

Cyber-physische Rüstunterstützung – Ergonomische Untersuchung zur Evaluierung physischer und kognitiver Beanspruchung des Menschen bei der Nutzung eines Head-Mounted Display (HMD)

Nils Darwin ABELE

*Lehrstuhl für Technologiemanagement, Universität Siegen
Unteres Schloss 3, D-57072 Siegen*

Kurzfassung: Im Zuge des Forschungsvorhabens „Cyberrüsten 4.0“ wurde eine cyber-physische Unterstützungssystematik entwickelt, die Maschineneinrichtern bei industriellen Rüstvorgängen einerseits eine Hilfestellung bietet und andererseits die zugehörigen Arbeitsabläufe deutlich verkürzt. Zur Evaluierung möglicher resultierender belastungs- und beanspruchungsrelevanter Parameter wurde eine ergonomische Untersuchung durchgeführt, die gestaltungsbezogene Ausprägungen der Mixed Reality-Datenbrille Microsoft „HoloLens“ auf etwaige ergonomische Limitierungen überprüfen sollte. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen einer Einschätzung der Möglichkeiten zur nutzerzentrierten und prozesssicheren Implementierung von Cyber-Physischen Systemen (CPS) in das Produktionsumfeld.

Schlüsselwörter: Cyber-Physisches System, Elektromyographie, Head-Mounted-Display, Industrieller Rüstprozess, Nutzerzentriertes Design, Usability

1. Einleitung

Die steigende Anzahl industrieller Rüstprozesse ist durch den wachsenden Bedarf kundenindividueller Erzeugnisse und der damit einhergehenden Fertigung kleiner Losgrößen begründet. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen weisen überwiegend manuelle Rüstprozessanteile auf, deren Informationsumfang mit der Komplexität der Fertigungstechnologie zunimmt. Um qualitative Produktschwankungen und Informationsüberlastungen seitens der Maschineneinrichter zugunsten einer effizienten Prozessauslegung zu vermeiden, kann ein CPS, bspw. in Form eines Head-Mounted Display (HMD), diese Aspekte aufgreifen und zu einer kontextabhängigen und ergonomischen Aufbereitung der prozessrelevanten Informationen verhelfen.

Dieser Zielsetzung wird im Forschungsprojekt „Cyberrüsten 4.0“ nachgegangen. Lehrstühle der Universität Siegen entwickelten zusammen mit mittelständischen Unternehmen aus dem südwestfälischen Raum eine Unterstützungssystematik, die Maschineneinrichtern durch ein cyber-physisches Assistenzsystem bei Rüstprozessen von Umform- bzw. Biegemaschinen eine Hilfestellung bietet. Dazu wurde für die Augmented Reality (AR)-Datenbrille „HoloLens“ der Firma Microsoft eine entsprechende Applikation entwickelt, mithilfe derer die Nutzer Rüstinstruktionen durch holografisch aufbereitetes und durch Animationen ergänztes Bild-, Video- und Textmaterial prozessbegleitend erstellen und konsumieren können.

CPS weisen im derzeitigen Entwicklungsstand jedoch ergonomische Limitierungen

auf. Im Zuge dessen ist eine Evaluierung physischer und kognitiver Beanspruchungen des Nutzers im Umgang mit dem Unterstützungssystem sinnvoll. Durch die Anwendung des HMD können subjektiv empfundene Einschränkungen und physiologische Beanspruchungen im Nacken-Schulter-Bereich des Menschen resultieren. Daher werden im Folgenden die methodischen und inhaltlichen Zielsetzungen einer entsprechenden ergonomischen Studie vorgestellt, die diese Themenstellung aufgreift.

