

Wirkungsanalyse einer adaptiven Höhen- und Neigungsanpassung großer Arbeitsobjekte in der manuellen Montage

Maximilian PÄTZOLD

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

Kurzfassung: Der Demonstrator „adaptive Arbeitsstation“ des Instituts für Arbeitswissenschaft ermöglicht die automatische Anpassung der Höhe und Neigung von großflächigen Arbeitsobjekten, wie z. B. Automobiltüren, basierend auf individuellen menschlichen Eigenschaften und der Arbeitsaufgabe. Ein Untersuchungskonzept und -modell zur Analyse der Wirkung des Systems auf die physische Belastung, die physiologische Beanspruchung und die Zykluszeit in Abhängigkeit verschiedener Adaptiongrade wird vorgestellt. Messsysteme und Messinstrumente sowie die erwarteten Ergebnisse werden diskutiert.

Schlüsselwörter: Individualisierung, adaptive Systeme, physische Belastung, physiologische Beanspruchung, muskuloskelettale Erkrankungen, Untersuchungskonzept

1. Einleitung und Motivation

Trotz der fortschreitenden Automatisierung wird menschliche Arbeit auch in Zukunft ein wichtiger Bestandteil flexibler, agiler und wettbewerbsfähiger Produktionssysteme bleiben (Wang et al. 2019; Beuß et al. 2020). Der demografische Wandel und der in Deutschland herrschende Fachkräftemangel bedingen den Schutz der menschlichen Ressourcen durch belastungs- und beanspruchungsgerechte Gestaltung des Arbeitsplatzes (Reinhart et al. 2010). Faktoren wie die steigende Diversität der Belegschaft im produzierenden Gewerbe, das steigende Durchschnittsalter und ein wachsender Anteil an leistungsgewandelten Mitarbeitenden rücken die Individualisierung von Montagearbeitsplätzen zum Erhalt von Produktivität, Gesundheit und Zufriedenheit in den Fokus (Bruder 2010; Fletcher et al. 2020; Reinhart et al. 2010).

In der Praxis werden bestehende Möglichkeiten der Individualisierung nicht immer genutzt, da beispielsweise die ergonomische Anpassung des Arbeitsplatzes zu höheren Nebenzeiten führt (Jagusich et al. 2018). Durch die fortschreitende Automatisierung und Digitalisierung der modernen Produktion ergeben sich neue Forschungsfelder zur Individualisierung von Arbeitsplätzen (Schlund et al. 2018). Adaptive Systeme ermöglichen eine zielgerichtete und automatische Anpassung des Arbeitsplatzes nach menschlichen Eigenschaften und Bedürfnissen ohne eine vorherige Aufforderung oder Autorisierung der Arbeitsperson.

Die adaptive ergonomische Positionierung des Arbeitsobjektes bietet die Chance, verbliebene Potenziale zur Reduktion von physischen Belastungen und die daraus resultierenden physiologischen Beanspruchungen am Arbeitsplatz durch die Vermei-

dung von Körperzwangshaltungen auszuschöpfen, indem die Ausführungsbedingungen der Arbeitsaufgabe verbessert werden (Pätzold 2023). Allerdings fehlen Aussagen und Erfahrungen zu den Effekten von individualisierbarer Arbeitsplatzgestaltung und deren wirtschaftlicher Umsetzung und Nutzung (Schlund et al. 2018). Insbesondere die Wirkung adaptiver Systeme auf die Reduktion physischer Belastungen und physiologischer Beanspruchungen ist noch nicht ausreichend durch Probandenstudien untersucht worden.

Montageassistenzsysteme sind weiterhin meist auf kleinere Bauteile ausgelegt (Jagusich et al., 2018); für die adaptive Positionierung großflächiger Objekte existieren lediglich Konzepte (vgl. Rupprecht & Schlund 2021; Jagusich et al. 2018; Beuß et al. 2020; Cohen et al. 2017; Papetti et al. 2022).

2. Adaptionsansatz

Als Teil des EU-Projektes FELICE wird am Institut für Arbeitswissenschaft der Demonstrator „adaptive Arbeitsstation“ für die Montage großflächiger Arbeitsobjekte am Beispiel der Vormontage von Automobiltüren entwickelt.

