

Motion Capture-Technologien für die Ergonomie-Analyse – ein Review

Erik HARNAU, Stephan BREITER, Julia C. ARLINGHAUS

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

Kurzfassung: Der Einsatz digitaler Bewegungserfassungssysteme ermöglicht eine ganzheitliche und präzise Aufzeichnung von Körperhaltungen im Arbeitsprozess und birgt damit großes Potenzial u. a. für eine automatisierte sowie objektive Ergonomiebewertung. Die stetig wachsende Anzahl verfügbarer Motion Capture-Technologien erschwert es den potenziellen Anwendern*innen jedoch zunehmend, die für ihren individuellen Anwendungsfall geeignete Lösung auszuwählen. Auf Basis einer strukturierten Literaturanalyse soll hierfür eine Leitlinie entwickelt werden, welche bei der Entscheidungsfindung unterstützt. Die Grundlage dafür bilden spezifische Evaluationskriterien, die aus der Literatur abgeleitet und anhand derer die identifizierten MC-Systeme bewertet werden.

Schlüsselwörter: Motion Capture, MoCap, Bewegungserfassung, Bewegungsanalyse, Ergonomieanalyse, Haltungsanalyse

1. Motivation

Die Reduzierung von Berufsunfähigkeitstagen ist von zentraler Bedeutung für die europäische Wirtschaft (vgl. Takala et al. 2012). Dies ist aus mehreren Perspektiven getrieben: der Fürsorgepflicht der Unternehmen gemäß BGB § 618 Abs. 1, des Fachkräftemangels sowie der alternden Mitarbeiterschaft (u. a. Berlemann & Eurich 2023). Die Berufsunfähigkeitstage basierten in Deutschland im Jahr 2022 zu 21,5 % auf muskuloskelettalen Erkrankungen (Badura et al. 2022). Um dem in bestehenden Arbeitsumgebungen entgegenzuwirken, ist insbesondere die Anwendung etablierter Bewertungsverfahren (z. B. European Assembly Worksheet (EAWS), Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Leitmerkalmethoden (LMM)) zur Identifikation unergonomischer Arbeitsgänge von Bedeutung (vgl. David 2005; Battini et al. 2014; Manghisi et al. 2017). Diese Verfahren basieren zumeist auf Expertenbeobachtungen, die sowohl einen hohen Zeitaufwand bedürfen, als auch abhängig sind von der subjektiven Wahrnehmung und individuellen Erfahrung des Bewertenden (vgl. Whatman 2012; Manghisi et al. 2017; Russo et al. 2018). Es ist aktuell nicht bekannt, wie sich die subjektive Wahrnehmung auf die Bewertung auswirkt. Eine Alternative stellt der Einsatz digitaler Systeme zur Bewegungserfassung (Motion Capture – MC) dar, die eine objektive und präzise Bewegungsaufnahme ermöglichen können (vgl. Salisu et al. 2023). In den letzten ca. 15 Jahren haben sich für diese Anwendung bereits zunehmend hochpräzise markerbasierte optische MC-Systeme (OMC) etabliert (vgl. Roggio et al. 2021). Zuletzt wird auch der Einsatz markerloser OMC sowie inertialer Messsysteme (inertial measurement unit – IMU) untersucht, da diese eine höhere Flexibilität

bei zunehmender Genauigkeit aufweisen (vgl. Roggio et al. 2021; Aqueveque et al. 2023). Darüber hinaus gibt es noch weitere, in diesem Kontext seltener verwendete MC-Technologien, die eine Erfassung menschlicher Bewegung ermöglichen, z. B. basierend auf Ultraschall-Sensoren oder elektromagnetisches Tracking (vgl. Ashhar et al. 2019; Lam et al. 2023).

Wie auch Roggio et al. (2021) herausstellen, bedarf es aufgrund dieser Vielzahl vorhandener MC-Technologien einer Übersicht darüber, welche Technologien für welchen Anwendungsfall und welche technischen Anforderungen geeignet sind. Das Ziel dieser Studie ist es daher eine Leitlinie zu entwerfen, die es den Anwendern*innen ermöglicht, für den individuellen Anwendungsfall die optimale MC-Technologie auszuwählen. Um diese Leitlinie zu entwickeln, führen wir eine systematische Literaturanalyse durch. Dieser Beitrag konzentriert sich darauf, den aktuellen Stand der Wissenschaft darzulegen und den Forschungsbedarf aufzuzeigen. Anschließend legen wir das von uns gewählte Vorgehen zur Literaturanalyse dar.