2. Stand der Technik

HMD, deren Ursprung auf Sutherland's (vgl. Sutherland 1965) Vision eines computergestützten „Ultimate Display“ zurückzuführen ist, sind CPS, die in ihrer Funktion als Endgeräte eine Verbindung der Software- mit den Hardwareelementen herstellen (vgl. Lee 2008). HMD können gemäß des sogenannten „Reality-Virtuality Continuum“ (vgl. Milgram et al. 1994) sowohl für Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) sowie Augmented Virtuality (AV) konzipiert sein. Während VR eine vollständige Immersion anstrebt, projiziert AR lediglich virtuelle Komponenten echtzeitnah innerhalb des Sichtfeldes in die Realitätsumgebung des Anwenders (Azuma et al. 2001). AV ergänzt im Gegensatz zu AR die Immersion mit realitätsbezogenen Informationen (Milgram et al. 1994). Mixed Reality umfasst in diesem Zusammenhang sowohl AR- als auch AV-Elemente. Microsoft prägte diesen Begriff durch die Entwicklung der „HoloLens“. Das HMD stellt dreidimensionale Hologramme in der realen Welt dar, mit denen über Sprach- und Gestensteuerung interagiert werden kann (vgl. Microsoft 2016). Die Anwendungsgebiete der beschriebenen Technologien sind vielfältig und u.a. in den Bereichen Medizin, Entertainment, persönliche Informationssysteme, Industrie und Militär zu finden (vgl. Van Krevelen & Poelman 2010). Mithilfe der HoloLens ist die Speicherung, Verfügbarkeit und der Konsum von spezifischem Wissen bzw. Informationen zugunsten einer effizienten Prozessauslegung möglich. Das Forschungsvorhaben „Cyberrüsten 4.0“ betrachtet diese Themenstellung am Beispiel industrieller Rüstprozesse (vgl. Abele et al. 2016).

Die Anwendung von HMD kann aufgrund ergonomischer Limitierungen zu erhöhten physischen und kognitiven bzw. psychologischen Belastungen und Beanspruchungen seitens des Nutzers führen. Theis et al. (2016) und Wille (2016) untersuchten diese möglichen Auswirkungen am Beispiel der Ausführung einer Montagetätigkeit unter Nutzung monokularer Displaytypen, die den Probanden bei der Arbeitsaufgabe anhand digitaler Instruktionen unterstützten. Unterschiedliche Versuchsdesigns sowie eine hohe Methodenvielfalt führten dazu, dass nur geringfügig signifikante Ergebnisse nachgewiesen werden konnten. In diesem Zusammenhang bedarf es, insbesondere im Hinblick auf industriebezogene Tätigkeiten und binokulare sowie sprach- bzw. gestengesteuerte HMD, weiterer Forschungsbestrebungen. Die vorliegende Ausarbeitung stellt die Methode und die Ergebnisse einer experimentellen Studie dar, die subjektiv empfundene Einschränkungen sowie physiologische Mehraufwände durch die Nutzung der Microsoft HoloLens untersucht.

3. Methode und Versuchsdesign

In „Cyberrüsten 4.0“ wurde im Rahmen einer Designfallstudie ein nutzerzentrierter Entwicklungsansatz verfolgt (vgl. Wulf et al. 2011). Aufbauend auf einer empirischen

Analyse des Handlungsfelds erfolgt auf Grundlage der ausgewerteten Daten ein partizipativer Designprozess zur Entwicklung der Unterstützungssystematik. Das Design wurde durch den späteren Nutzer wiederholend evaluiert und somit hinsichtlich des praktischen Einsatzes im Nutzungsfeld reflektiert. Das Design-Ergebnis bildet die beschriebene HoloLens-Applikation, die zur Rüstunterstützung angewendet werden kann. Detaillierte Inhalte der ethnographischen Studie können den Ausarbeitungen von Abele et al. (2016), Hoffmann et al. (2017) und De Carvalho et al. (2018) entnommen werden.

Zur Untersuchung möglicher Belastungen und Beanspruchungen im Umgang mit einem HMD wurde als Teilforschungsvorhaben eine ergonomische Studie durchgeführt. Als Untersuchungsgegenstand diente die AR-Datenbrille „HoloLens“ von Microsoft. Zum einen wurde die muskuläre Beanspruchung im Schulter-Nacken-Bereich, d.h. die muskuläre Aktivität des M. sternocleidomastoideus und des M. trapezius pars descendens, die beim Tragen eines HMD insbesondere aktiviert werden, mithilfe des Einsatzes der Oberflächen-Elektromyographie (OEMG) erfasst. Diese Messsystematik nimmt elektromyographische Aktivitäten (EA) der untersuchten Muskeln auf. Zur Normierung der abgeleiteten, gleichgerichteten und geglätteten Aktivität wird für jeden Muskel zunächst eine Messung der Ruheaktivität EA_0 zu Versuchsbeginn vorgenommen. Mittels isometrischer Willkürkontraktion (Maximum Voluntary Contraction, MVC) wird die muskelspezifische maximale EA (EA_{max}) gemessen. Die standardisierten EA (sEA) können dann für sämtliche Arbeitsphasen errechnet werden (vgl. Steinhilber et al. 2013; Penzkofer et al. 2015).

