

## **Chancen und Grenzen der Additiven Fertigung bei der Gestaltung physischer Mensch-Maschine-Schnittstellen**

Felix OBERHOFER<sup>1</sup>, Benedikt JANNY<sup>1</sup>, Thomas MAIER<sup>1</sup>  
Frederik WULLE<sup>2</sup>, Alexander VERL<sup>2</sup>

*<sup>1</sup> Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design,  
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, D-70569 Stuttgart*

*<sup>2</sup> Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und  
Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart  
Seidenstraße 36, D-70174 Stuttgart*

**Kurzfassung:** In dieser Arbeit werden ausgehend von der Additiven Fertigung (AF) die Chancen und Grenzen in Bezug auf die Entwicklung und Herstellung von individualisierten, handbedienten, physischen Mensch-Maschine-Schnittstelle (ihpMMS) untersucht. Hierzu werden zunächst entscheidende Parameter für die Individualisierung erläutert und darauf aufbauend mögliche Einsatzbereiche für die AF abgeleitet. Darüber hinaus erfolgt eine Diskussion des Vorgehensmodells, das für die Gestaltung und Herstellung von ihpMMS mittels AF erarbeitet wurde.

**Schlüsselwörter:** Mensch-Maschine-Schnittstelle, Interfacegestaltung, Additive Fertigung, Individualisierung, Nutzerzentrierung, Bedienelement

### **1. Einleitung**

Die Standardisierung und Vereinheitlichung von Bauteilen ermöglicht eine genaue, schnelle und kostengünstige Herstellung von Produkten. Die Vorzüge der Standardisierung gehen jedoch nachhaltig zu Lasten der Individualisierung im Sinne einer gezielten Gestaltung ergonomisch passender Produkte für den Nutzer. Neue Technologien, wie die Additive Fertigung (AF), ermöglichen es mithilfe der Individualisierung im Gestaltungsprozess Produkte in kleinen Stückzahlen individuell und ergonomisch für den Nutzer wirtschaftlich zu entwickeln und zu produzieren (Breuninger et al. 2013). Vor allem der Bereich der physischen Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, wie etwa Stellteile und Griffe, kann von dieser Entwicklung profitieren. Die direkte Kopplung mit der Hand und den Fingern bedingt hohe haptische Anforderungen hinsichtlich der Teilgestalten Aufbau, Form, Material und Oberfläche sowie der Festigkeit. Dies stellt die derzeitige AF vor große Herausforderungen (Bikas et al. 2016). Diese Arbeit thematisiert diese Herausforderungen und führt ein mögliches Vorgehen zur Überwindung dieser ein.

### **2. Ansätze der Individualisierung durch die AF im Gestaltungsprozess**

Unter einer individualisierten, handbedienten, physischen Mensch-Maschine-Schnittstelle (ihpMMS) wird ein auf Basis der Erfassung individueller anthropometrischer Handmaße des Nutzers geformtes Interface verstanden. Hierbei liegt der Ansatz des Customization-Designs nach Seeger (2006) zugrunde, wonach die

Ermittlung der Gegenform etwa durch ein Scan-Verfahren erfolgen kann. Damit grenzt sich die ihpMMS deutlich von der adaptiven Schnittstelle ab, welche sich nach Petrov (2012) durch eine abwechselnde Verschiedenartigkeit der Interface-Teilgestalten und deren Anpassungsfähigkeit an einen bestimmten Nutzungskontext auszeichnet. Während die individualisierte Schnittstelle also die optimale Kopplung zum vorgesehenen Bedienindividuum erzeugt, versucht die adaptive Schnittstelle sich diesem Optimum für verschiedene Nutzer anzunähern. Hierbei gilt es zu beachten, dass die nutzergerechte Gestalt einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) (1) zum einen vom zukünftigen Nutzer (2) und zum anderen von der auszuführenden Arbeitsaufgabe (3) abhängt und dieses Dreiergespann in eine Nutzungsumgebung eingebettet ist (Shackel 1991; DIN 1999). Die optimale anthropometrische Kopplung der ihpMMS bezüglich des Nutzers kann allerdings deren Flexibilität im Kontext wechselnder Arbeitsaufgaben einschränken, weshalb eine detaillierte Definition der Arbeitsaufgabe zu Beginn des Analyse- und Gestaltungsprozesses erfolgen muss.

