

Potenzialanalyse zur Digitalisierung der Ergonomiebewertung industrieller Arbeitsplätze mittels Motion-Capturing – Ergebnisse der Validierungsstudie

Ralph HENSEL, Micha STEINMETZ, Bastian SIELAFF,
Lukas HAUSMANNINGER, Mathias KEIL

*AUDI AG, Industrial Engineering Methoden
Ettinger Straße, D-85045 Ingolstadt*

Kurzfassung: Im Rahmen der Digitalisierungsstrategie des Industrial Engineerings arbeitet die AUDI AG an der Implementierung eines Motion-Capturing-Systems für die Ergonomieanalyse mit dem Ziel der Steigerung von Effizienz und Qualität der Planungsprozesse. Die vorliegende Studie dient dem Zweck, sowohl Hardware als auch Software eines Inertialsensor-basierten (IMU) Motion-Capture-Systems in einem mehrstufigen Konzept zu validieren, um dessen Potenzial zur Arbeitsplatzanalyse und -gestaltung mittels des Audi-eigenen Ergonomiebewertungsverfahrens APSA zu eruieren. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass das Messsystem sowohl bezüglich Präzision (Abweichung: $0,45 \pm 0,51^\circ$) als auch Richtigkeit (Abweichung: $4,69 \pm 4,14^\circ$) valide Ergebnisse liefert. Das Ergebnis der Softwarevalidierung zeigt auf, dass sich die Berechnung der AXS-Software nur geringfügig von denen der Pen- & Paper-Methode der Arbeitsplatzstrukturanalyse (APSA) unterscheidet. Insgesamt betrachtet verdeutlicht die vorliegende Validierungsstudie das Potenzial von Motion-Capture-Systemen zur Digitalisierung ergonomischer Arbeitsplatzanalysen, um Effizienz der Bewertungsprozesse sowie Objektivität der Bewertungsergebnisse zu steigern.

Schlüsselwörter: Motion-Capturing, Ergonomiebewertung, Digitalisierung

1. Einleitung

Die Digitalisierungsstrategie von Audi's Industrial Engineering (IE) erfordert die Weiterentwicklung existierender Planungsmethoden, die Implementierung innovativer digitaler Planungstools und die Etablierung automatisierter Auswertungsroutinen im Produktionsplanungsprozess, mit dem Ziel, sowohl Geschwindigkeit als auch Qualität des Planungsprozesses weiter zu steigern. Bei der AUDI AG zeichnet die IE-Abteilung für die Gestaltung effizienter Produktionsprozesse und ergonomischer Arbeitsplätze verantwortlich. Hierfür kommt die unternehmenseigene Arbeitsplatzstrukturanalyse (APSA), zur ergonomischen Bewertung der gewerblichen Arbeitsplätze zum Einsatz (Bogus & Dorn 2010), mit deren Hilfe die physische Arbeitsbelastung am Arbeitsplatz bewertet wird. Dabei wird die Arbeitsbelastung für eine gegebene Arbeitsmethode bewertet, welche gemäß einem bestimmten Produktionsplan (Menge und Produktionsmix) ausgeführt wird, in Abhängigkeit von den jeweiligen Arbeitsbedingungen.

Derzeit werden im Rahmen der APSA ergonomische Informationen und Prozessdaten mit unterschiedlichen Methoden getrennt erfasst. Audi untersucht derzeit das

Potenzial der Bewegungserfassung mittels Motion-Capturing (MoCap), um zukünftig alle notwendigen Prozessinformationen simultan, schnell und einfach aufnehmen zu können, mit dem Ziel, automatisiert Ergonomieanalysen zu generieren. Im Rahmen der computergestützten Ergonomie (Bös 2007) lassen sich mithilfe von MoCap zudem auch dynamische und natürliche Bewegungsinformationen für menschliche Simulationswerkzeuge, wie imk ema, gewinnen (Foxlin 2002). Hierfür ließen sich zwei unterschiedliche MoCap-Technologien anwenden: zum einen optische Systeme, die beispielsweise über am Mitarbeiter angebrachte Marker dessen Arbeitsbewegungen aufzeichnen, und zum anderen durch nicht-optische, wie beispielsweise Inertialsensor- oder magnetische Systeme (Schaub & Ghezel-Ahmadi 2007). Die AUDI AG evaluiert ein inertialsensorbasiertes (Inertial Measuring Unit: IMU) MoCap-System der Firma AXS Motionsystem Kft. (Ungarn) in einem umfassenden Validierungsprozess. Die Ergebnisse der Validierungsstudie werden in dieser Veröffentlichung vorgestellt.

