

Untersuchung des Einsatzpotentials eines Inertialsensorsystems zur Motion Capture-basierten Ergonomieanalyse

Erik HARNAU¹, Christoph BERNIG², Stefan WAßMANN³

¹ *Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb (IAF),
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU)
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg*

² *METOP Mensch-Technik-Organisation-Planung GmbH
Sandtorstraße 23, D-39106 Magdeburg*

³ *Sachgebiet Personalentwicklung, Universitätsklinikum Magdeburg
Leipziger Straße 44, D-39120 Magdeburg*

Kurzfassung: Die automatisierte Erfassung und Bewertung von Bewegungsdaten weist ein großes Potential zur Zeitersparnis sowie Qualitätssteigerung im Prozess der Ergonomieanalyse auf. In der vorliegenden Studie wird untersucht, ob auch inertialsensorbasierte Motion Capture-Systeme (hier: „MVN Link“ von Xsens) für dieses Anwendungsgebiet ausreichend präzise Daten generieren können. Diese Systeme bieten, gegenüber den herkömmlich angewandten optischen Systemen, große Vorteile im Hinblick auf Flexibilität und Einrichtungsaufwand. Ein besonderer Fokus innerhalb der Studie liegt auf dem auftretenden Drift, welcher in „lokalen“ und „globalen“ Drift differenziert betrachtet wird und die Genauigkeit der Daten maßgeblich beeinflusst.

Schlüsselwörter: Ergonomie, Ergonomieanalyse, Ergonomiebewertung, Motion Capture, inertialsensorbasiertes Motion Capturing, Xsens

1. Ausgangslage und Ziel

Der in Deutschland stetig steigende Fachkräftemangel ist ein zentrales Thema unserer Gesellschaft. Nicht zuletzt deshalb sind Unternehmen zunehmend darum bemüht, ihre Mitarbeitenden gesund zu erhalten und deren Berufsunfähigkeitstage zu minimieren. Diese lagen im Jahr 2021 zu etwa 20% in Erkrankungen des Skelett- und Bewegungsapparates begründet (Statista 2021). Um dem entgegenzuwirken, sollten u. a. bestehende Arbeitsplätze zunehmend anhand ergonomischer Anforderungen optimiert werden. Grundstein dafür bildet i. d. R. eine detaillierte Aufnahme der jeweiligen Ist-Situationen. Diese empirischen Erhebungen werden meist noch klassisch mittels einer Beobachtung und der Anwendung etablierter Bewertungsverfahren (z. B. EAWS, RULA, Cuela, Leitmerkalmethode) vorgenommen. Die Erhebungen sind häufig sehr zeitaufwändig und die Ergebnisse z. T. abhängig von der subjektiven Wahrnehmung sowie individuellen Erfahrung des Beobachters (vgl. Schäfer et al. 2007).

Ein großes Potential zur Optimierung dieser Prozesse bieten digitale Bewegungserfassungssysteme, sog. „Motion Capture-Systeme“. Insbesondere optische Systeme finden hier bereits Anwendung, da sie sich durch eine hohe Genauigkeit auszeichnen. Jedoch ist der Einrichtungsaufwand dafür sehr hoch, da mehrere Kameras aufgestellt und kalibriert, Verdeckungen des Probanden im Testumfeld vermieden und, je nach System, Marker auf der Kleidung angebracht werden müssen (vgl. Gudehus 2008).

Alternativ bieten inertialsensorbasierte Erfassungssysteme den Vorteil des wesentlich flexibleren Einsatzes. So kann der Motion Capture-Anzug „MVN Link“ von Xsens unter der Arbeitskleidung getragen werden und sich der Proband somit frei im Raum bewegen, solange die WLAN-Verbindung zum Router nicht unterbrochen wird. Dem entgegen steht die Sorge bzgl. der Präzision der Daten, insbesondere hervorgerufen durch den sog. „Drift“, einer über die Zeit auftretenden Abweichung von aufgezeichneter Position im Raum gegenüber der realen (vgl. z. B. Lasmadi et al. 2017).

