

## Untersuchungen zur Betätigungsakustik als Aspekt der Wertigkeit von Bedienelementen im Fahrzeug

Tobias GLOHR<sup>1,2</sup>, Eva HASENBERGER<sup>2,3</sup>, Andreas ZIMMERMANN<sup>2</sup>,  
Thomas MAIER<sup>1</sup>, Gerhard KRUMP<sup>3</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> *MAN Truck & Bus AG,*

*Dachauer Straße 669, D-80995 München*

<sup>3</sup> *Fakultät für Elektrotechnik, Medientechnik und Informatik, Technische Hochschule  
Deggendorf, Edlmairstraße 6 & 8, D-94469 Deggendorf*

**Kurzfassung:** Zentraler Kern der Mensch-Maschine-Interaktion ist die Entwicklung von Bedienelementen. Diese Bedienelemente im Fahrzeug bieten einen Ansatz zur Auslegung und Wahrnehmung von Wertigkeit. Zusätzlich zu bisher fokussierten haptischen und optischen Modalitäten leistet die Akustik einen Beitrag zur hochwertigen Gestaltung. Besonderer Forschungsbedarf besteht im Bereich der Entwicklung hochwertiger Betätigungsakustik von Bedienelementen.

**Schlüsselwörter:** HMI, Mensch-Maschine-Schnittstelle, Bedienelemente, Betätigungsakustik, Wertigkeit

### 1. Einleitung

Eine Möglichkeit zur Identifikation der Zusammenhänge zwischen dem subjektiven Empfinden von Geräuschen und physikalischen Reizgrößen (Bsp. Schärfe, Lautheit, Tonhöhe, usw.) bietet die Psychoakustik (Zwicker1982, S. 1).

Auf Grund der komplexen Struktur von Betätigungsgeräuschen scheint die Quantifizierung und Ableitung definierter physikalischer Größen innerhalb der Betätigungsakustik im Vergleich zur Betätigungshaptik von Bedienelement nicht eindeutig. Bisherige Forschungen zeigen, dass sich nur grobe Wertebereiche für einzelne psychoakustische Parameter ableiten lassen. So berichtet Treiber (2008), dass Geräusche mit hoher Wertanmutung über hohe Frequenzanteile verfügen, jedoch ohne direkte Nennung psychoakustischer Parameter wie Schärfe oder Tonhöhe. Untersuchungen von Anguelov (2009) zeigen, dass die Schärfe geringe Korrelationen mit der Hochwertigkeit von Bedienelementen hat. Die Tonhöhe hingegen hat Einfluss auf die Beschreibung der Wertigkeit. Da die Tonhöhe sich primär auf einen einzigen Ton referenziert, ein Betätigungsgeräusch sich jedoch aus mehreren Tönen zusammensetzt, kann diese von Geräuschen nicht spezifiziert werden. Zur Beschreibung kann gemäß Anguelov (2009), S. 74 die Peakfrequenz als Ersatzwert verwendet werden. Die Peakfrequenz stellt die maximale Übertragung der Schallenergie dar. Ebenfalls zeigen Untersuchungen von Glohr et al. (2016), die Interaktion zwischen der Betätigungshaptik und der Tonhöhe von Betätigungsgeräuschen. Die Schärfe erzeugt dabei keine Interaktionseffekte. Die Forschungsergebnisse verdeutlichen die Tonhöhe als wesentliche Einflussgröße auf

Bewertung der empfundenen Wertigkeit von Bedienelementen. Mit diesem Erkenntnisgewinn lassen sich, unter Berücksichtigung der Peakfrequenz, gezielt Betätigungsgeräusche erzeugen.

## 2. Methode

### 2.1 Identifikation hochwertiger Betätigungsgeräusche von Bedienelementen

Die synthetisch erzeugten Betätigungsgeräusche müssen auf Grund ihrer hohen Anzahl ( $n = 45$ ) innerhalb eines Reduktionsverfahrens vorab verringert sowie für Bedienelemente geeignete Betätigungsgeräusche identifiziert werden. Diese Reduktion wird unter Anwendung einer mehrstufigen Expertenevaluation durchgeführt.