2. Methoden

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die in der Validierungsstudie verwendeten Methoden. Beschrieben werden die eingesetzten Ergonomiebewertungstools, APSA und das AXS-MoCap-System, das Vorgehen bei der Messvalidierung sowie das Verfahren der statistischen Auswertung.

2.1 Arbeitsplatz-Struktur-Analyse (APSA)

Um systematisches Vorgehen bei der ergonomischen Bewertung der Industriearbeitsplätze zu gewährleisten, wird bei Audi die APSA genutzt. Dabei handelt es sich um ein intern entwickeltes Ergonomiebewertungstool, das auf der Systematik des Automotive Assembly Worksheets (Schaub & Ghezel-Ahmadi 2007) basiert. Es ermöglicht die Berücksichtigung von Körperhaltungen, Kräften und manueller Lastenhandhabung. Die Bewertung der einzelnen ergonomischen Kriterien ergibt einen Gesamtrisikowert, der durch ein Ampelsystem veranschaulicht wird. Dieses visualisiert die Anforderungen an die Arbeitsplatzgestaltung und hilft, notwendige organisatorische Maßnahmen (Personaleinsatz, Job-Rotation, etc.) abzuleiten (Bogus & Dorn 2010).

2.2 Motion-Capturing

In der vorliegenden Studie wurde ein IMU MoCap-System (AXS Motionsystem Kft., Ungarn) untersucht, das für die Erfordernisse von Audi konfiguriert wurde. Dieses wurde speziell für den Einsatz im industriellen Umfeld entwickelt und zeichnet sich durch eine robuste Bauweise aus. Überdies wird es weder von Magnetfeldern, die durch Maschinen in der Produktion verursacht werden, beeinflusst, noch stört es selbst dort vorhandene technologische Einrichtungen. Dies ist möglich, da die einzelnen Sensoren nicht über WLAN, sondern durch Kabel miteinander verbunden sind. Das AXS-MoCap-System besteht aus 18 IMUs, die auf definierten Körperteilen platziert werden.

Jede Sensoreinheit misst sowohl Geschwindigkeit als auch Winkeländerungen im Raum. Ein IMU-Sensor besteht aus einem Gyroskop und einem Beschleunigungs-

sensor, die Winkelgeschwindigkeit und Drehwinkel bzw. lineare Beschleunigung bestimmen (Ahmad et al. 2013). Erfasste Bewegungsdaten werden vom System verarbeitet und in einen Datenstrom ergonomischer Einflussfaktoren umgewandelt. Der Datenstrom kann beispielsweise basierend auf APSA automatisch interpretiert werden.

2.3 Validierungskonzept und Auswertung

Um den Hauptaspekten einer Messung gerecht zu werden, wurde die Hardware auf Richtigkeit, Präzision und Stabilität untersucht (AIAG 2010). Des Weiteren wurde die Software auf Übereinstimmung mit den Regeln ergonomischer Bewertungstools überprüft. Hierfür wurden die Ergebnisse der Risikoeinstufungen mit den Ergebnissen der APSA verglichen, wobei die Bewertungen parallel durchgeführt wurden, um die Zuverlässigkeit der Methoden zu gewährleisten (Davidshofer et al. 2005). In dieser Ausarbeitung wird jedoch hauptsächlich Bezug auf die Hardwarevalidierung genommen.

Um valide Messdaten gewährleisten zu können, müssen Richtigkeit, Präzision und Stabilität mit einer gewissen Genauigkeit erfüllt sein. Die Richtigkeit beschreibt die Differenz zwischen dem aus einem Datensatz erhaltenen Mittelwert und einem anerkannten Referenzwert (DIN 1319-2) und wird wie folgt berechnet:

$$\text{Richtigkeit} = |\bar{x} - \mu|$$

wobei μ den Referenzwert und \bar{x} den Mittelwert einer Stichprobe darstellen.

Die Präzision ist ein Maß für die Streuung der Messwerte einer Stichprobe um den Mittelwert der Stichprobe (DIN 1319-2). Des Weiteren kann die Präzision in Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit unterteilt werden. Die Wiederholbarkeit definiert die Variation der Messergebnisse, die mit einem Messinstrument erfasst werden, wenn es ein Prüfer unter identischen Voraussetzungen mehrmals verwendet. Der Aspekt der Reproduzierbarkeit zeigt auf, ob unterschiedliche Messergebnisse auftreten, wenn verschiedene Prüfer unter identischen Messbedingungen am selben Messinstrument testen. Das Präzisionsmaß wird als Standardabweichung der Stich-

probe berechnet: $\text{Präzision} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

n beschreibt die Anzahl der Messungen, x_i ist der i -te Messwert und \bar{x} definiert den Mittelwert aller Messwerte. Geringe Werte für Richtigkeit und Präzision bedeuten eine geringe Abweichung und somit eine hohe Genauigkeit des Messsystems.