Der Fokus der vorliegenden Studie liegt daher in der Quantifizierung des auftretenden Drifts bei der Verwendung inertialsensorbasierter Motion Capture-Systeme, exemplarisch untersucht anhand des „MVN Link“. Differenziert wird hierbei die Lageabweichung des gesamten Systems im Raum, definiert als „globaler“ Drift, von der Lageabweichung der einzelnen Sensoren relativ zueinander, definiert als „lokaler“ Drift (siehe Abbildung 1). Diese Unterscheidung wird aufgrund der Annahme vorgenommen, dass zur Ergonomiebewertung häufig nur der lokale Drift von Bedeutung ist, der globale hingegen in den meisten Szenarien vernachlässigt werden kann.

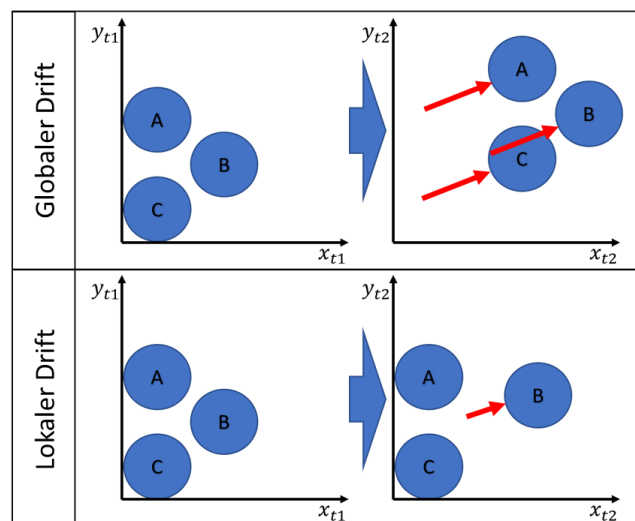


Abbildung 1: Differenzierung globaler/lokaler Drift, vereinfachte Darstellung im zweidimensionalen Raum (eigene Darstellung)

2. Methodisches Vorgehen

Als Grundlage zur Bewertung der oben beschriebenen Ungenauigkeit lagen bisher nur unzureichend präzise Angaben, z. B. seitens des Herstellers, vor. Deshalb sollte ein eigener Versuchsstand an der OVGU konzipiert und umgesetzt werden, um diesbezüglich aussagekräftige Daten zu generieren. Hierbei wird eine einfache Montage-tätigkeit durchgeführt und zwischenzeitlich wiederholt eine definierte Bezugsposition eingenommen, anhand derer die auftretende Lageabweichung in den aufgezeichneten Daten bestimmt werden kann. Der Aufbau und die Durchführung der Versuche werden nachfolgend beschrieben.

2.1 Versuchsaufbau

Der umgesetzte Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Dieser besteht aus einem Monitor mit angeschlossenem Laptop (a3), worüber eine Live-Übertragung des Aufzeichnungsprogrammes (MVN Analyse) erfolgt. Davor befindet sich ein freier, drei

Meter langer Korridor, der zur Systemkalibrierung genutzt wird (a_1/a_2). An der Position (c) ist ein Montagearbeitsplatz am digitalen Assistenzsystem „Schlauer Klaus“ von Optimum eingerichtet. Darauf befindet sich ein Simson-S51-Getriebe und in den Sichtregalen die zur Versuchsdurchführung benötigte Werkzeuge.