2. Stand der Wissenschaft

In den letzten Jahren sind bereits Literaturanalysen innerhalb des beschriebenen Themenfeldes veröffentlicht worden. Folgend wird eine Auswahl derer gegeben, die für die in dieser Publikation präsentierte Zielstellung von Relevanz sind.

Salisu et al. (2023) geben eine Übersicht über die in den Jahren 2013 bis 2023 am häufigsten verwendeten MC-Systeme sowie über deren Anwendungen und Zielgruppen. Sie konzentrieren sich dabei auf den Suchbegriff „MoCap“ und klassifizieren die identifizierten MC-Systeme in die drei Kategorien markerbasiert, markerlos und IMU. Eine strukturierte Bewertung der verschiedenen Systeme als Ausgangspunkt für eine Technologieauswahl erfolgt nicht. Andere Suchbegriffe, wie „motion capture“ oder „MC“, werden nicht einbezogen.

Menolotto et al. (2020) fassen vorausgegangene Studienergebnisse zum Einsatz von MC-Systemen in industriellen Anwendungsgebieten zusammen. Ähnlich zu *Salisu et al. (2023)* werden die Systeme in die Kategorien markerbasierte OMC, markerlose OMC sowie IMU eingeteilt und darüber hinaus anhand definierter Eigenschaften gegenübergestellt. Damit handelt es sich hierbei um die einzige uns bekannt Literaturanalyse, auf deren Basis eine multifaktorielle Technologieauswahl möglich wäre. Die Studie bezieht allerdings keine Erkenntnisse anderer Anwendungsgebiete, wie bspw. Medizin, Rehabilitation und Sport, mit ein. Gleichzeitig ist die Analyse auf den Zeitraum von 2015 bis 2019 beschränkt. Vor dem Hintergrund des rasanten technischen Fortschritts ist daher ein Bedarf zur Aktualisierung zu erwarten.

Rybníček et al. (2023) haben all jene Studien aus dem Zeitraum von 2010 bis 2022 ausgewertet, bei denen MC zur Ergonomieanalyse eingesetzt wurde. Eine Bewertung erfolgt lediglich für das Einsatzpotential von MC für die Ergonomiebewertung im Vergleich zu den herkömmlichen Erhebungsmethoden, ohne dabei zwischen den verschiedenen Systemarten zu differenzieren. Eine Technologieauswahl wird dadurch nicht ermöglicht.

3. Methodisches Vorgehen

Für dieses Review wird eine strukturierte Literaturanalyse durchgeführt, welche sich an der Vorgehensweise nach Sauer & Seuring (2023) orientiert. Demnach unterteilt sich der Gesamtprozess in sechs Schritte und 14 Entscheidungen (D1-D14), wobei innerhalb dieser Veröffentlichung auf die Umsetzung der folgenden Schritte eingegangen werden soll:

1. Beschreibung der Forschungsfrage: Es gilt die Forschungslücke zu spezifizieren und die zugehörige Forschungsfrage(n) zu formulieren (D1), die Entscheidung für einen theoretischen Ansatz (z. B. induktiv, abduktiv oder deduktiv) zu treffen (D2) sowie den theoretischen Rahmen festzulegen (D3).
2. Bestimmung erforderlicher Auswahlkriterien für einzubeziehende Primärstudien: An dieser Stelle werden die in den Datenbanken automatisch selektierbaren Auswahlkriterien definiert (D4).
3. Generieren einer Sammlung potenziell relevanter Literatur: Dafür werden die zur Literatursuche zu nutzenden Datenbanken ausgewählt (D5), die anzuwendenden Suchbegriffe definiert und eine geeignete Kombination dieser zusammengestellt (D6).
4. Auswahl relevanter Literatur: Für eine nachvollziehbare Literaturauswahl müssen treffende Ausschlusskriterien formuliert werden, anhand derer eine Selektion der generierten Literatursammlung vorgenommen wird (D7).
5. Zusammenführung der Literatur: Zur Unterstützung der qualitativen Inhaltsanalyse sollten geeignete Tools zur Datenextraktion verwendet werden (D8). Durch die Nutzung vordefinierter Variablen und Codes können die Studienergebnisse daraufhin effizient ausgewertet und zusammengeführt werden (vgl. z. B. Poitras et al. 2019) (D9). Die entnommenen Daten werden zudem in Datenextraktionsprotokollen, angelehnt an Turner et al. (2009), für die einzelnen Quellen zusammengefasst.

