

Lessons Learned aus dem Prototypendesign einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Steuerung verschiedenartiger Maschinen für die Produktionslogistik

Ralph BAIER¹, Alexander MERTENS¹, Verena NITSCH^{1,2}

¹ *Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen University
Eilfschornsteinstraße 18, D-52062 Aachen*

² *Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie
Campus-Boulevard 55-57, D-52074 Aachen*

Kurzfassung: In der Produktion teilen sich Arbeitspersonen und Roboter zunehmend gemeinsame Arbeitsräume. Bislang mangelt es noch an Erkenntnissen zur Entwicklung gebrauchstauglicher Mensch-Maschine Schnittstellen, mit denen verschiedenartige Maschinen auch bei regelmäßigen, kurzzyklischen Wechseln medienbruchfrei bedient werden können. In diesem Artikel wird der Entwicklungsprozess einer prototypischen Schnittstelle beschrieben, die translatorische und rotatorische Bewegungen interpretieren kann. Zudem ist die Befehlseingabe per Gesten und über weitere Schaltflächen möglich.

Schlüsselwörter: Mensch-Maschinen-Schnittstelle, Prototypendesign, Maschinensteuerung, Internet of Production, Mensch-Roboter-Interaktion

1. Einleitung

Roboter sind aus der modernen Produktion kaum mehr wegzudenken. Deutschland verfügt dabei in Europa über die höchste Roboterichte und belegt damit weltweit Platz 4 (IFR 2021). Zunehmend arbeiten diese Roboter nicht mehr autark in abgegrenzten Zellen, sondern teilen sich den Arbeitsraum mit Arbeitspersonen. Als ein Konzept für die Produktion der Zukunft sei beispielhaft das Line-less Mobile Assembly System (LMAS) genannt, bei dem sich zur Erfüllung eines (Teil-)Montageauftrags kleine, mobile Roboter selbstständig zu temporären Montagestationen organisieren (Buckhorst et al. 2021). Hier gewinnt die Thematik Mensch-Roboter-Interaktion, insbesondere die Steuerung von mehreren unterschiedlichen Robotern und anderen Maschinen im Rahmen von Montagetätigkeiten, immer weiter an Bedeutung.

Diese Thematik wird unter anderem im von der DFG geförderten Exzellenzcluster Internet of Production (IoP) erforscht. Im Folgenden soll ein Anwendungsfall im IoP beschrieben werden, der exemplarisch arbeitswissenschaftliche Herausforderungen bei der Konstruktion von Mensch-Maschinen-Schnittstellen (MMS) illustriert: An einer Produktionsstation sollen zwei Baugruppen aus verschiedenen Produktionslinien montiert und an die nachgelagerte Produktionsstation weitergereicht werden. Eine Baugruppe erreicht die Arbeitsstation auf einem fahrerlosen Transportsystem (FTS), die andere hingegen mithilfe eines Deckenkrans. Bei der robotergestützten Montage kommt es auf hohe Präzision an, wobei die Schwierigkeit insbesondere in den großen Abmaßen und Massen der Baugruppen liegt: Erstens sind entsprechend dimensionierte Handhabungseinrichtungen erforderlich, deren Bedienung zunehmend anspruchsvoller wird und die zusätzlich ihre Trägersystemmasse (Totlast)

miteinbringen. Zweitens leidet die Übersicht, vor allem bei komplexen Geometrien, unter großen Abmessungen. Überdies treten aufgrund geometrischer Gesetzmäßigkeiten Abweichungen durch Winkelversatz stärker hervor. Drittens sind große Massen schwingfähig, wodurch sie schwieriger zu positionieren sind. Darüber hinaus stellen schwebende und bewegte Massen auch immer eine Gefahrenquelle dar.

Zur Handhabung der Teile steuert die Arbeitsperson beide Maschinen typischerweise manuell mit klassischen Steuergeräten. Der Anwendungsfall ist geprägt von kurzen Taktzeiten und somit häufigen Wechseln der Maschinen, sodass hoher Leistungsdruck herrscht. Um einer Arbeitsperson das Bedienen verschiedenartiger Maschinen übergangslos und im schnellen Wechsel zu ermöglichen, soll eine geeignete MMS konstruiert werden. Durch die Verwendung nur eines Eingabegeräts entfällt neben der Wechselzeit auch der Medienbruch. Somit wird Zeit beim Umschalten auf eine andere Maschine aber auch bei der Eingewöhnung eingespart. Durch die konsistente Schnittstelle entfallen zudem Fehlerquellen wie die unkorrekte Interpretation einer Befehlseingabe. Gegenstand dieser Publikation ist die Darstellung des Prototypdesigns eines Eingabegeräts für den genannten Einsatzbereich. Als besondere Herausforderung erweist sich hier die Situations-dynamik: Sowohl die Arbeitsperson als auch die beteiligten Maschinen verschieben und verdrehen ihre Körperkoordinatensysteme gegeneinander und gegen das globale Koordinatensystem des Gesamtsystems.