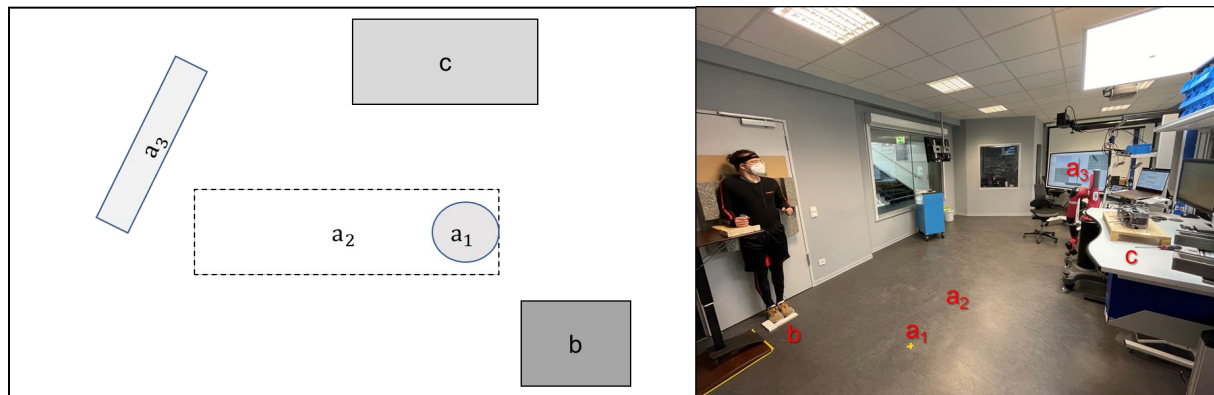


Abbildung 2: Versuchsaufbau an der OVGU; a_1 =Startposition, a_2 =Kalibrierbereich, a_3 =Monitor, b =Bezugsposition, c =Arbeitsbereich (eigene Darstellung)

An der Bezugsposition (b) wurde eine probandenindividuelle Vorrichtung eingesetzt, in der die Positionen vom rechten Hand-, rechten Fuß- und Pelvissensor (Beckensensor) in ihrer räumlichen Lage fixiert werden. Wie in Abbildung 3 zu sehen, sind dafür auf dem Tisch eine Schiene und ein Griff fixiert, in die der Unterarm eingelegt bzw. der von der Hand umschlossen wird. Der rechte Fuß wird auf dem Boden gegen einen Anschlag geschoben. Der auf Höhe der Lendenwirbelsäule angebrachte Pelvisensor wird in einem speziell auf dessen Kontur angefertigten Gipsabdruck positioniert. Auch Hüfte und Schulter werden durch Seitenwangen in Position gehalten.

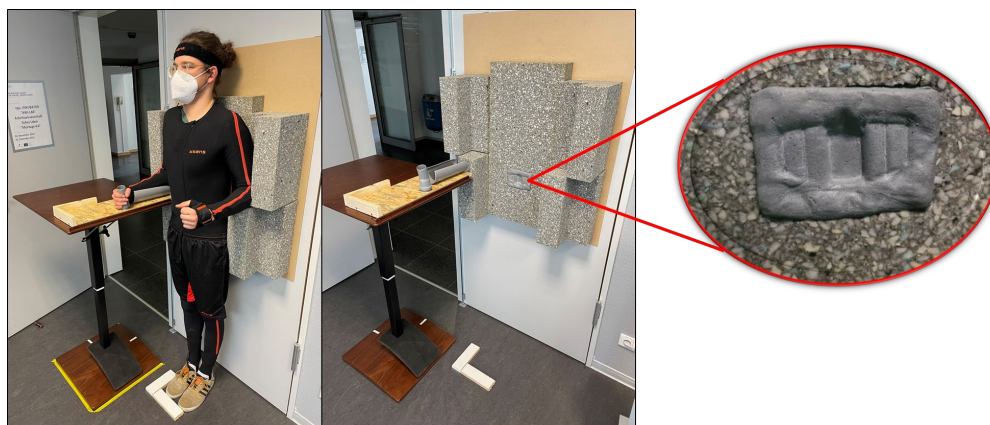


Abbildung 3: Bezugsposition im Versuchsaufbau mit und ohne Proband. Im Detail (rechts): Gipsabdruck des Pelvissensors (eigene Darstellung)

Der Proband trägt während des Versuchs den Motion Capture-Anzug „MVN Link“ von Xsens, inkl. der 17 integrierten Inertialsensoren, eines Body- sowie Batteriepacks. Die Sensoren der Gliedmaßen sind jeweils in Reihe, der Kopf- sowie Pelvisensor direkt mit dem Bodypack mittels Kabel verbunden. Fixiert werden die einzelnen Sensoren durch Klettverbindungen in den im Anzug jeweils dafür vorgesehenen Positionen, die Kabel werden in einer Zwischenlage eingeschlossen. Der feste Sitz wird vor Versuchsbeginn gründlich kontrolliert, um durch das Verrutschen der Sensoren verursachte Messfehler zu vermeiden.