Innerhalb der ersten Stufe werden den Experten alle generierten Hörkonserven vorgespielt. Währenddessen erfolgt im Kollektiv auf Basis des Expertenwissens eine Einteilung der Betätigungsgeräusche in sogenannte Klanggruppen. Eine Klanggruppe charakterisiert demnach einen Verbund klanglich ähnlicher Geräusche. Weiter wird die Anzahl der Gruppen festgelegt sowie diese benannt.

Im zweiten Schritt werden die einzelnen Betätigungsgeräusche, nach erneutem Abspielen, den Klanggruppen zugeordnet. Sofern 2 von 3 Experten in ihrer Meinung übereinstimmen, erfolgt die Zuordnung der Geräusche zur mehrheitlich ausgewählten Klanggruppe. Findet sich keine mehrheitliche Einordnung, wird das Geräusch zurückgestellt und am Ende erneut abgespielt bis eine mehrheitliche Stimmung auf Basis einer Diskussion erfolgt. Eine abschließende nochmalige Prüfung der Geräusche innerhalb der Gruppen gewährleistet die inhaltliche Festigkeit der Zuordnung.

Im dritten Reduktionsschritt wird die Eignung der Betätigungsgeräusche auf Bedienelemente innerhalb der jeweiligen Klanggruppen untersucht. Die Eignung erfolgt nach dem Mehrheitsprinzip (vgl. Schritt 2). Werden alle Töne innerhalb einer Klanggruppe als ungeeignet klassifiziert, erfolgt ein vollständiger Ausschluss der Klanggruppe.

Abschließend wird auf Basis der Expertenmeinung eine realitätsnahe Lautheit der reduzierten Betätigungsgeräusche ermittelt. Als Referenz werden den Experten hierzu jeweils drei reale rotatorische und drei reale translatorische Bedienelemente präsentiert. Die Referenzbedienelemente sowie die Lautsprecher für die synthetischen Hörkonserven befinden sich in einem Abstand von 77 cm zum Hörer. Dieser Wert resultiert aus vier mittleren Abstandsmessungen am Beispiel eines PKW (VW Golf 7) sowie eines Nutzfahrzeug (MAN TGX) zwischen Bedienteilen auf dem Lenkrad/Infotainment und rechtem Fahrerohr.

Die in der Expertenevaluation reduzierten Hörkonserven ( $n = 13$ ) sind Basis für eine anschließende Nutzerstudie zur Ermittlung hochwertiger Betätigungsgeräusche. Während die Betätigungsgeräusche für rotatorische Bedienelemente unverändert bleiben, werden die Hörkonserven der translatorischen Bedienelemente für die Nutzerstudie modifiziert. Diese Modifizierung resultiert aus dem mechanischen Aufbau von Tastern, die sowohl aus einem Geräusch beim Drücken (Down-Geräusch), als auch beim Loslassen (Up-Geräusch) bestehen. Die Analyse realer Taster ergibt eine leichte Dämpfung des Down-Geräusches gegenüber dem Up-Geräusch, da der menschliche Finger beim Drücken als Schwingungsunterdrücker fungiert. Beim Loslassen des Tasters schwingt das Material frei. Diese mechanisch

bedingte Dämpfung wird unter Anwendung eines Tiefpassfilters durch die Reduktion hoher Frequenzanteile für die synthetisch erzeugten Betätigungsgeräusche realisiert.

Die generierten und modifizierten Geräusche werden anschließend in translatorische und rotatorische Haptik-Simulatoren implementiert (vgl. Glohr et al. 16). Innerhalb der Nutzerstudie wird die Hochwertigkeit der 13 Betätigungsgeräusche unter Anwendung eines sechsstufigen Fragebogens ermittelt. Die Darbietung der Betätigungsgeräusche wie auch die Darbietung der Simulatoren (rotatorisch/translatorisch) wird zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekte randomisiert. Alle Evaluationsstudien finden in einem akustisch optimierten Raum statt.

## *2.2 Stichprobenkollektiv*

Die Auswahl geeigneter Betätigungsgeräusche aus den erstellten Hörkonserven innerhalb eines Expertenworkshops erfolgt mit drei Akustikexperten (1 weiblich und 2 männlich).