Aus arbeitswissenschaftlicher Sicht stellen sich hierbei unter anderem die Fragen nach der hierdurch auftretenden Beanspruchung in Abhängigkeit von der Aufgabenzahl und -komplexität sowie nach den sicherheitsrelevanten Aspekten, insbesondere nach der Fehlerrobustheit. Hinsichtlich dieser Gesichtspunkte soll das Eingabegerät nach Abschluss der Entwicklung evaluiert werden.

2. Methoden

Das zu entwickelnde Eingabegerät wird als cyber-physisches mechatronisches System (CPMS) nach VDI/VDE 2206 aufgefasst. Entsprechend ist das konstruktive Vorgehen an der VDI 2221 in Verbindung mit genannter Norm ausgerichtet:

Im ersten Schritt werden die Anforderungen an das Eingabegerät ermittelt (Bender & Gerike 2021). In Verbindung mit dessen Zweck wird hieraus die Funktionsstruktur abgeleitet (Roth 2000; Roth 2001). Auf dieser Grundlage werden nach mehreren Schritten Prinzipkombinationen (Prinziplösungen) durch systematische Kombination generiert (Koller 1998; Pahl et al. 2013). Durch paarweisen Vergleich der gefundenen Prinziplösungen wurde die zum Prototyp auszuarbeitende Lösung ermittelt (Lindemann 2009). In den nächsten Schritten wird die gewählte Prinziplösung als Entwurf durch Konkretisierung der Produktgestalt ausgearbeitet (Ponn & Lindemann 2011; Pahl et al. 2013). Aus Platzgründen wird nur die gewählte Lösung vorgestellt; Auswahl- und Bewertungsmethoden sollen nicht Gegenstand dieser Publikation sein.

3. Ergebnisse

3.1 Anforderungsanalyse

Als Grundlage für die Anforderungsanalyse dient ein Demonstrationsvideo der sich gegenwärtig im Betrieb befindenden Montagelinie. Es zeigt detailliert den Prozess-

ablauf und die beteiligten menschlichen Akteure und Maschinen, der eingangs beschriebenen Montagestation. Zur Erhebung der Anforderungen kamen unter anderem die Szenario-Technik nach Gausemeier (Bender & Gerike 2021), der Wechsel der Perspektive (Rupp 2007) sowie die Analyse existierender Eingabegeräte zum Einsatz.

Für den Anwendungsfall sind die Freiheitsgrade der beteiligten Maschinen in besonderem Maße wichtig (s. Abbildung 1). Das FTS kann sich durch die Mecanum-Räder omnidirektional in der Ebene bewegen sowie eine Drehung um seine Hochachse, das sogenannte Gieren, ausführen. Das sind drei Freiheitsgrade: zwei translatorische und ein rotatorischer. (Ullrich & Albrecht 2019) Ein Einträger-Lauf- oder Deckenkran verfügt hingegen über drei translatorische Freiheitsgrade. Er kann sich als Ganzes nur entlang seiner Längsachse bewegen. In Richtung der Querachse lässt sich zusätzlich die (Lauf-)Katze verfahren – jenes Teil, das auch die Seile (Tragmittel) führt. Über die Seile kann das Lastaufnahmemittel respektive die Lastaufnahmeeinrichtung angehoben und abgesenkt werden. (Griemert & Römisch 2020) Weiterhin soll ein sechssachsiger seriellkinematischer Roboter aufgrund der weiten Verbreitung in der Industrie hinzugenommen werden. Dieser Typ verfügt über sechs Freiheitsgrade und kann jeden Punkt in seinem Arbeitsraum in beliebiger Orientierung erreichen. (Pott & Dietz 2019)