Nach dem aktuellen Stand der Forschung gliedert sich die zielgerichtete Methode zur Herleitung einer physischen MMS nach Bullinger & Solf (1979) und Schmid (2014) in die zwei Phasen Analyse und Gestaltung. Zu Beginn der Analyse steht die Klärung der Arbeitsaufgabe und des Nutzungskontextes. Daran schließt die Charakterisierung des Nutzers samt anthropometrischer Maßgebung an. Diese Informationen ermöglichen die makroergonomische Grobanalyse der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), welche die Körperstellung, die Greifbereiche und schließlich die Bewegungsmöglichkeiten während der Arbeitsaufgabe umfasst. Die Analysephase schließt mit der mikroergonomischen Feinanalyse der MMI, zu welcher die Handhaltung, die Greifart sowie die Kopplungsart während der Arbeitsaufgabe zählen. Die Gestaltung beschäftigt sich mit der Erarbeitung der einzelnen physisch-haptischen Gestaltparameter, welche sich in Anlehnung an Janny et al. (2014) aus den haptischen Teilgestalten Aufbau, Form, Material und Oberfläche ergeben. Die quantifizierbaren Gestaltungsparameter ermöglichen eine eindeutige Definition der ihpMMS in Abhängigkeit der Bediencharakteristik, welche sich aus der Arbeitsaufgabe und den Nutzercharakteristika ergibt. Bullinger und Solf postulieren die schrittweise Erarbeitung der Gestalt eines Griffes, wobei zu Beginn die Formgebung, gefolgt von der Herleitung der Aufbauabmessungen, im Anschluss die Material- und zuletzt die Oberflächendefinition stehen.

Auf Seiten der gestaltungsunterstützenden Werkzeuge kommen bislang zumeist Formkataloge (Bullinger & Solf 1979; DIN 2010) bzw. anthropometrische Körpermaßtabellen (DIN 2005) zum Einsatz. Ebenso existieren erste digitale Handmodelle zur Beurteilung des zu erwartenden Komforts von Handgriffen (Gust & Ünlü 2016). Verbreitet ist ebenfalls die objektive Messung der Oberflächenpressung während der MMI durch Sensormatten oder kraftsensitive Resistoren (Janny et al. 2014) sowie die subjektive Nutzerbefragung mittels Komfortfragebogen (Kuijt-Evers et al. 2005). Die schrittweise Gestalterarbeitung bedingt einen iterativen Prozess, für den trotz erster digitaler Ansätze eine Vielzahl an Greifmustern zu entwicklungsbegleitenden Evaluationszwecken benötigt wird. Hierbei ergeben sich mögliche Einsatzbereiche für die AF. Darüber hinaus steht im Fokus dieser Arbeit die Generierung von ihpMMS als Endprodukt mittels der AF. Vor allem in Bereichen für Menschen mit körperlichen Beeinträchtigungen, sowohl bedingt durch den natürlichen Alterungsprozess als auch durch Erkrankungen oder Unfälle erworbene Beeinträchtigungen, ergeben sich Einsatzmöglichkeiten für die Individualisierung in Verbindung mit der AF. Hier sind beispielhaft Greifhilfen oder Handgriffe von

Rollatoren in der Gerontotechnik und Prothesen oder Orthesen in der Rehabilitationstechnik zu nennen. Auch Bereiche in denen eine häufige und intensive Nutzung erfolgt (Medizintechnik, Sport- oder Arbeitsgeräte), sind prädestiniert für eine individuelle Gestaltung der MMS mittels AF. Innerhalb der Medizintechnik kann beispielsweise eine individuelle Gestaltung von Manipulatorhandgriffen erfolgen, um einer hohen Belastung und Ermüdung während der Operation entgegen zu wirken (Gonzalez et al. 2015). Gleiches gilt für Sportprodukte oder Hand- und Elektrowerkzeuge (Maier 2008). Durch eine individualisierte Griffgestaltung kann eine Unterstützung des Anwenders erfolgen, um die Leistungsfähigkeit zu steigern.