Mithilfe von Aktorik wird vor der Belastungsexposition die Höhe und Neigung des Arbeitsobjektes automatisch auf Basis der Körpermaße der Arbeitsperson und der Arbeitshöhe der folgenden Montageoperationen angepasst, um möglichst viele Operationen in einen ergonomischen Arbeitsbereich zu bewegen. Während für kleine Arbeitsobjekte eine einzelne Repositionierung ausreicht, um ergonomische Bedingungen herzustellen, wird angenommen, dass für großflächige Objekte mehrere Repositionierungen notwendig sind, um Körperzwangshaltungen über den gesamten Montagezyklus zu vermeiden (Pätzold 2023).

Kernaspekte der Forschungstätigkeit sind die mehrfache Adaption bzw. Repositionierung des Arbeitsobjektes innerhalb eines Zyklus sowie die Entwicklung von Adaptionslogiken, welche bestimmen, wie Adaptionsprozesse zielorientiert in bestehende Montageabläufe integriert werden können.

Hierzu wurde auf Basis von ergonomischen Standards und Prinzipien ein heuristischer Ansatz zur Bestimmung einer ergonomischen Höhe des Arbeitsobjektes in Abhängigkeit der individuellen Körpermaße des Nutzenden, den Genauigkeitsanforderungen zur Durchführung des Arbeitsschrittes und der Arbeitsaufgabe entwickelt. Als Einflussgrößen in das Modell gehen die Häufigkeit der adaptiven Positionierungsvorgänge während eines Zyklus und der Zeitpunkt dieser Vorgänge ein, welche bestimmen, ob ein Adaptionsprozess zu zusätzlichen Nebenzeiten führt (Pätzold 2023).

Zur Abschätzung der Wirkung und des Potenzials des adaptiven Systems wird am Beispiel der Automobiltürmontage ein Studienkonzept zum Vergleich von vier Ausprägungen des Systems, im Folgenden als Adaptionsgrade bezeichnet, entwickelt:

- a) ein System ohne adaptive Positionierung in einer one-size-fits-all Konfiguration, die auf den durchschnittlichen Körpermaßen der Zielpopulation basiert
- b) ein System, welches sich einmalig im Zyklus auf die individuellen Körpermaße der Arbeitsperson anpasst
- c) eine produktivitätsorientierte Adaptionslogik, die unter Beachtung der Montageschritte und deren Dauer eine mehrfache Arbeitsobjektpositionierung pro Montagezyklus durchführt und die Entstehung zusätzlicher Nebenzeiten durch den

Adaptionsprozess bei der Planung der Häufigkeit und des Zeitpunktes der Adaptionsprozesse vermeidet

- d) eine belastungsorientierte Adaptionslogik, die unter Beachtung der individuellen Eigenschaften des Nutzenden eine mehrfache Arbeitsobjektpositionierung pro Montagezyklus durchführt und Produktivitätseinbußen bei der Planung der Häufigkeit und des Zeitpunktes der Adaptionsprozesse zulässt

3. Forschungsfragen und Hypothesen

Durch das Forschungsvorhaben wird untersucht, wie die aus den zugrundeliegenden Einflussfaktoren abgeleiteten Adaptionsgrade die Wirkung des adaptiven Systems beeinflussen, um Implikationen für den Einsatz adaptiver Systeme in der Praxis abzuleiten. Aus den Forschungslücken werden zwei zentrale Forschungsfragen abgeleitet, zum einen: Wie wird die durch die Montage an großen Arbeitsobjekten hervorgerufene a) physische Belastung und b) physiologische und empfundene Beanspruchung durch eine adaptive Arbeitsobjektpositionierung beeinflusst? Zum anderen: Wie wird die Zykluszeit, bei der Montage großer Arbeitsobjekte durch die adaptive Arbeitsobjektpositionierung beeinflusst?

Abbildung 1 zeigt das Untersuchungsmodell zur Beantwortung der Forschungsfragen auf Basis des erweiterten Belastungs-Beanspruchungs-Konzeptes nach Rohmert (1984).