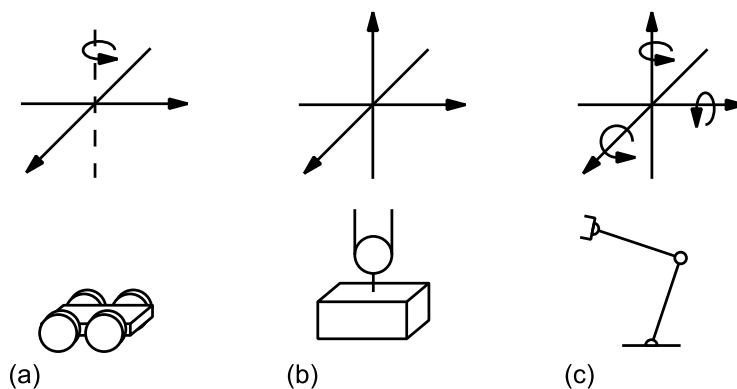


Abbildung 1: (a) 3 Freiheitsgrade eines FTS mit Mecanum-Rädern; (b) 3 Freiheitsgrade eines Einträger-Lauf- oder Deckenkran; (c) 6 Freiheitsgrade eines Industrieroboters.

Die Anforderungen ergeben sich somit aus den oben beschriebenen Aufgaben des Anwendungsfalls. Auszugsweise seien nachfolgende Anforderungen ausformuliert: (1) Zunächst müssen Eingaben zur Positions- sowie Orientierungsänderung möglich sein. Für die Pose, also die Position plus Orientierung im Raum, müssen sechs Freiheitsgrade erfasst werden: drei translatorische und drei rotatorische. (2) Es muss sichergestellt werden, dass die Orientierung von Eingabegerät zu gesteuerter Maschine jederzeit korrekt ermittelt und kompensiert wird.

3.2 Funktionsstruktur und Prinziplösung

Als Gesamtfunktion für das Eingabegerät lässt sich das Entgegennehmen von Eingaben identifizieren. Durch Funktionszerlegung nach Pahl/Beitz können die Teilfunktionen und deren Relationen zueinander identifiziert werden, die in Verbindung miteinander die Funktionsstruktur bilden (vgl. Bender & Gerike 2021). In Abbildung 2 ist diese dargestellt.

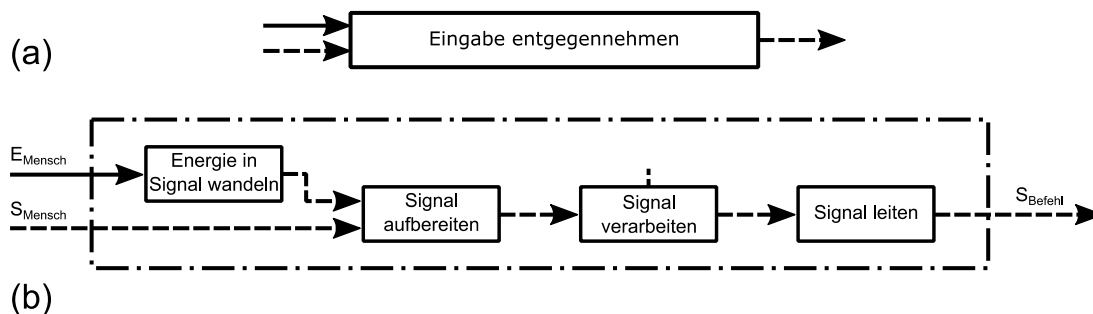


Abbildung 2: Funktionsstruktur mit (a) Gesamtfunktion und (b) Teilfunktionen des Eingabegeräts.

Auf Basis der gefundenen Anforderungen und der Funktionsstruktur lässt sich ein morphologischer Kasten erstellen (s. Abbildung 3).

		Ausprägung				
		1	2	3	4	5
Merkmal	Installation	ortsfest	frei beweglich	am Körper getragen		
	Translation	optisch	Beschleunigung	Winkel		
	Rotation	optisch	Kraft	Drehmoment	Winkel	
	Tastendruck	ohne	kapazitiv	piezoelektrisch	el. Widerstand	berührungslos
	Nothalt	aktiv	passiv	berührungslos		
	Kommunikation	ohne	Ethernet	WiFi	Bluetooth	
	...					

Abbildung 3: Ausschnitt aus dem morphologischen Kasten zur Lösungsfindung durch systematische Kombination verschiedener Komponenten.