Die AF eröffnet somit neue Möglichkeiten bei der Generierung von ihpMMS. Dieser Bereich stellt jedoch hohe Anforderungen an Eigenschaften wie die Festigkeit und die Oberflächenbeschaffenheit der Produkte. Verfahrensbedingt ergeben sich bei der AF hierbei allerdings derzeit Grenzen, die im Folgenden diskutiert werden.

### 3. Chancen und Grenzen der Additiven Fertigung

In jüngster Vergangenheit haben sich diverse AF-Verfahren etabliert, die Bauteile mit nahezu beliebigen Formen herstellen können. Den meisten Verfahren gemein ist der schichtweise Aufbau des Werkstückes in eine bestimmte Aufbaurichtung. Für die Betrachtung von ihpMMS sind vor allem die kunststoffbasierten Verfahren, wie Selektives Lasersintern und das Extrusionsverfahren namens Fused Deposition Modeling (FDM) geeignet. Letzteres zeichnet sich dadurch aus, dass es kostengünstig viele thermoplastische Materialien verarbeiten kann (auch Multi-Materialien). Die wesentlichen Grenzen des konventionellen FDM-Verfahrens in Bezug auf Spritzgussbauteile sind hohe Fertigungszeiten, anisotrope Festigkeitseigenschaften, Einschränkungen der Oberflächengüte aufgrund des Stufeneffektes und die Notwendigkeit von Stützstrukturen bei Überhängen.

Die Ausrichtung der einzelnen Bahnen hat deutliche Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften von Bauteilen. Zugversuche mit gedruckten Zugstäben beispielsweise aus Polylactide zeigen, dass Bauteile eine um 45% höhere Festigkeit in Bahnrichtung als quer dazu aufweisen (Durgun & Ertan 2014). Bedingt durch den schichtweisen Aufbau eines Bauteils ergeben sich somit geringe Festigkeitseigenschaften in Aufbaurichtung (Delamination der Schichten), wodurch eine kraftflussgerechte Gestaltung des Bauteils erschwert wird. Die erreichbare Qualität der Haptik und der Optik eines Bauteils wird beeinträchtigt durch den diskreten, schichtweisen Aufbau, der zu einer Stufung an der Bauteiloberfläche führt.

Dieser Stufeneffekt ist abhängig von der Schichtdicke und dem Winkel zwischen Oberflächennormalen und Aufbaurichtung (siehe Abbildung 1) (Singamneni et al. 2012). Kleine Schichtdicken reduzieren den Stufeneffekt, führen jedoch zu höheren



**Abbildung 1:** Stufeneffekt bei FDM-Verfahren am Rollatorhandgriff

Druckzeiten. Eine weitere verfahrensbedingte Grenze betrifft die mögliche Bauteilgeometrie hinsichtlich Überhängen. Der konventionelle CAD-CAM-Prozess führt dazu, dass an Überhängen mit Stützmaterial gearbeitet werden muss um die Schmelze nach dem Düsenaustritt abzustützen. Das nachträgliche Entfernen beeinträchtigt die Oberflächenqualität und erfordert einen weiteren Fertigungsschritt.

Die größte Herausforderung der generellen Nutzung von AF-Verfahren für ihpMMS ist die durchgängige Prozessgestaltung. Von der Gewinnung der Daten für die Gestaltung bis hin zur Herstellung des Endprodukts müssen vorab alle Parameter bekannt und definiert sein. Stand der Technik in der AF sind CAD-Dateien im stl-Format, wodurch ein enormer Informationsverlust bis zur letztendlichen Fertigung existiert. Im folgenden Kapitel wird eine mögliche Vorgehensweise zur Überwindung dieser Herausforderungen aufgezeigt.