Bezüglich der Stabilität wurde die Veränderung der Messergebnisse über die Zeit, der sogenannte Drift, untersucht (AIAG 2010).

Zur Durchführung der Winkelmessungen wurde ein Menschenmodell (Human Body Angle Assessment Model: HASS) eines 50.-Perzentil-Mannes (nach DIN 33402-2) entwickelt (Abbildung 1a). Unter dem Zielaspekt der Validierung des AXS-Messsystem wurde ein Versuchsprotokoll erstellt, das insgesamt 236 Messungen an insgesamt 19 Gelenken (fünf Sensorketten für die vier Gliedmaßen und die Wirbelsäule) umfasste, wobei je nach Gelenkfreiheitsgraden drei bis vier verschiedene Winkel untersucht wurden. Neben den verschiedenen Winkeln wurden zudem unterschiedliche Positionen (oben/mittig/unten) der Sensoren und unterschiedliche Sensorausrichtungen untersucht, um mögliche Fehlereinflüsse aus Anwenderabweichungen bei der Sensorapplizierung abbilden zu können (entsprechend des Koordinatensystems in Abbildung 1b) untersucht. Bei der Messung eines jeden Winkels wurden zehn Messzyklen á 20 s durchgeführt, wobei zur Analyse der Winkelmessgröße jeweils ein Zeitabschnitt von 10 s berücksichtigt wurde (Abbildung 1c).

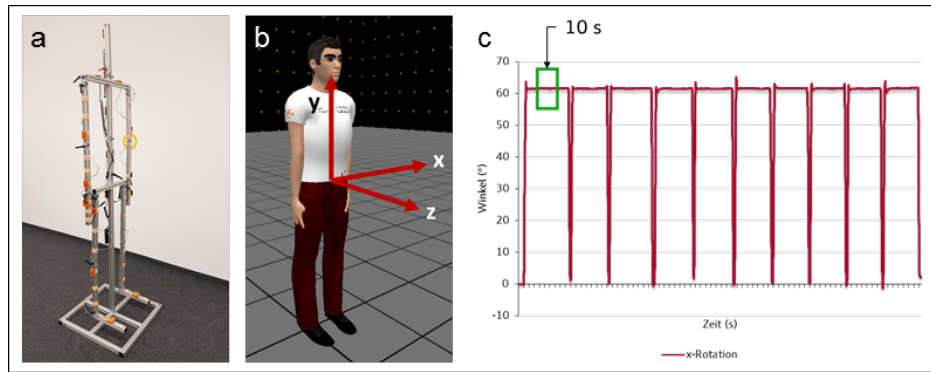


Abbildung 1: Menschenmodell HASS (a), Referenzsystem des Motion-Capturing-Systems (b) und Auswertungsprinzip Winkelmessgröße (c).

Um Unterschiede zwischen den Sensorpositionen und zwischen den Sensoreinrichtungen zu bewerten, wurde ein zweiseitiger t-Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Der Kolmogorov-Smirnov-Test wurde angewandt, um die Messdaten auf Normalverteilung zu überprüfen. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 5\%$ gesetzt. Die Messdaten sind als Mittelwert (M) \pm Standardabweichung (SD) dargestellt.

3. Ergebnisse

Das komplette Inertialsensorsystem hat eine mittlere Abweichung des Präzisionsmaßes von $0,45 \pm 0,51^\circ$. Das Richtigkeitsmaß weist eine mittlere Abweichung von $4,69 \pm 4,14^\circ$ auf. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht aller Messergebnisse.

Tabelle 1: Übersicht der Messergebnisse der Hardwarevalidierung bezüglich Präzision, Richtigkeit und der präferierten Sensorposition.