4. Praktische Umsetzung

Auf Basis der beschriebenen Forschungslücke soll mittels der strukturierten Literaturanalyse die Frage beantwortet werden, wie Anwender*innen eine geeignete MC-Technologie für einen bestimmten Anwendungsfall auswählen können. Zu diesem Zweck werden folgende Teilfragen formuliert (D1):

- (a) Welche relevanten MC-Technologien gibt es, die eine nicht-invasive Erfassung menschlicher Bewegungsabläufe ermöglichen, und in welchen Anwendungsgebieten kommen diese typischerweise zum Einsatz?
- (b) Welche Kriterien sind geeignet, um diese Technologien miteinander zu vergleichen?
- (c) Wie sind die identifizierten Technologien anhand der definierten Kriterien zu bewerten?

Zur Beantwortung der Fragen werden zunächst breitflächig Daten gesammelt. Innerhalb dieser Daten werden Muster, in Form von vergleichbaren Evaluationskriterien, identifiziert und auf Basis derer eine Leitlinie zur Technologieauswahl entwickelt. Demnach werden ein induktiver theoretischer Ansatz verfolgt (vgl. Saunders et al. 2019) (D2) und die Ergebnisse auf Basis einer Inhaltsanalyse generiert (D3).

Den Empfehlungen von Sauer & Seuring (2023) folgend und vor dem Hintergrund des rasanten technischen Fortschritts auf dem Gebiet von MC, wird Literatur der letzten fünf Jahre betrachtet (2019–2023), die in englischer Sprache und innerhalb von Journalen publiziert wurde (D4). Zur Auswahl der Literaturlatenbanken und zur Entwicklung einer geeigneten Suchabfrage wurden vorab 22 Reviews analysiert, die zwischen 2013 und 2023 erschienen und „motion capture“ oder „mocap“ im Titel enthalten. Daraus haben sich die folgenden Datenbanken als die am häufigsten genutzten ergeben: Scopus, PubMed, Web of Science sowie IEEE Xplore (D5). Die generierte Kombination von Suchbegriffen ist der Abbildung 1 im Detail zu entnehmen (D6). Nach dem Eliminieren von Duplikaten ergeben sich daraus in Summe 267 potenziell relevante Literaturquellen zur weiteren Analyse.