2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn werden einmalig die anthropometrischen Daten des Probanden in das Aufzeichnungssystem eingetragen und der Anzug angelegt. Es folgt der eigentliche Versuchsablauf: das Motion Capture-System wird kalibriert und die Bezugsposition eingenommen. An diesem Punkt beginnt die 20-minütige Aufzeichnung, der Proband geht zum Arbeitsbereich und wird anhand des digitalen Assistenzsystems durch die Montage des Simson-S51-Getriebes geleitet. In Intervallen von fünf Minuten wird die Bezugsposition erneut eingenommen, sodass insgesamt fünf Mal je Versuch die gleiche Position des Probanden aufgezeichnet wird.

Die Aufzeichnung der 20 Versuchsdurchführungen fand an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit der gleichen Versuchsperson statt. Das nachfolgende Kapitel beschreibt das Vorgehen bei der Auswertung der vorgefundenen Daten.

3. Versuchsauswertung

Aus den 20 erzeugten Datensätzen der jeweils 20-minütigen Aufzeichnungsdauer werden zunächst die relevanten Daten herausgefiltert. Dabei handelt es sich um die räumliche Lage (x-, y- und z-Koordinaten) der Sensoren des Pelvis, des Kopfes, der rechten Hand sowie des rechten Fußes zu den Zeitpunkten in der Bezugsposition ($t_{0-4} = 0/5/10/15/20$ min). Aus diesen Daten werden nachfolgend Aussagen bezüglich des globalen und lokalen Drifts abgeleitet.

Eine erste Erkenntnis liegt darin, dass die z-Werte aller Sensoren über die Versuchsdauer nahezu konstant bleiben. Die Standardabweichung liegt im Durchschnitt der vier betrachteten Sensoren mit 4 mm deutlich unter denen der x- bzw. y-Werte (264 mm/344 mm). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Aufzeichnungssoftware „MVN Analyse“ bei einer Bewegung auf ebenem Boden mittels Algorithmen eigenständig den Drift in z-Richtung rausrechnet und bereits korrigierte Werte ausgibt.

Zur Interpretation der Lageabweichung in der x-y-Ebene werden jeweils die vektoriellen Abstände zwischen den Punkten von t_{1-4} zu t_0 ermittelt. Die vorhandenen Abweichungen nehmen über alle Messzeitpunkte hinweg zu und liegen bereits zu T1 in einem nicht mehr akzeptablen Bereich, was sich bis T4 zu einer mittleren Abweichung von über 700 mm steigert (vgl. Abbildung 4). Die Ergebnisse der einfaktoriellen Vari-

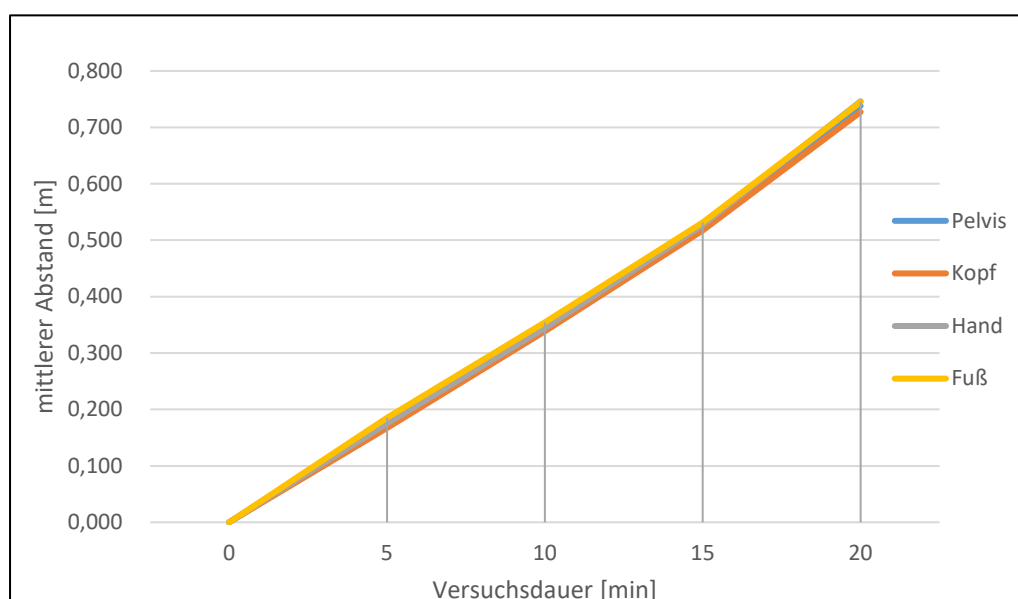


Abbildung 4: Zusammenhang der vektoriellen Abstände zur Versuchsdauer (eigene Darstellung)