Innerhalb der anschließenden Untersuchung hochwertiger Betätigungsgeräusche von translatorischen und rotatorischen Bedienelementen werden 35 Versuchsteilnehmer getestet (12 weiblich und 23 männlich). Die Probanden sind zwischen 21 und 62 Jahren alt ( $M = 33,0$  Jahre,  $SD = 11,43$ ).

## *2.3 Statistische Auswertungsverfahren*

Zur Identifizierung hochwertiger Betätigungsgeräusche erfolgt eine einfaktorielle Varianzanalyse über alle Geräusche hinweg. Hierzu wird der Kontrast zwischen dem hochwertigsten und allen anderen Geräuschen berechnet, um sogenannte Kontrastgruppen zu identifizieren. Anhand dieser Gruppen kann anschließend die Unterscheidung von hochwertigen und nicht hochwertigen Betätigungsgeräuschen überprüft werden. Für die Analysen wird ein Ausgangs-Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  gesetzt.

# **3. Ergebnisse**

## *3.1 Auswahl geeigneter Betätigungsgeräusche innerhalb der Expertenevaluation*

Aus der Expertenevaluation resultieren fünf elementare Klanggruppen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich zweier akustischer Parameter (Frequenzverteilung/Tonalität). Die Parameter werden weiter in ihrer Ausprägungsform differenziert (Bsp. hoch- vs. tieffrequent). Hieraus resultieren vier der fünf Klanggruppen. Die fünfte Klanggruppe beinhaltet neben tonalen sowohl hoch- als auch tieffrequente Geräusche.

Die Prüfung zur Eignung der Betätigungsgeräusche für Bedienelemente ergibt, dass hochfrequente, tonale Geräusche für Bedienelemente ungeeignet sind und somit die gesamte Klanggruppe I ausgeschlossen wird. Die Ergebnisse zeigen anhand der Anzahl ausgewählter Geräusche (Reduktionsschritt 2 & 3), dass sich gemäß Experteneinschätzung eine Kombination aus tieffrequenten und tonalen Geräusche als Betätigungsgeräusche für Bedienelemente eignen.

Aus der finalen Bestimmung einer realitätsnahen Lautheit (Reduktionsschritt 4) der generierten Betätigungsgeräusche resultiert gemäß Experteneinschätzung eine optimal gemittelte Lautheit von 4,1 sone.

Aus der Expertenevaluation erfolgt eine effektive Reduzierung von ursprünglich 45 Hörkonserven auf 13 Betätigungsgeräusche (s. Tabelle 1)

**Tabelle 1** Akustische Parameter der am hochwertigsten bewerteten Betätigungsgeräusche (rotatorisch und translatorisch)

Klanggruppe	Frequenzverteilung	Tonalität	Anzahl Geräusche nach Stufe 2	Anzahl Geräusche nach Stufe 3
I	hochfrequent	tonal	14	0
II	hochfrequent	nicht tonal	14	3
III	tieffrequent	tonal	9	6
IV	tieffrequent	nicht tonal	6	3
V	hochfrequent/tieffrequent	tonal	2	1

### 3.2 Identifikation hochwertiger Betätigungsgeräusche

Die 13 Betätigungsgeräusche werden in Abhängigkeit der Bewegungsform (translatorisch/rotatorisch) statistisch ausgewertet. Der vorausgesetzte Mauchly-Test zur Überprüfung der Varianzhomogenität führt bei rotatorischen Bedienelemente wie auch bei translatorischen zu einem signifikanten Ergebnis ( $p < 0,05$ ). Demzufolge erfolgt eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser (vgl. Bühner & Ziegler 2009, S. 520). Nach der Korrektur ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Geräuschen für rotatorische ( $F(7,88, 268,00) = 4,28, p < 0,001$ ) und translatorische ( $F(7,88, 268,00) = 4,16, p < 0,001$ ). Die detaillierte Kontrastanalyse erfolgt unter Anwendung eines korrigierten Alphaniveaus. Dieses berechnet sich aus dem ursprünglichen Signifikanzniveau ( $p = 0,05$ ) und der Anzahl der Vergleiche (12) für jeweils rotatorische und translatorische Bedienelemente ( $p_{\text{korr}} = 0,05 / 12 = 0,004$ )