Exemplarisch wird die ausgewählte Lösung generiert: Ziel dieser Kombination ist ein kabelloses und mobiles Eingabegerät. Es soll nicht ortsfest verbaut oder aufgestellt, sondern am Körper getragen werden. Für die Bewegungsdetektion wird Sensorik gewählt, die diese indirekt über Kräfte messen: Die translatorischen Bewegungen werden mittelbar über die Beschleunigung erfasst und rotatorischen mithilfe des gyroskopischen Effekts. Tastendrucke werden durch kapazitive Sensoren registriert und der Nothalt ist über einen Notausschalter realisiert. Da es sich um ein tragbares Gerät handelt, wird WiFi zur Kommunikation eingesetzt.

3.3 Gestaltung

Als Basis des Eingabegeräts dient ein Einplatinencomputer mit verschiedenen Sensoren und Erweiterungsplatinen. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 4 gegeben. Die Eingabe soll mithilfe eines Handschuhs erfolgen. Um nicht hinderlich zu sein, befindet sich die Sensorik auf dem Handrücken und die restliche Technik am Unterarm.

Entsprechend der Anforderungen ist das Eingabegerät mit einem 3-Achs-Beschleunigungssensor und 3-Achs-Gyroskop ausgerüstet, sodass alle Raumachsen gemessen werden können. Hinzu kommen Berührungssensoren an den opponierten Fingerkuppen, die mit dem Daumen gedrückt werden. Hierdurch ergeben sich vier 1D-Eingabeelemente, von denen drei frei mit eigenen Makros belegt werden können. Von zusätzlichen, berührepfindlichen Elementen – wie entlang der daumenzugewandten Seite des Zeigefingers – wird zur Vermeidung von Fehleingaben abgesehen.

Die gesamte Software läuft auf dem Eingabegerät, um einerseits die Befehlsverarbeitung schnellstmöglich durchführen zu können und andererseits die Daten-

verbindung minimal zu belasten, sodass die Funktion auch bei mäßiger Verbindungsqualität sichergestellt werden kann.

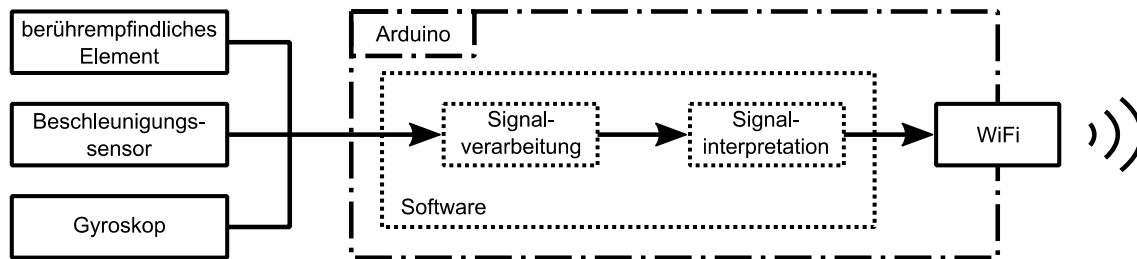


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Eingabegeräts.

Wird der Zeigefinger berührt, so berechnet die Software Steuerungseingaben. Translatorische Bewegungen werden durch die Integration aus den Beschleunigungen ermittelt und rotatorische mithilfe des Gyroskops. Dies ist vergleichbar mit dem Ziehen mit gedrückter Maustaste. Zudem gibt es beim Ausführen der Bewegungen eine Auslöseschwelle, um ungewollte Eingaben zu verhindern, und die Erdbeschleunigung wird kompensiert. Für die Umsetzung der Gesten wurde auf größtmögliche Ähnlichkeit zur angedachten Bewegung der Maschine geachtet – vergleichbar mit dem Ansatz zur Gestensteuerung von Drohnen (Schelle & Stütz 2016). Die Benutzung soll natürlich und intuitiv wirken: Translatorische Bewegungen der Maschinen werden durch Bewegungen der Hand im Raum ausgelöst und Rotation durch das Drehen der Hand um die entsprechende Achse.

Der Nothalt wird durch Andrücken der Finger an die Handinnenfläche ausgelöst. In diesem Falle lösen drei oder mehr Sensoren zugleich aus, was die Funktion auch bei einem defekten Sensor garantiert.

Die Orientierung des Eingabegeräts im Raum beziehungsweise relativ zu den zu steuernden Maschinen zu wahren, stellt eine kritische Funktion dar. Zunächst ist vorgesehen, die Sensoren zu nutzen, um die Bewegung des Geräts nachzuvollziehen und aus der zurückgelegten Bahn, die aktuelle Orientierung zu berechnen. Relevant sind hierbei lediglich Rotationen. Zu Beginn des Prozesses ist es bei diesem Verfahren nötig, eine Kalibrierung vorzunehmen. Von Zeit zu Zeit muss die Kalibrierung wiederholt werden, da sich aufgrund von Messungenauigkeiten sowie Rundungsfehlern etc. diese Kompensation der Verdrehung verschlechtert.