#### **4. Vorgehensweise zur Nutzung der AF für die Herstellung von ihpMMS**

Wie in Kapitel 3 beschrieben, haben derzeitige FDM-Verfahren prozessbedingte Limitierungen, um sie zur Herstellung von ihpMMS als Endprodukt zu nutzen. Hierbei bietet das mehrachsige FDM-Verfahren einen neuen Ansatz, um diese Grenzen zu überwinden und die bereits bestehenden Vorteile zu nutzen. Die Drucktechnologie des FDM-Verfahrens ermöglicht die Verwendung von zusätzlichen Achsen, wie es bei den subtraktiven Fertigungsverfahren Stand der Technik ist (5-Achs Fräsen). Die Rotation des Bauteils während des Druckprozesses ermöglicht die Generierung von dreidimensionalen Filamentbahnen. Somit können zum einen Bahnen entlang des Kraftflusses gelegt werden und zum anderen Deckschichten erzeugt werden, welche die hohen haptischen Anforderungen von ihpMMS erfüllen. Des Weiteren ist es möglich komplexe Formen ohne Stützmaterial zu fertigen, wodurch keine Beeinträchtigung der Oberfläche erfolgt. Für das mehrachsige FDM-Verfahren gibt es jedoch noch keine durchgängigen kommerziellen und forschungsbezogenen Lösungen (Lee et al. 2014). Hierbei bildet der mehrdimensionale CAD-CAM-Prozess eine große Herausforderung, bei dem die Verwendung von Metadaten (Oberflächenvorgaben, Dichte, Spannungsrichtungen etc.) und Kollisionsvermeidung berücksichtigt werden müssen.

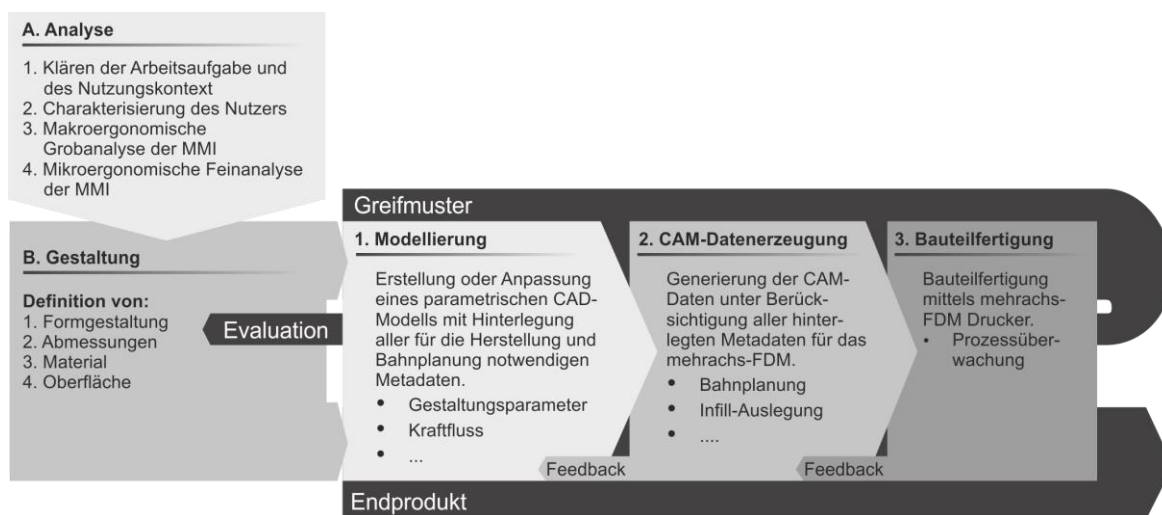
##### *4.1 Das Vorgehensmodell*

Das in Abbildung 2 dargestellte Vorgehensmodell verbindet die Methode zur Herleitung von ihpMMS (siehe Kapitel 2) und die Abläufe des mehrachsigen FDM-Verfahrens und stellt somit einen Ansatz für einen durchgängigen Prozess dar.

Der erste Schritt dieses Modells ist die Bestimmung der für die Individualisierung notwendigen Parameter (A. Analyse). Bei der anschließenden Gestaltung des Bauteils (B. Gestaltung) werden Greifmuster benötigt, um die Gestaltparameter zu detaillieren. Hierbei bietet das mehrachsige FDM-Verfahren die Möglichkeit Synergien zu nutzen und die Anzahl an Greifmustern zu reduzieren.