Die Evaluierung von Komfortbedingungen im Kopfbereich erfolgte durch Wärmebildaufnahmen. Um darüber hinaus die subjektiv empfundenen Mehraufwände sowie die kognitive Wahrnehmung zu evaluieren, wurden standardisierte Befragungen, wie Fragebögen zur physiologischen Empfindung (vgl. u.a. Kluth et al. 2004), der NASA Task Load Index (NASA-TLX, vgl. Hart 2006), der Visual Fatigue Questionnaire (VFQ, vgl. Bangor 2000), die Rating Scale of Mental Effort (RSME, Zijlstra 1993) sowie ein qualitatives Interview durchgeführt. Das Probandenkollektiv erstreckte sich über zwölf männliche Versuchspersonen mit einem Durchschnittsalter von 26,8 Jahren.

Die Studie beinhaltete zwei Arbeitsaufgaben. Zum einen wurde ein LEGO-Bausatz auf drei sich in unterschiedlichen Höhen befindlichen Arbeitsplätzen montiert. Die Höhenunterschiede sollen dabei Arbeitshöhen simulieren, die ein Maschineneinrichter bei der Durchführung industrieller Rüstvorgänge einnimmt. Die für den Zusammenbau notwendigen Instruktionen wurden dem Probanden in Papierform oder im Umgang mit der HoloLens über Hologramme schrittweise in unterschiedlichen Positionen im Raum visualisiert. Zum anderen wurde eine statische Blickpositionieraufgabe durchgeführt, bei der die Probanden aus einer gleichbleibenden Position im Raum verteilte Platzhalter ansteuerten, um sämtliche mögliche Kopfbewegungen zu provozieren. Durch die unterschiedlichen Positionierungen wurden verschiedene Belastungs- bzw. Intensitätsstufen durchlaufen. Darüber hinaus wurde die Reihenfolge des Einsatzes der HoloLens variiert, um Auswirkungen in Bezug auf Ermüdungserscheinungen und Lerneffekte auszuschließen. Die Navigation zwischen den Instruktionen bzw. den Platzhaltern erfolgte durch die Interaktion der Probanden in insgesamt sechs Versuchsdurchläufen und mit der Sprach- als auch mit der Gestensteuerung der HoloLens.

4. Ergebnisse

Bei der Gesamtbetrachtung der im Zuge der Versuchsdurchläufe aufgenommenen EA ist eine substantiell höhere Muskelaktivierung bei der Verwendung der HoloLens für sämtliche Muskeln festzustellen. Insbesondere für den M. sternocleidomastoideus und den oberen Teil des M. trapezius pars descendens wurden bei starken seitlichen Blickrichtungen (90°) signifikant hohe Unterschiede der EA zwischen der Ausführung ohne und mit HMD objektiv erfasst (vgl. Abbildung 1). Die subjektiv empfundene Beanspruchung sämtlicher Muskelstellen liegt sogar oberhalb des objektiv gemessenen Wertenniveaus zwischen „moderater“ und „starker“ Beanspruchung bei Nutzung der Datenbrille.

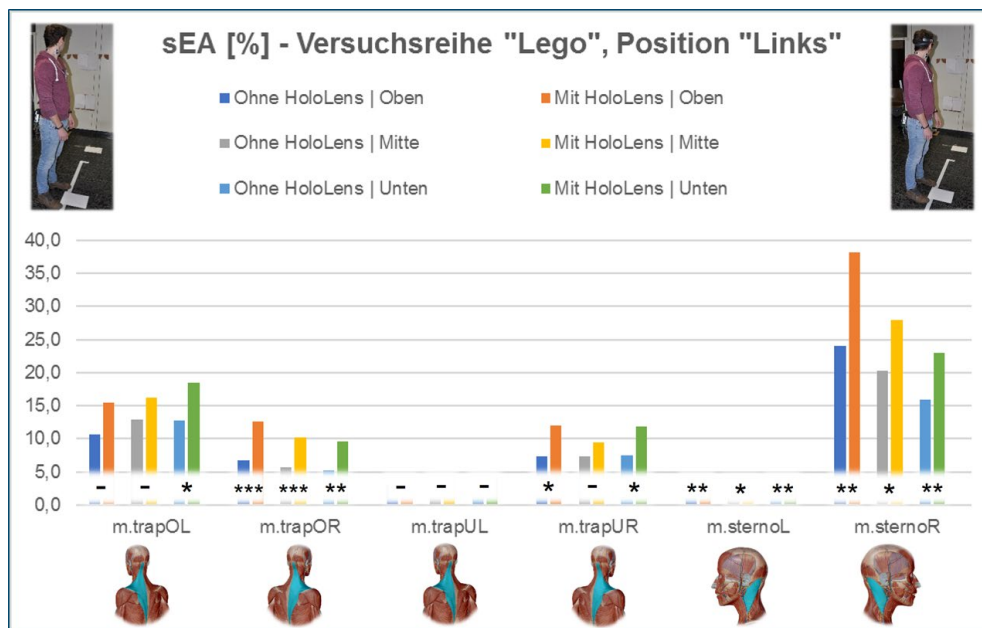


Abbildung 1: Visuelle Darstellung der sEA [%] im Zuge der Montageaufgabe für starke linksseitige Kopfbewegungen

