations on shoulder kinematics. *Ergonomics* 58 (2), 195–207.
- Savin, J., Gilles, M., Gaudez, C., Padois, V. & Bidaud, P. (2017). Movement Variability and Digital Human Models: Development of a Demonstrator Taking the Effects of Muscular Fatigue into Account. In V. G. Duffy (Hrsg.). *Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Digital Human Modeling and Simulation*, July 27-31, 2016. Cham: Springer International Publishing.
- Vallis, L. A. & McFadyen, B. J. (2005). Children use different anticipatory control strategies than adults to circumvent an obstacle in the travel path. *Experimental brain research* 167 (1), 119–127. doi:10.1007/s00221-005-0054-6

Danksagung: Dieser Beitrag wäre ohne die Unterstützung durch die SAB und die Europäische Union vom 01.07.2017 bis 31.12.2019 (SAB/ EFRE; Projekt: Bewegungsvarianz) nicht möglich gewesen.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten

65. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Professur Arbeitswissenschaft
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden

Institut für Arbeit und Gesundheit
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

27. Februar – 1. März 2019

GfA-Press

Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019

**Professur Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,
Technische Universität Dresden;
Institut für Arbeit und Gesundheit, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Dresden**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2019
ISBN 978-3-936804-25-6

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

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

- den Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Konferenzband 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.

Screen design und Umsetzung

© 2019 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de