anzanalysen mit entsprechenden Post-hoc-Tests zeigen, dass es sich hierbei um statistisch signifikante Abweichungen handelt. Aus Platzgründen werden die 24 Post-hoc-Vergleiche an dieser Stelle nicht aufgeführt, es kann aber festgehalten werden, dass die Mehrzahl der Mittelwertunterschiede signifikant sind und auch häufig bereits zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten signifikante Verschlechterungen der Messgenauigkeit auftreten, welche zudem mit einer über die Zeit ansteigenden Streuung der Messergebnisse einhergehen. Ebenso ersichtlich wird, dass die vier Sensoren ähnlich stark von der Ursprungsposition abweichen, was die Vermutung zulässt, dass der lokale Drift zwischen den Sensoren wesentlich geringer ist.

Um Aussagen über diesen „isolierten“ lokalen Drift zu erhalten, wird im Folgenden der Pelvissensor als Bezugspunkt festgelegt. Die Lageabweichung dieses Sensors zum Aufzeichnungsbeginn während der Versuchsdauer wird fortan als der globale Drift (Verlauf entsprechend Abbildung 4) und die Änderung der vektoriellen Abstände von Kopf/Hand/Fuß zum Pelvis als lokaler Drift definiert (vgl. Abbildung 5). Diese isolierte Lageabweichung zwischen den einzelnen Sensoren ist wesentlich geringer (im Mittel zu keinem Messzeitpunkt größer als 50 mm) und auch die Ergebnisse der 18 Post-hoc-Vergleiche erreichen hier nur in 2 Fällen statistische Signifikanz ($T_{3\text{Kopf}}$ vs. $T_{4\text{Kopf}}$ sowie $T_{1\text{Hand}}$ vs. $T_{4\text{Hand}}$).

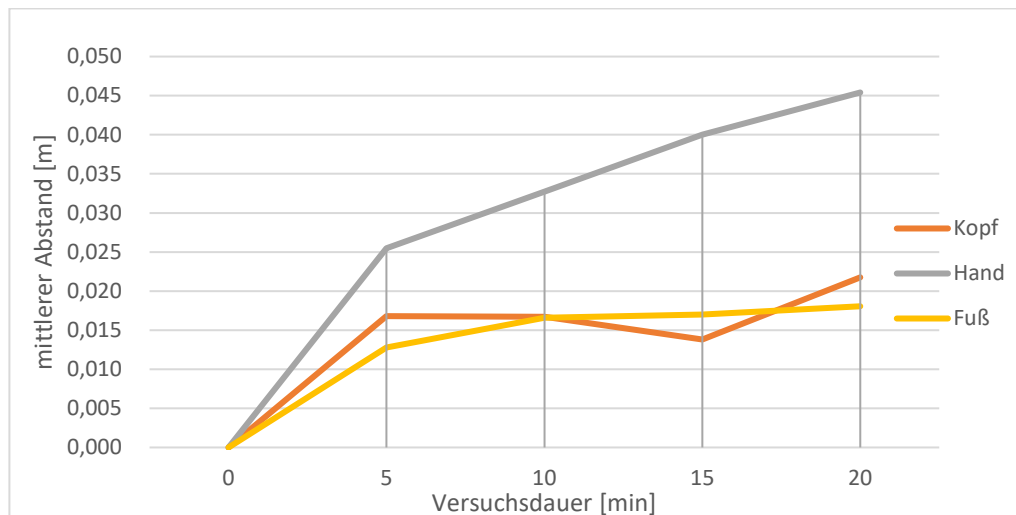


Abbildung 5: Zusammenhang des lokalen Drifts zur Versuchsdauer (eigene Darstellung)

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich ableiten, dass die inertialsensorbasierten Motion Capture-Systeme zwar (wie oft beschrieben) einen über die Versuchsdauer steigenden globalen Drift aufweisen, die Sensoren aber recht stabil ihre Lage zueinander beibehalten.