An dieser Stelle erfolgt der Übergang zwischen dem Individualisierungsprozess und dem AF-Prozess. Gegenüber dem konventionellen AF-Prozess ist beim mehrachsigen FDM-Prozess eine frühzeitige Definition und Hinterlegung von Metadaten im CAD-Modell für die CAM-Datengenerierung notwendig. Auf Basis der bereits ermittelten Parameter der Individualisierung und unter Angabe der Metadaten wird ein parametrisches CAD-Modell erstellt bzw. angepasst. Mithilfe von

parametrischen Modellen kann durch Variation der freien Parameter der Aufwand zum Anpassen eines Produkts an den zuvor erfassten Nutzer und die Arbeitsaufgabe reduziert werden. Im folgenden Prozessschritt erfolgt unter Berücksichtigung der Metadaten und der Kollisionsvermeidung die für die Herstellung notwendige CAM-Datenerzeugung. Dabei werden unter anderem die dreidimensionalen Filamentbahnen geplant und das Infill ausgelegt. Der AF-Prozess wird sowohl für die Herstellung der Greifmuster als auch des Endprodukts durchlaufen. Bei den Greifmustern wird eine iterative Anpassung des CAD-Modells auf Basis der Evaluation dieser vorgenommen.

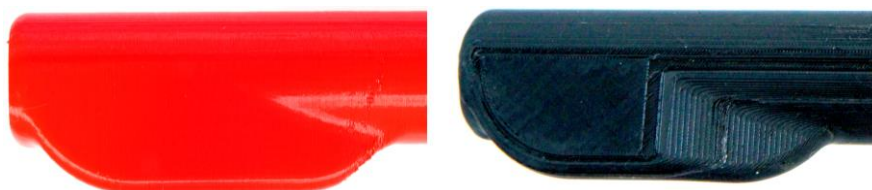


**Abbildung 2:** Vorgehensmodell der Individualisierung mittels mehrachsiger FDM-Verfahren

Um die Durchgängigkeit des AF-Prozesses zu gewährleisten, erfolgt zwischen den Prozessabschnitten ein Feedback, um die notwendigen Metadaten in passender Form bereitstellen zu können und frühzeitig auf Abweichungen zu reagieren, wie es beispielsweise durch eine Prozessüberwachung möglich ist.

#### 4.2 Erste Ergebnisse

Ziel erster Untersuchungen ist die Verbesserung der Oberfläche und die Reduzierung von Stützmaterial. Dafür wird eine angepasste Fräsmaschine mit sieben Achsen genutzt, an deren Spindel der Druckkopf befestigt ist. Der Handgriff eines Rollators wurde zur Gegenüberstellung im dreiachsigen und anschließend im mehrachsigen FDM-Verfahren hergestellt. Das CAD-Modell wurde hierzu in zwei Teile (Vorderteil und Griffstück) getrennt und diese mit einer 90° Verdrehung der Baurichtung gedruckt. Dadurch konnte der Stufeneffekt, vor allem in Bereichen mit einer geringen Steigung, deutlich reduziert werden (siehe Abbildung 3). Des Weiteren konnten 98% an Stützmaterial gegenüber dem konventionellen Druck eingespart werden, wodurch die Oberfläche an der Unterseite verbessert wurde.



**Abbildung 3:** Rollatorhandgriff, gefertigt mittels mehrachsiger (links) und dreiachsiger (rechts) FDM

## 5. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt die Möglichkeiten und derzeitigen Grenzen der AF für die Generierung von ihpMMS auf. Es wird deutlich, dass vor allem im Bereich der AF-Verfahren weitere Entwicklung notwendig ist, um Endprodukte mit den geforderten Eigenschaften hinsichtlich der Oberflächengüte und Bauteilfestigkeit zu realisieren. Hierbei ist das mehrachsige FDM-Verfahren ein möglicher Ansatz, welches auf Grund seiner beschriebenen Eigenschaften zur Reduzierung des Stufeneffekts, Erhöhung der Bauteilfestigkeit und Erzeugung von Überhängen ohne Stützmaterial großes Potential besitzt. Mithilfe des vorgestellten Vorgehensmodells ist es möglich ein optimal auf den Nutzer und die Arbeitsaufgabe angepasstes Produkt zu konstruieren und zu fertigen. In weiteren Arbeiten soll dieses Vorgehen weiter ausgearbeitet und anhand des Rollatorhandgriffes validiert werden.