Weiterhin werden, wie in Abbildung 2 dargestellt, durch das Tragen des Kopfträgers Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich, v.a. an Stirn und Nase, in Form von Wärme- und Druckstellen hervorgerufen.

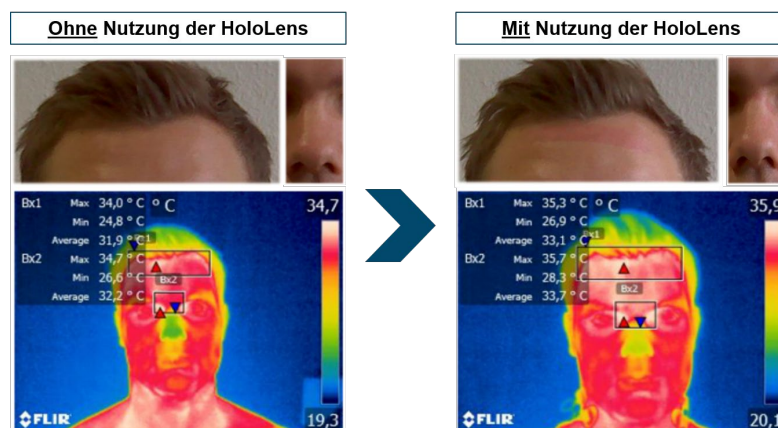


Abbildung 2: Wärme- bzw. Druckstellen an Stirn und Nase vor und nach dem Tragen der HoloLens

Die HoloLens-Anwendung resultierte bei einigen Probanden darüber hinaus in Kopfschmerzen, Nackenschmerzen und geistiger Ermüdung. Während beispielsweise die Trageeigenschaften des Kopfträgers mittelmäßig bis schlecht beurteilt wurden, fiel die Einschätzung hinsichtlich des Umgangs mit dem System sehr positiv aus.

5. Diskussion

Neben dem hohen Eigengewicht von rund 580 Gramm zählt insbesondere das kleine Sichtfeld der HoloLens als ergonomische bzw. technologische Limitierung. Die Interaktionsanforderungen der HoloLens erfordern bei unkomfortablen Positionierungen der Hologramme eine höhere Muskelaktivität im Vergleich zu einer analogen Darstellung der entsprechenden Informationen. Dieser Sachverhalt ist dadurch begründet, dass der Cursor bzw. der sogenannte „Gaze Plot“ der HoloLens einzig durch Kopfbewegungen gesteuert werden kann. Somit kann der Anwender die Interaktion nicht mit den Augen bzw. seinem Sichtfeld austarieren. Die EA des M. sternocleidomastoideus liegen bei sehr starken seitlichen Kopfbewegungen oberhalb der Grenze des 15%-Kapazitätsmaximums. Somit sind statische Muskelermüdungsercheinungen bei einer länger andauernden Nutzung möglich. Allerdings sind derart lange statische Blickpositionierungen, wie sie in der Studie eingenommen wurden, im Realeinsatz tendenziell auszuschließen. Repetitive Ausführungen, wie z.B. die sich stetig wiederholenden Gestensteuerungen, können jedoch zu Ermüdungseffekten führen.

Das hohe Gewicht der HoloLens ist schwerpunktmäßig im vorderen Teil der Brille verortet. Durch diese Gewichtsverteilung entstehen beim Anwender Druckstellen an Nase, Stirn und Schläfe, die zu Durchblutungsstörungen und letztlich zu Schmerzen führen. Dieser Effekt wird einerseits durch das harte Material des Nasenbügels verstärkt. Andererseits müssen Brillenträger den Sitz der Brille nach vorne verlagern, womit zwangsläufig mehr Druckspannung auf den Kopfbereich aufgebaut wird.