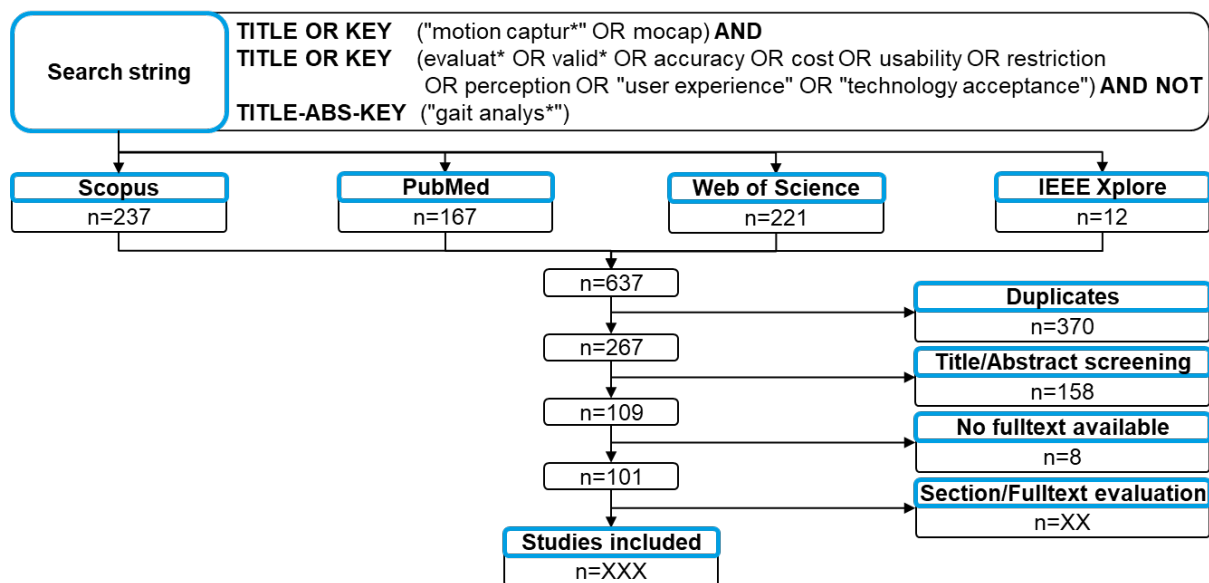


Abbildung 1: Methodisches Vorgehen zur Auswahl der relevanten Literatur

Diese Quellen werden in einem 4-stufigen Verfahren (Titel- und Abstrakt-Screening, Abschnitts- und Volltext-Evaluation) auf Relevanz überprüft. Das Screening erfolgt doppelblind durch zwei unabhängige Prüfer unter Nutzung der Webanwendung rayyan.ai (Ouzzani et al. 2016). Für die Auswahl und Auswertung der Literatur wurde ein Forschungsprotokoll gemäß Turner et al. (2009) entwickelt. Mithilfe des Protokolls wird das Risiko der subjektiven Verzerrung bei der Analyse der Literatur minimiert. Die darin formulierten Ausschlusskriterien sind: (1) eine bloße Nutzung von MC als Messinstrument, (2) der Fokus einzig auf einen Algorithmus, Deep Learning oder die Erzeugung eines Datensatzes, ohne Rückführung von Erkenntnissen auf das MC-System, (3) die Aufzeichnung nicht-menschlicher Bewegungen/keine Generierung eines Menschmodells, (4) es handelt sich um ein Review sowie (5) es ist kein Volltext verfügbar. Nach jeder Stufe werden Quellen, die beide Prüfer mit einem Ausschlusskriterium markierten, aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen und Uneinigkeiten diskutiert, bis eine einstimmige Entscheidung getroffen werden kann (Ergebnisse siehe Abbildung 1). (D7)

Zur Unterstützung einer qualitativen Inhaltsanalyse der identifizierten Literatur wird die Software MAXQDA (VERBI Software 2022) verwendet (D8). Innerhalb von

MAXQDA werden Textsegmente direkt kodiert, sodass anschließend (teil-)automatisiert Datenextraktionsprotokolle generiert werden können (D9).

5. Ausblick und Limitationen

In der vorliegenden Publikation wird das methodische Vorgehen zur Umsetzung einer strukturierten Literaturanalyse dargelegt. Dieses bildet die Grundlage zur folgenden Entwicklung der Leitlinie zur Technologieauswahl.

Ein Unsicherheitsfaktor beim beschriebenen Vorgehen zur Generierung einer Literatursammlung besteht im Aufbau der angewandten Filter innerhalb der Datenbanken. So soll die Eingrenzung auf Artikel aus wissenschaftlichen Journalen zwar die Qualität einbezogener Studienergebnisse sicherstellen (vgl. Sauer & Seuring 2023), es können jedoch auch qualitativ hochwertige Ergebnisse, z. B. aus Konferenzbeiträgen, ausgeschlossen werden (vgl. Drucker et al. 2016). Beim Einsatz der spezifischen Suchbegriffs-Kombinationen sollen zudem möglichst alle relevanten, gleichzeitig aber so wenig wie möglich unrelevante Literaturquellen eingeschlossen werden, um so den Aufwand in der folgenden manuellen Selektion zu minimieren (Lavallée et al. 2013). Die Schwierigkeit, diese Ziele miteinander zu vereinbaren, zeigt sich auch bei Palomino et al. (2018): bei der Durchführung strukturierter Literaturanalysen wurden Probleme am häufigsten beim Aufbau der Suchanfrage identifiziert. Hier besteht stets das Risiko zum Ausschluss relevanter Literatur.

Auf Basis dieses Beitrags folgt die qualitative Auswertung der gesichteten Literatur und die strukturierte Gegenüberstellung der identifizierten MC-Technologien. Hierbei deutet sich bereits eine weitere Limitation an: Zur Beantwortung der Forschungsfrage sollen die MC-Technologien letztlich anhand definierter Evaluationskriterien bewertet werden. Es ist aber zu erwarten, dass sich auf Grundlage der aktuell verfügbaren Literatur bei Weitem noch nicht alle Kombinationen von Technologie und Kriterium bewerten lassen. Solche Informationslücken sollen im Rahmen des übergeordneten Promotionsvorhabens, bspw. mithilfe von eigenen Laborstudien sowie gezielten Experteninterviews, zukünftig geschlossen werden.

6. Literatur

- Aqueveque P, Peña G, Gutiérrez M, Gómez B, Germany E, Retamal G, Ortega-Bastidas P (2023) Utilizing Motion Capture Systems for Instrumenting the OCRA Index: A Study on Risk Classification for Upper Limb Work-Related Activities. In: *Sensors*, Volume 23, Issue 17, Article number 7623.
- Ashhar K, Khyam MO, Soh CB (2019) A Multi-Path Compensation Method for Ranging in Wearable Ultrasonic Sensor Networks for Human Gait Analysis. In: *Sensors (Switzerland)*, Volume 19, Issue 62, Article number 1350.
- Badura B, Ducki A, Meyer M, Schröder H (2022) *Fehlzeiten-Report 2022*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Battini D, Persona A, Sgarbossa F (2014) Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management. In: *Computers & Industrial Engineering*, Volume 77, Pages 1–10.
- Berlemann M, Eurich M (2023) Arbeitslosigkeit, Fachkräftemangel und Demografie. In: *Wirtschaftsdienst*, Volume 103, Issue 2, Pages 147–148.
- David GC (2005) Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related Musculoskeletal disorders. In: *Occup Med.*; 55(3): 190–199.