Die Vergleiche für rotatorische Bedienelemente zwischen allen Geräuschen und dem am hochwertigsten bewerteten Geräusch (3) ergeben für drei Betätigungsgeräusche (27, 11, 45) signifikante Unterschiede ( $F = [26,36; 19,49; 12,96]$  alle  $p < 0,004$ ). Die restlichen Betätigungsgeräusche (25, 35, 4, 24, 26, 2, 8, 37, 43) unterscheiden sich nicht signifikant von Betätigungsgeräusch 3 ( $p > 0,004$ ). Aus diesen Ergebnissen lassen sich infolgedessen zwei Gruppen mit jeweils drei und zehn Geräuschen ableiten (vgl. schraffiert/grau).

Die Voraussetzung der Varianzhomogenität für die anschließende Analyse ist gemäß Levene-Test gegeben ( $p > 0,05$ ). Die weitere Prüfung mittels Welch-Test ergibt einen tendenziell signifikanten Unterschied der beiden abgeleiteten Kontrastgruppen ( $p = 0,058$ ).

Die Kontrastanalyse für translatorische Bedienelemente ergibt für vier Betätigungsgeräusche (27, 11, 45, 35) signifikante Unterschiede ( $F = [38,39; 20,09; 15,58; 11,74]$  alle  $p < 0,004$ ) in Bezug auf das am hochwertigsten bewerteten Betätigungsgeräusch (24). Die restlichen Betätigungsgeräusche (4, 26, 25, 8, 37, 3, 2, 43) unterscheiden sich nicht signifikant ( $p > 0,004$ ). Aus den Ergebnissen resultieren somit zwei Kontrastgruppen mit jeweils vier und neun Geräuschen.

Die Voraussetzung der Varianzhomogenität für die Analyse ist gemäß Levene-Test gegeben ( $p > 0,05$ ). Aus dem Vergleich der beiden Gruppen resultiert auf Basis des Welch-Tests ein signifikanter Unterschied ( $p < 0,001$ ) der beiden Kontrastgruppen. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen die Ergebnisse der Mittelwerte für die Hochwertigkeit der einzelnen Betätigungsgeräusche in Abhängigkeit der

beiden Kontrastgruppen (schraffiert/grau) für rotatorische und translatorische Bedienelemente.

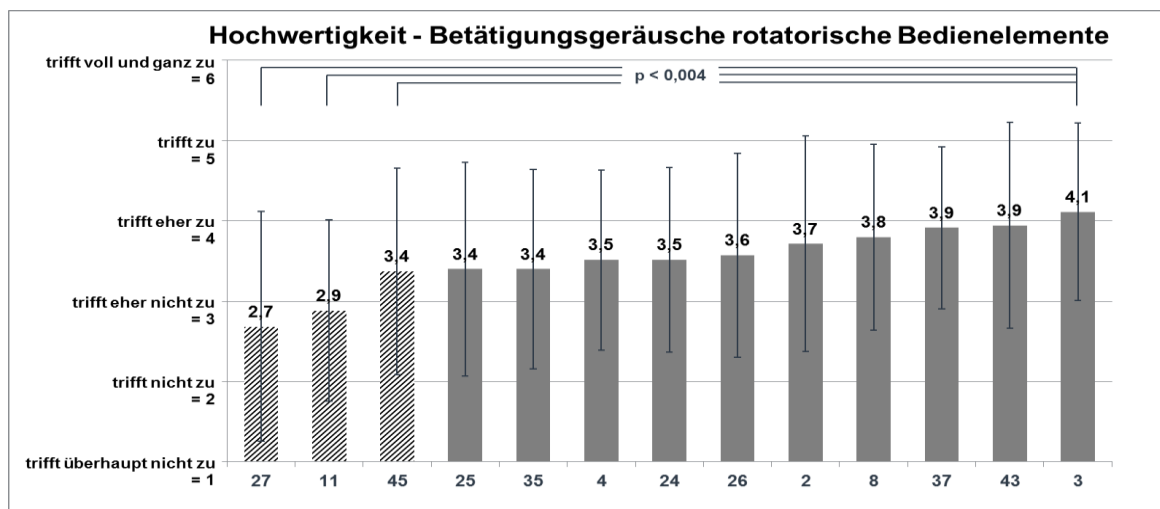


Abbildung 1: Bewertung der Hochwertigkeit von Betätigungsgeräuschen (rotatorisch)