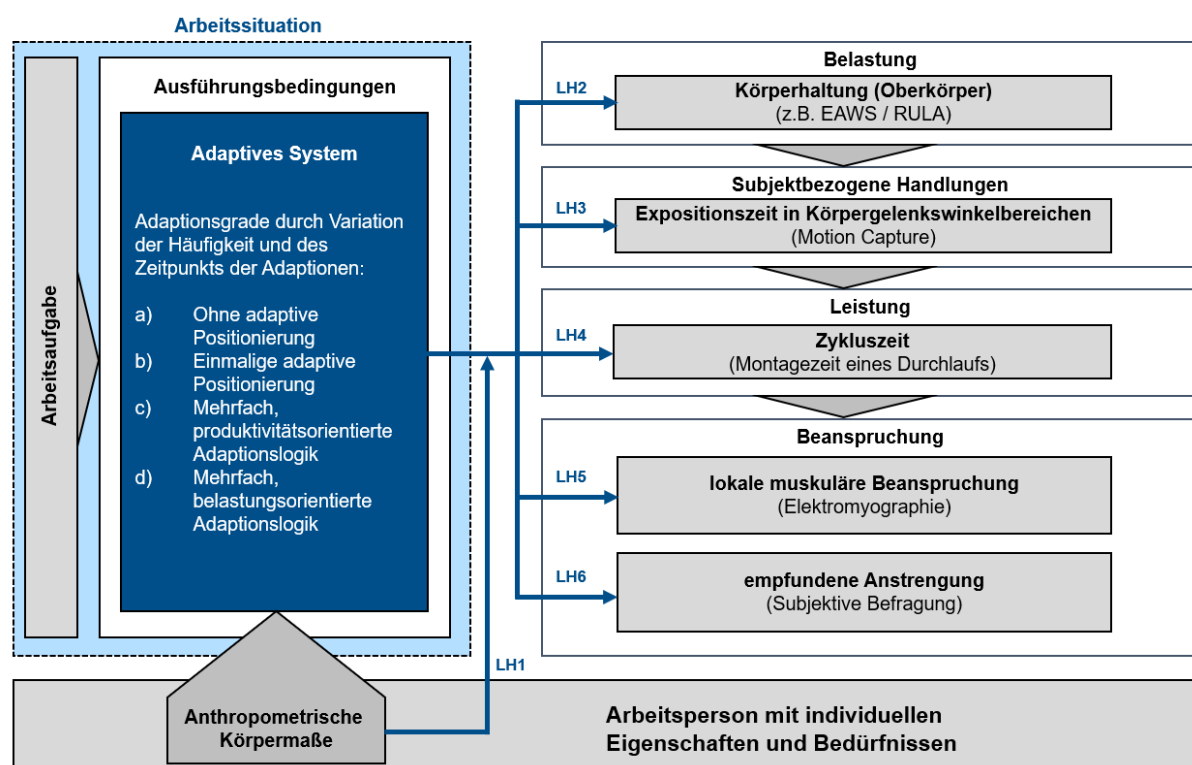


Abbildung 1: Untersuchungsmodell auf Basis des erweiterten Belastungs-Beanspruchungs-Konzeptes nach Rohmert (1984)

Untersucht werden die Auswirkungen der vier Adaptionsgrade auf die aus der Körperhaltung resultierenden Belastungen, die Körpergelenksstellungen während des individuellen Handlungsvollzugs, die Zykluszeit und die objektiven lokalen muskulären Beanspruchungen sowie die global empfundene Beanspruchung. Unter der Annahme, dass die Wirkung des Systems von der Anthropometrie des Nutzenden moderiert wird, werden die folgenden zentralen Leithypothesen abgeleitet:

- LH 1: Die Wirkung des adaptiven Systems auf die Zykluszeit und die untersuchten Belastungs- und Beanspruchungsgrößen steigt, je mehr die Körpermaße der ProbandInnen von der mittleren Körpergröße abweichen, welche die Basis für die one-size-fits-all Konfiguration ist.
- LH 2: Die physische Belastung des Muskel-Skelettsystems, hervorgerufen durch ungünstige Körperhaltungen, unterscheidet sich signifikant zwischen den Adaptionsgraden.
- LH 3: Die prozentuale Aufenthaltsdauer in ergonomisch günstigen Körpergelenkwinkelbereichen unterscheidet sich signifikant zwischen den Adaptionsgraden.
- LH 4: Die Zykluszeit des Montageprozesses unterscheidet sich signifikant zwischen den Adaptionsgraden.
- LH 5: Die lokale physiologische Beanspruchung des Muskel-Skelettsystems unterscheidet sich signifikant zwischen den Adaptionsgraden.
- LH 6: Die subjektiv empfundene Anstrengung unterscheidet sich signifikant zwischen den Adaptionsgraden.