- Drucker AM, Fleming P, Chan A-W (2016) Research Techniques Made Simple: Assessing Risk of Bias in Systematic Reviews. In: *Journal of Investigative Dermatology*, Volume 136, Issue 11, Pages e109-e114, ISSN 0022-202X.
- Lam WWT, Tang YM, Fong KNK (2023) A systematic review of the applications of markerless motion capture (MMC) technology for clinical measurement in rehabilitation. In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Volume 20, Article number: 57.
- Lavallée M, Robillard P-N, Mirsalari R (2014) Performing Systematic Literature Reviews with Novices: An Iterative Approach. In: *IEEE Transactions on Education*, vol. 57, no. 3, pp. 175-181.
- Manghisi VM, Uva AE, Fiorentino M, Bevilacqua V, Trotta GF, Monno G (2017) Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor. In: *Applied Ergonomics*, Volume 65: 481-491.
- Menolotto M, Komaris D-S, Tedesco S, O'Flynn B, Walsh M (2020) Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. In: *Sensors*, 20, 5687.
- Ouzzani M, Hammady H, Fedorowicz Z, Elmagarmid A (2016) Rayyan — a web and mobile app for systematic reviews. In: *Systematic Reviews* (2016) 5:210.
- Palomino M, Dávila A, Melendez K (2019) Methodologies, Methods, Techniques and Tools Used on SLR Elaboration: A Mapping Study. In: *Trends and Applications in Software Engineering. CIMPS 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 865. Springer, Cham.
- Poitras I, Dupuis F, Biellmann M, Campeau-Lecours A, Mercier C, Bouyer LJ, Roy J-S (2019) Validity and Reliability of Wearable Sensors for Joint Angle Estimation: A Systematic Review. In: *Sensors*, Volume 19, Issue 7.
- Roggio F, Ravalli S, Maugeri G, Bianco A, Palma A, Di Rosa M, Musumeci G (2021) Technological advancements in the analysis of human motion and posture management through digital devices. In: *World J Orthop*; 12(7): 467-484.
- Russo RR, Burn MB, Ismaili SK, Gerrie BJ, Han S, Alexander J, Lenherr C, Noble PC, Harria JD, McCulloch PC (2018) How Does Level and Type of Experience Affect Measurement of Joint Range of Motion? In: *Journal of Surgical Education*, Volume 75, Issue 3: 739–748.
- Rybníkář F, Kačerová I, Hořejší P, Šimon M (2023) Ergonomics Evaluation Using Motion Capture Technology—Literature Review. In: *Applied Sciences*; 13(1):162.
- Salisu S, Ruhaiyem NIR, Eisa TAE, Nasser M, Saeed F, Younis HA (2023) Motion Capture Technologies for Ergonomics: A Systematic Literature Review. In: *Diagnostics*, Volume 13, Issue 15, Article number 2593.
- Sauer PC, Seuring S (2023) How to conduct systematic literature reviews in management research: a guide in 6 steps and 14 decisions. In: *Rev Manag Sci* 17: 1899–1933.
- Saunders M, Lewis P, Thornhill A, Bristow A (2019) *Research Methods for Business Students*, Edition 8, Chapter 4: Understanding research philosophy and approaches to theory development. Publisher: Pearson Education.
- Takala J, Hämäläinen P, Saarela KL, Yun LY, Manickam K, Jin TW, Heng P, Tjong C, Kheng LG, Lim S, Lin GS (2014) Global Estimates of the Burden of Injury and Illness at Work. In: *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11:5, 326-337.
- Turner M, Kitchenham B, Brereton P, Charters S, Budgen D (2009) Does the technology acceptance model predict actual use? A systematic literature review. In: *Information and Software Technology*, Volume 52, Issue 5, Pages 463-479.
- VERBI Software (2022) MAXQDA, Version 2022.8. Software für qualitative Datenanalyse, 1989–2023, VERBI Software. Consult. Sozialforschung GmbH, Berlin, Deutschland.
- Whatman C (2012) *Physiotherapy Visual Assessment of Dynamic Alignment during Lower Extremity Functional Screening Tests* (Doctoral Dissertation). Auckland University of Technology.



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