4. Diskussion und Fazit

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse lässt sich die eingangs formulierte Annahme bekräftigen, dass von modernen Inertialsensorsystemen generierte Daten mittlerweile hinreichend genaue Daten aufnehmen können, um auf deren Basis z. B. eine Ergonomiebewertung durchzuführen. Einschränkungen gibt es hierbei für Szenarien, in denen die räumliche Position des Probanden im Raum von besonderer Bedeutung ist, da der globale Drift noch immer starke Abweichungen derer bewirken kann. Die i. d. R. wesentlich relevanteren Positionen der einzelnen Sensoren zueinander können

bei der betrachteten Versuchsdauer hingegen deutlich exakter aufgezeichnet werden. Die auftretenden Abweichungen liegen mit durchschnittlich 23 mm (SD=16 mm) in einer Größenordnung, die für die meisten Szenarien akzeptabel ist.

Die vorgefundenen Ergebnisse lassen, zumindest bzgl. Kopf- und Fußsensor, zudem die Vermutung zu, dass sich der lokale Drift auf einem vertretbaren Niveau stabilisiert. In einem weiteren Versuch könnte dahingehend untersucht werden, ob sich dieser Trend bei einer höheren Versuchsdauer fortsetzt. Von diesen Ergebnissen ist abhängig wie lange Tätigkeitsaufzeichnungen ohne Zwischenkalibrierungen durchgeführt werden können, während die Lageabweichungen im akzeptablen Maß bleiben. Hierbei kann es sich um ein entscheidendes Kriterium zum Einsatz der Systeme in der Praxis handeln.

Zuletzt ist auch eine Überprüfung sinnvoll, wie sich der Drift entlang der z-Achse entwickelt, wenn der Versuch nicht ausschließlich auf einer ebenen Fläche stattfindet (z. B. durch Nutzung von Leitern/Stufen/schiefen Ebenen).

Zusammenfassend lässt sich hervorheben, dass die modernen inertialsensorbasierten Motion Capture-Systeme ein großes Potential zur breiteren Anwendung aufweisen, da sie eine hohe Flexibilität der Versuchsperson sowie des -umfelds ermöglichen und der Einrichtungsaufwand, im Vergleich zu optischen Erfassungssystemen, deutlich geringer ist. Die durch den Drift bedingte Ungenauigkeit ist nur in Einsatzfeldern problematisch, in denen die globale Position im Raum oder eine besonders exakte Position der Sensoren zueinander relevant sind. Für solche Szenarien könnte ggf. eine Verfahrenskombination herangezogen werden, in der man die Vorteile zweier Systeme vereint und Synergien nutzt.

5. Literatur

- Gudehus T (2008) Entwicklung eines Verfahrens zur ergonomischen Bewertung von Montagetätigkeiten durch Motion-Capturing. Kassel: kassel university press GmbH.
- Lasmadi, Cahyadi A, Herdjunanto S, Hidayat R (2017) Inertial Navigation for Quadrotor Using Kalman Filter with Drift Compensation. In: International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 7, No. 5.
- Schäfer E, Buch M, Pahls I, Pfitzmann J (2007) Arbeitsleben! Arbeitsanalyse – Arbeitsgestaltung - Kompetenzentwicklung. Kassel: kassel university press GmbH.
- Statista (2021) Verteilung der Ursachen von Berufsunfähigkeit in Deutschland im Jahr 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/536354/umfrage/verteilung-der-ursachen-von-berufsunfaehigkeit-in-deutschland/>.

Danksagung: Ein besonderer Dank gilt Herrn Norman Hofmann (Institut für Mechatronik, Chemnitz) für die uneigennützigte Unterstützung und den höchst konstruktiven Input!



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten

68. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und
Fabrikautomatisierung IFF, Magdeburg

02. – 04. März 2022

GfA-Press

Bericht zum 68. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. – 04. März 2022

**Otto-von Guericke-Universität Magdeburg;
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2022
ISBN 978-3-936804-31-7

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

© 2022 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de