Gelenk	Rotation	Seite	Präzision		Richtigkeit		präferierte Sensorposition
			M ($^\circ$)	\pm SD ($^\circ$)	M ($^\circ$)	\pm SD ($^\circ$)	
Schultergelenk	x-Rotation	links	0,39	0,46	1,86	1,39	mittig
		rechts	0,15	0,11	1,48	1,08	
	z-Rotation	links	0,15	0,11	4,79	2,60	
		rechts	0,10	0,04	1,56	0,53	
Ellenbogengelenk	x-Rotation	links	0,39	0,56	2,58	2,03	oben
		rechts	0,35	0,46	2,43	1,72	
Handgelenk	x-Rotation	links	0,50	0,30	4,21	3,07	kein Einfluss
		rechts	0,71	0,65	7,95	3,81	
Hüftgelenk	x-Rotation	links	0,28	0,29	4,98	3,52	unten
		rechts	0,15	0,18	3,89	4,40	
	z-Rotation	links	0,10	0,05	0,87	0,69	
		rechts	0,14	0,12	2,22	0,77	
Kniegelenk	x-Rotation	links	0,24	0,20	6,07	1,65	oben
		rechts	0,39	0,30	3,26	3,56	
Sprunggelenk	x-Rotation	links	0,53	0,58	15,69	19,65	kein Einfluss
		rechts	0,24	0,18	15,68	18,59	
Kopfgelenk	x-Rotation	-	0,25	0,22	2,21	1,63	kein Einfluss
	y-Rotation	-	1,91	0,44	3,06	2,57	
Thoracal 12	y-Rotation	-	1,82	0,47	5,40	3,65	oben
Pelvis	x-Rotation	-	0,17	0,25	3,59	1,90	kein Einfluss
Gesamt			0,45	0,51	4,69	4,14	

Die größte Messabweichung vom Richtigkeitsmaß zeigen das linke ($15,69 \pm 19,65^\circ$) und das rechte ($15,68 \pm 18,59^\circ$) Sprunggelenk in x-Rotation. Das linke Hüftgelenk besitzt in z-Rotation die geringste Abweichung vom Richtigkeits- ($0,87 \pm 0,69^\circ$) und vom Präzisionsmaß ($0,10 \pm 0,05^\circ$). Abbildung 2 gibt einen Gesamtüberblick über Präzision und Richtigkeit aller Messungen. Ein Datenpunkt entspricht dabei einer Winkel-messung an einem Gelenkpunkt. Wobei blaue Datenpunkte die Sensorketten der linken, schwarze Datenpunkte die der rechten Körperseite (aus egozentrischer Perspektive) abbilden; weiße Datenpunkte betreffen die Sensorkette der Wirbelsäule (ausgehend vom Beckensensor bis zum Kopf). Insgesamt liegen 64% der Datenpunkte im hellen (hohe Genauigkeit), 25% im hellgrauen (mittlere Genauigkeit) und 11% im grauen (geringe Genauigkeit) Bereich. Mittlere Genauigkeit spiegelt eine höchstens 20%ige Abweichung hinsichtlich Richtigkeit und Präzision wieder und kann als valide betrachtet werden. Die Anforderungen wurden gemäß VDA Band 5 (VDA 2010) definiert. 89% aller Messpunkte liegen demnach in einem validen Bereich.

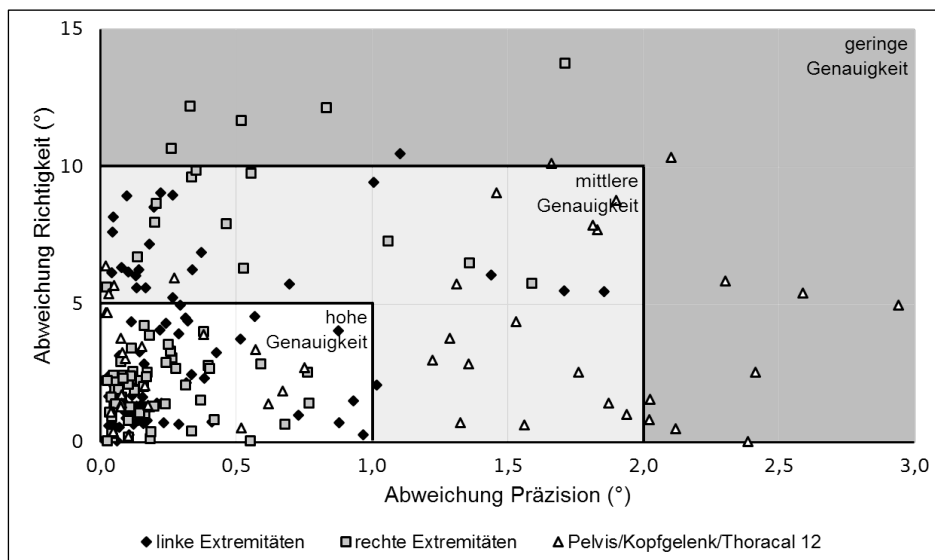


Abbildung 2: Gesamtübersicht der Messabweichungen von Richtigkeit und Präzision.