## 6. Literatur

- Bikas H, Stavropoulos P, Chryssolouris G (2016) Additive manufacturing methods and modelling approaches. A critical review. In: *Int J Adv Manuf Technol* 83 (1-4):389–405.
- Breuninger J, Becker Ra, Wolf A, Rommel S, Verl A (2013): *Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bullinger HJ, Solf JJ (1979) *Ergonomische Arbeitsmittelgestaltung II. Handgeführte Werkzeuge - Fallstudien*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl (Forschungsbericht/Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Dortmund, 197).
- DIN, Deutsches Institut für Normung (1999) *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit. EN ISO 9241-11*.
- DIN, Deutsches Institut für Normung (2005) *Ergonomie - Körpermaße des Menschen. Teil 2: Werte. DIN 33402-2*.
- DIN, Deutsches Institut für Normung (2010) *Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen. Teil 3: Stellteile. DIN EN 894-3*.
- Durgun I, Ertan R (2014) Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. In: *Rapid Prototyping Journal* 20 (3):228–235.
- Gonzalez AG, Salgado DR, Moruno LG (2015) Optimisation of a laparoscopic tool handle dimension based on ergonomic analysis. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 48:16–24.
- Gust P, Ünlü A (2016) Digital Hand Model for Grip Comfort Evaluation. In: Soares MM (Ed) *Ergonomics in Design Methods and Techniques*. Milton: CRC Press, 183-194.
- Janny B, Haug M, Maier T (2014) Optimierung gestalterischer Faktoren für die altersgerechte Mensch-Produkt-Schnittstelle durch Greifkraftmessung. In: *Entwerfen Entwickeln Erleben 2014 - Beiträge zum Technischen Design*. Dresden: TUDpress, 279-290.
- Kuijt-Evers LFM, Twisk J, Groenesteijn L, de Looze MP, Vink P (2005) Identifying predictors of comfort and discomfort in using hand tools, *Ergonomics* 48(6), 692-702.
- Lee W, Wei C, Chung SC (2014) Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. In: *Journal of Materials Processing Technology* 214 (11):2366–2374.
- Maier T (2008) Haptic design of handles. In: Grunwald M (Hrsg) *Human Haptic Perception: Basics and Applications*. Basel: Birkhäuser Basel, 459-466.
- Petrov A (2012) *Usability-Optimierung durch adaptive Bediensysteme*. Univ. Stuttgart: Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation.
- Schmid M (2014) Methode zur nutzergerechten Interfacegestaltung auf der Basis eines idealen Informationsablaufs zwischen funktionalen und formalen Anforderungen. In: *Entwerfen Entwickeln Erleben 2014 - Beiträge zum Technischen Design*. Dresden: TUDpress, 219-232.
- Seeger H (2006) *Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme. Industrial Design Engineering*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Shackel B, Richardson SJ (1991) *Human factors for informatics usability*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Singamneni S, Roychoudhury A, Diegel O, Huang B (2012) Modeling and evaluation of curved layer fused deposition. In: *Journal of Materials Processing Technology* 212 (1):27–35.



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

## **Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels – kreativ, innovativ, sinnhaft**

63. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FHNW Brugg-Windisch, Schweiz

15. – 17. Februar 2017

---

**GfA Press**

---

**Bericht zum 63. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 15. – 17. Februar 2017**

**FHNW Brugg-Windisch, Schweiz**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2017

ISBN 978-3-936804-22-5

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 Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen.

USB-Print: Dr. Philipp Baumann, Olten

**Screen design und Umsetzung**

© 2017 fröse multimedia, Frank Fröse

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de) · [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)