4. Methodenauswahl und erwartete Ergebnisse

Aufgrund der Abhängigkeit des Adaptionsprozesses von individuellen Eigenschaften des Nutzenden werden im *Robotics and adaptive workstation laboratory* des Instituts für Arbeitswissenschaft Vorversuche im Within-Subject-Design durchgeführt. Ermüdung während des Versuchs wird durch Kurpausen und einer Randomisierung des Versuchsablaufs vorgebeugt. Im untersuchten Beispielprozess wird die Vormontage der Fahrertür eines großen Pkws von JEEP, Stellantis N.V., untersucht.

Zur Bewertung der Belastung des Montagezyklus werden etablierte ergonomische Screeningverfahren herangezogen. Zur Bewertung der Körperhaltung ist die Verwendung des Ergonomic Assessment Worksheets (EAWS) Sektion 1 oder Rapid Upper Limb Assessment (RULA) zu prüfen. Gegen EAWS als präferiertes Screening-Verfahren zur Bewertung der Körperhaltung spricht der hohe Aufwand, die Betrachtung des gesamten Körpers und das nötige Qualifizierungsniveau für dessen Anwendung. Verfahren wie RULA und REBA können alternativ automatisiert mittels eines Motion Capture Systems (Xsens Awinda, Movella Inc.) durchgeführt werden.

Eine Simulationsstudie des Montageprozesses mit ema Work Designer hat gezeigt, dass für ProbandInnen mit niedriger Körpergröße eine stärkere Reduktion des EAWS Scores zu erwarten ist (Emmel 2023). Dies deutet in Bezug auf LH 1 darauf hin, dass eine Clusterung der ProbandInnen anhand ihrer anthropometrischen Eigenschaften, wie des Perzentils der Körpergröße, in Betracht gezogen werden muss.

Zur Untersuchung des individuellen Handlungsvollzugs der Versuchsteilnehmenden wird ein Xsens Awinda Motion Capture System verwendet. Entgegen der Untersuchung der Belastung aufgrund der Gesamtkörperhaltung findet die lokale Betrachtung

der einzelnen Körpergelenke und der prozentual an der Zykluszeit gemessenen Expositionszeit in kritischen Stellungen statt. Die Einordnung der Winkelbereiche erfolgt nach einem Ampelschema; die Definition der Grenzwerte der Winkelbereiche basiert auf ergonomischen Standards (ISO 11226, DIN EN 1005-4) nach der Zusammenstellung und Ergänzung durch IFA (2015). Der Vorteil der segmentierten Betrachtung liegt in der Berücksichtigung weiterer Körperzonen wie der Lage des Kopfes und der Halskrümmung, welche nicht in EAWS Sektion 1 berücksichtigt werden. In einer Proof-of-Concept Studie wurde für ein System mit einer einzigen Höhen- und Neigungsadaption gegenüber einer one-size-fits-all Konfiguration eine statistisch signifikante Verschiebung in günstigere Körpergelenkwinkelbereiche des Nackens und der Schultergelenke nachgewiesen. Die Aufenthaltsdauer in den roten Winkelbereichen von Flexion/Extension des dominanten Schultergelenks reduzierte sich im Mittel um 31,62 % ($p < 0,001$). Für die Flexion/Extension des Nackens wurde im Mittel eine um 35 % geringere Verweildauer in roten Winkelbereichen gemessen ($p < 0,001$) (Eggert 2021).

Zur Erhebung der globalen physiologischen Beanspruchung wird eine subjektive Befragung durchgeführt. Die Borg CR10 Skala eignet sich für die Erfassung der meisten Arten von Wahrnehmungen und Gefühlen mit Intensitätsvariationen wie das Anstrengungsempfinden und Schmerzen bei physischer Arbeit (Williams 2017). Alternativ kann eine Bewertung mit NASA TLX erfolgen. Dieses Verfahren beinhaltet neben den körperlichen Anforderungen auch weitere Aspekte des Forschungsvorhabens wie die empfundenen zeitlichen Anforderungen, die Leistung und die Anstrengung.

Die Wirkung auf die lokale muskuläre Beanspruchung der oberen Extremitäten und des unteren Rückens wird mittels Elektromyographie (Ultium EMG, Noraxon USA) geprüft. Zur Interpretation der Daten empfiehlt sich die wiederholte Messung und Analyse einzelner Montageschritte, welche zu Körperzwangshaltungen (Überkopfarbeit, Rumpfbeugung und -verdrehung) führen können, soweit Ermüdung vermieden werden kann. Die auf die maximale Muskelkontraktion normalisierte elektrische Aktivität kann zur Ermittlung der physiologischen Kosten und der damit einhergehenden ergonomischen Qualität des Arbeitsplatzes herangezogen werden (Steinhilber et al. 2022).