Die Sensorpositionierung hat sich als wichtiger Faktor herausgestellt, um bestmögliche Messergebnisse zu erhalten. Ist in der Tabelle 1 eine Position (oben, mittig oder unten) aufgeführt, hat sich diese als signifikant besser als die anderen beiden Positionen herausgestellt. Der Eintrag „kein Einfluss“ sagt aus, dass keine der Sensorpositionen signifikant bessere Ergebnisse geliefert hat.

Die Sensorneigung hat einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse (siehe Tabelle 2). Korrekte Sensoren sind hinsichtlich des Präzisionsmaßes signifikant besser als im Vergleich zu geneigten Sensoren ($p = 0,03$). Die Abweichung bezüglich Richtigkeit ist bei den korrekten Sensoren signifikant geringer als im Vergleich zu den geneigten Sensoren ($p = 0,004$).

Tabelle 2: Vergleich 30°-geneigter und korrekt angebrachter Sensoren. (*) definiert einen signifikanten Unterschied zwischen korrekt und geneigt.

Sensorneigung	Präzision*	Richtigkeit*
korrekt	$0,45 \pm 0,51^\circ$	$4,69 \pm 4,14^\circ$
geneigt	$0,54 \pm 0,61^\circ$	$6,71 \pm 6,54^\circ$

4. Diskussion

Die Messergebnisse zeigen, dass das untersuchte Motion-Capture-System sowohl in Bezug auf Präzision als auch Richtigkeit insgesamt valide Ergebnisse liefert. Zudem befinden sich 89% der aufgenommenen Daten in einem hohen bis mittleren Genauigkeitsbereich. Um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, ist es zudem von Bedeutung, dass die Sensoren korrekt am Probanden angebracht werden. Eine geneigte Anbringung führt zu signifikant schlechteren Messergebnissen, wodurch auch die abschließende Ergonomiebewertung verfälscht werden kann. Des Weiteren zeigen präferierte Sensorpositionen auf, an welcher Stelle die Sensoren am Anzug angebracht werden müssen, um möglichst genaue Messdaten zu liefern.

Eine Limitation an der hier aufgeführten Studie ist, dass alle Messungen mit nur einem einzigen IMU MoCap-Anzug der Firma AXS Motionssystem Kft. durchgeführt wurden. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit, dass eine Wiederholung der Studie mit einem anderen IMU MoCap-Anzug der Firma AXS Motionssystem Kft. zu anderen Ergebnissen führen kann. Außerdem wurden alle Messungen nur statisch durchgeführt, wobei der Sensordrift vor allem bei dynamischen Bewegungen zum Tragen kommt. In weiterführenden Untersuchungen mit dynamischen Messungen müsste diesem Aspekt gesondertes Augenmerk geschenkt werden, um die Auswirkungen des Sensordrifts auf die Ergonomiebewertung bewerten zu können.

5. Literatur

- Ahmad N, Ghazilla RAR, Khairi NM, Kasi V (2013) Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems* 1(2):256-262.
- AIAG, Automotive Industry Action Group (2010) *Measurement Systems Analysis, Reference Manual*, 4. Auflage. Michigan.
- Bogus T, Dorn R, (2010) Berücksichtigung des Arbeitsplatzbedarfs für einsatzkritische leistungsgewandelte Mitarbeiter im Planungsprozess. In: 57. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 265-268.
- Bös G (2007) Strategisches Management alternder Belegschaften bei der AUDI AG. In: Holz M, Da-Cruz P (Ed) *Demografischer Wandel in Unternehmen. Herausforderung für die strategische Personalplanung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 199-212.
- Davidshofer CO, Murphy KR (2005) *Psychological Testing: Principles and Applications*, 6th Edition. Harlow, Essex: Pearson.
- DIN, Deutsches Institut für Normung (2005) *Grundlagen der Messtechnik – Teil 2: Begriffe für Messmittel*. DIN 1319-2.
- DIN, Deutsches Institut für Normung (2005) *Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte*. DIN 33402-2
- Foxlin E (2002) *Motion Tracking Requirements and Technologies*. In: Stanney KM (Ed) *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*, 1st Edition. Mahwah, New Jersey: Laurence Erlbaum Associates, 163-210.
- Schaub K, Ghezel-Ahmadi K (2007) Vom AAWS zum EAWS – ein erweitertes Screening-Verfahren für körperliche Belastungen. In: 53. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 601-604.
- VDA, Verband der Automobilindustrie e.V. (2010) *VDA Band 5 Prüfprozesseignung*. 2. Auflage.



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