Es sei abschließend hervorgehoben, dass Fehlerrobustheit als eine wichtige Zielgröße des Systems, durch Eindeutigkeit und Reduktion bei der Bedienung und den Bedienelemente angestrebt wird: Gemeint ist, dass zum einen Gesten ausreichend verschieden und damit deutlich unterscheidbar sind und zum anderen die Bedienelemente vereinzelt an leicht zu erreichenden Stellen angebracht werden. Zudem werden ungültige oder uneindeutige Eingaben schlicht verworfen und es wird nicht versucht, einen gültigen Befehl, beispielsweise durch das Anwenden einer Heuristik, zu erzeugen.

4. Diskussion und Ausblick

Der Prototyp wurde primär für die Aufgabe entwickelt, eine Bewegungs- und Positionierungsaufgabe mit verschiedenartigen Maschinen auszuführen. Entsprechend dieser Anforderungen ist das Eingabegerät auf das Erfassen von räumlichen Eingaben eingerichtet. Durch die Verwendung von Gesten oder die

Übertragung von Funktionsweisen anderer Eingabegeräte – wie das Ziehen und Verschieben mittels gedrückter Maustaste – wird eine weitestgehend intuitive Bedienung angestrebt.

Der Prototyp erfüllt damit alle gestellten Anforderungen. Zudem ist die Adaption auf weitere Maschinen durch das Hinzufügen von Makros und eigenen Gesten in der Software möglich.

Gegenstand des nächsten Entwicklungsschritts wird die Frage nach der Informationsausgabe an den Menschen sein.

Zur Evaluierung des Eingabegeräts zur Hauptsache in den Dimensionen Gebrauchstauglichkeit, kognitive Beanspruchung und Fehlerrobustheit soll eine Simulation eingesetzt werden. Diese erlaubt zudem die Erprobung verschiedener Szenarien, insbesondere solche, die beispielsweise die Montage der Zukunft und deren Dynamik abbilden. Darüber hinaus sollen verschiedene Bedienstrategien in Form von Gestensätzen etc. gegeneinander verglichen werden.

5. Literatur

- Bender B, Gerike K (2021) Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin: Springer.
- Buckhorst AF, Montavon BL, Wolfschläger D, Buchsbaum MSK, Shahidi SA, Petruck H, Kunze IS, Pennekamp J, Brecher C, Hüsing M, Corves B, Nitsch V, Wehrle K, Schmitt RH (2021) Holarchy for line-less mobile assembly systems operation in the context of the internet of production. In: Procedia CIRP 99:448-453.
- Elmenreich W (2002) An introduction to sensor fusion. In: Vienna University of Technology 502:1-28.
- Griemert R, Römisch P (2020) Fördertechnik – Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen. Berlin: Springer.
- International Federation of Robotics (IFR) (2021) Deutschland zählt zu den Top-10 automatisierten Ländern weltweit. Pressemitteilung. Frankfurt: Selbstverlag.
- Koller R (1998) Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Berlin: Springer.
- Lindemann U (2009) Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin: Springer.
- Pahl G, Beitz W, Schulz HJ, Jarecki U (2013) Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin: Springer.
- Ponn J, Lindemann U (2011) Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. Berlin: Springer.
- Pott A, Dietz T (2019) Industrielle Robotersysteme. Berlin: Springer.
- Roth K (2000) Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band I. Berlin: Springer.
- Roth K (2001) Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band II. Berlin: Springer.
- Rupp C (2007) Requirements-Engineering und -Management – professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis. München: Hanser.
- Schelle A, Stütz P (2016) Modelling visual communication with UAS. In: International Workshop on Modelling and Simulation for Autonomous Systems. Cham: Springer, 81-98.
- Ullrich G, Albrecht T (2019) Fahrerlose Transportsysteme – Eine Fibel mit Praxisanwendungen zur Technik für die Planung. Berlin: Springer.
- VDI/VDE, Verein Deutscher Ingenieure/Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (2021) Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. VDI/VDE 2206.
- VDI, Verein Deutscher Ingenieure (2019) Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Modell der Produktentwicklung. VDI 2221 Blatt 1.
- VDI, Verein Deutscher Ingenieure (2019) Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse. VDI 2221 Blatt 2.

Danksagung: Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2023 Internet of Production – 390621612.



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