5. Fazit und Ausblick

Am Institut für Arbeitswissenschaft wurde der Demonstrator „adaptive Arbeitsstation“ zur adaptiven Positionierung großer Arbeitsobjekte entwickelt. Am Beispiel der Automobiltürvormontage wird ein Konzept zur Untersuchung der Wirkung des Systems vorgestellt.

Das zugrundeliegende Untersuchungsmodell, das Untersuchungskonzept und die Wahl der Untersuchungsmethoden soll anhand von Vorstudien mit ca. 15 Probanden detailliert werden. Neben der Untersuchung von Belastungs- und Beanspruchungsgrößen ist beispielsweise die Untersuchung der Akzeptanz des adaptiven Systems in Abhängigkeit des Adaptiongrades als weitere Untersuchungsvariable zu prüfen.

6. Literatur

Beuß F, Jagusch K, Sender J, Flüge W & Coya S (2020) Selbstlernende Arbeitsplatzsysteme für die Montage. In Fraunhofer-Gesellschaft PUBLICA (Bd. 25, issue 3, S.21-24). Fraunhofer IGP

- Bruder R (2010) Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Neue Arbeitsund Lebenswelten gestalten. Dortmund: GfA-Press 2010, S. 29–32
- Cohen Y, Faccio M, Galizia FG, Mora C & Pilati F (2017) Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 14958–14963.
- Eggert HE (2022) Implementation und Evaluation der ergonomischen und nutzeradaptiven Positionierung von Werkstücken an einer adaptiven Arbeitsstation. TU Darmstadt, Darmstadt.
- Emmel J (2023) Simulation des Einflusses einer adaptiven Arbeitsstation auf die manuelle Automobiltürmontage. TU Darmstadt, Darmstadt.
- Fletcher SR, Johnson T, Adlon T, Larreina J, Casla P, Parigot L, Alfaro PJ & Otero M del M (2020) Adaptive automation assembly: Identifying system requirements for technical efficiency and worker satisfaction. In Computers & Industrial Engineering (Bd. 139, S. 105772). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.036>
- IFA (2015) Bewertung physischer Belastungen gemäß DGUV-Information 208–033 (bisher: BGI/GUV-I 7011) (Anhang 3), 2015(208–033 [1].
- Jagusck, K, Beuß, F, Sender, J, & Flügge, W (2018) Intelligente Montageassistentz. In Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (Bd. 113, Issue 6, S. 369–372). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.3139/104.111923>
- Papetti A, Ciccarelli M, Scoccia C & Germani M (2022) Optimizing the operator posture by a smart workplace design. Procedia Computer Science, 204, 532–539.
- Pätzold M (2023) Adaptive Positionierung großer Arbeitsobjekte in der industriellen Montage zur Reduktion von physischen Belastungen. GfA-Press. <https://doi.org/10.26083/TUPRINTS-00023640>
- Reinhart, G, Spillner, R, Egbers, J, Schilp, J (2010) Individualisierung von Montagearbeitsplätzen, Werkstattstechnik online 100 (H. 9), S. 665ff
- Rohmert W (1984) Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In: ZfA, 38(4), S. 193–200
- Rupprecht P & Schlund S (2021) Taxonomy for Individualized and Adaptive Human-Centered Workplace Design in Industrial Site Assembly. In Advances in Intelligent Systems and Computing (S. 119–126). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68017-6_18
- 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>
- Steinhilber B, Jäger M, Schumann B, Luger T, Anders C, Bradl I, Treede R, Kluth K, Seibt R (2022) Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft. In AWMF Online (002–016).
- Wang L, Gao R, Váncza J, Krüger J, Wang XV, Makris S & Chrysosouris G (2019) Symbiotic human-robot collaborative assembly. CIRP Annals, 68(2), 701–726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>
- Williams N (2017) The Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) scale. In Occupational Medicine (Bd. 67, Issue 5, S. 404–405). Oxford University Press (OUP). <https://doi.org/10.1093/occmed/kqx063>

Danksagung: Diese Forschungsarbeit wurde mit Mitteln aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union unter der Finanzierungsnummer 101017151 gefördert. Diese Arbeit gibt nur die Meinung des Autors wieder. Die EU-Kommission ist nicht verantwortlich für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen.



Finanziert von der
Europäischen Union



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