Der Einsatz der HoloLens ist aufgrund der gewichtsinduzierten Problematik und durch das kleine Sichtfeld nur mit Einschränkungen für den alltäglichen industriellen Einsatz für Rüstprozesse vorstellbar. Inwieweit eine erhöhte Muskelbeanspruchung bei geeigneter Positionierung im Realeinsatz unter Nutzung der cyber-physischen Rüstunterstützung zu erwarten ist, wird in einer gesonderten Studie untersucht. Darüber hinaus entwickelt Microsoft das Nachfolgemodell HoloLens 2 (vgl. Bastian 2018), dessen Optimierungsmaßnahmen ebenfalls hinsichtlich der oben beschriebenen Themenstellung evaluiert werden sollten.

6. Literatur

- Abele ND, Hoffmann S, Kuhnhen C, Ludwig T, Schäfer W, Schweitzer M, Wulf V (2016) Supporting the Set-up Processes by Cyber Elements based on the Example of Tube Bending. In: Mayr HC & Pinzger M (Ed), Informatik 2016 – Informatik von Menschen für Menschen, GI-Edition-Lecture Notes in Informatics (LNI), 1627-1637.
- Azuma R, Baillet Y, Behringer R, Feiner S, Julier S, MacIntyre B (2001) Recent advances in augmented reality. IEEE Computer Graphics and Applications 21 (6): 34-47.
- Bangor AW (2000) Display Technology and Ambient Illumination Influences on Visual Fatigue at VDT Workstations. Dissertation.
- Bastian M (2018) HoloLens 2: Sieht so Microsofts nächste Augmented-Reality-Brille aus? Accessed August, 2018. <https://vrod.de/hololens-2-sieht-so-microsofts-naechste-augmented-reality-brille-aus/>.

- De Carvalho AFP, Hoffmann S, Abele ND, Schweitzer M, Tolmie P, Randall D, Wulf V (2018) Of Embodied Action and Sensors. Knowledge and Expertise Sharing in Industrial Set-Up. *Computer Supported Cooperative Work* 27 (3-6): 875-916.
- Hart SG (2006) NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (9): 904-908.
- Hoffmann S, Abele ND, De Carvalho AFP (2017) Herausforderungen des Wissensmanagements im Rahmen betrieblicher Rüstprozesse. In: Sure-Vetter Y, Zander S, Harth A (Hrsg) 9te Konferenz Professionelles Wissensmanagement. Tagung vom 05.07. April 2017 in Karlsruhe. FZI Forschungszentrum Informatik. Karlsruhe, 109.
- Kluth K, Chung HC, Strasser H (2004) Verfahren und Methoden zur Prüfung der ergonomischen Qualität von handgeführten Arbeitsmitteln. Professionelle Schraubendreher im Test. *Schriftenreihe Ergo-Med Band 5*, Heidelberg: Curt Haefner-Verlag.
- Lee EA (2008) Cyber Physical Systems. Design Challenges. In: 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing. Orlando: IEEE, 363-369.
- Microsoft (2018) Windows Mixed Reality. Gestures. Accessed March, 2018. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/gestures>.
- Milgram P, Takemura H, Utsumi A, Kishino F (1994) Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telemanipulator and Telepresence Technologies* 2351: 282-292.
- Penzkofer M, Henke AS, Kluth K (2015) Evaluation of the ergonomic quality of screwdrivers via electromyographic and subjective methods. *Occupational Ergonomics* 12: 3-18.
- Steinhilber B, Anders C, Jäger M, Läubli T, Luttmann A, Rieger MA, Scholle HC, Schumann NP, Seibt R, Strasser H, Kluth K (2013) S2k-Leitlinie zur Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 67:113-128.
- Sutherland I (1965) The Ultimate Display. *International Federation of Information Processing* 2:506.
- Theis S, Pfendler C, Alexander T, Mertens A, Brandl C, Schlick CM (2016) Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Physische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Van Krevelen R, Poelman R (2010) A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *The International Journal of Virtual Reality* 9 (2): 1-20.
- Wille M (2016) Head-Mounted Displays – Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Wulf V, Rohde M, Pipek V, Stevens G (2011) Engaging with practices: Design case studies as a research framework in CSCW. *Proceedings of CSCW '11*, 505-512.
- Zijlstra FRH (1993) Efficiency in Work Behaviour: An Approach for Modern Tools. PhD Thesis.

Danksagung: Die vorliegende Ausarbeitung entstammt dem Forschungsprojekt „Cyberrüsten 4.0“, das durch die Europäische Union sowie durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklungen des Landes Nordrhein-Westfalen (Nr. EFRE-0800263) finanziert wird.



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