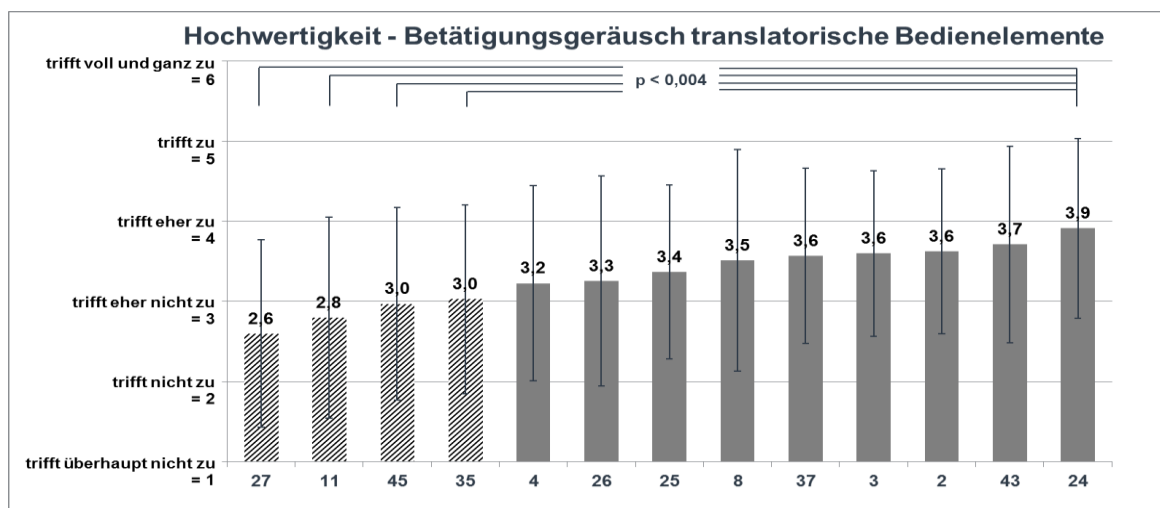


Abbildung 2: Bewertung der Hochwertigkeit von Betätigungsgeräuschen (translatorisch)

Unter Berücksichtigung akustischer Parameter weisen die am hochwertigsten bewertenden Betätigungsgeräusche die in Tabelle 2 dargestellten Werte auf. Eine Quantifizierung der Tonhöhe ist auf Grund der hohen Streuung der Peakfrequenzen zwischen rotatorischen und translatorischen Bedienelementen sowie innerhalb der Bedienelementgruppen (translatorisch/rotatorisch) nicht möglich. Anhand der Lautheit ist zu erkennen, dass diese für die Betätigungsgeräusche erfolgreich vereinheitlicht wurde.

Tabelle 2: Akustische Parameter der am hochwertigsten bewerteten Betätigungsgeräusche

Betätigungsgeräusch	Peakfrequenz [Hz]	Lautheit [sone]	Pegel [dB(A)]	Ausklingszeit [ms]
3 (rotatorisch)	2400	3,7	52,9	15,0
24 (translatorisch)	6200	3,8	52,9	21,0

#### 4. Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse der Expertenevaluation verdeutlichen anhand der Anzahl reduzierter Geräusche innerhalb der Klanggruppen und unter Berücksichtigung der ausgeschlossenen Klanggruppe, dass die Tonalität alleine nicht ausschlaggebend für die Eignung von Betätigungsgeräuschen ist. Die ermittelte Lautheit von 4,1 sone bestätigt tendenziell die Messung von Betätigungsgeräuschen realer Bedienelemente, die im Vergleich für rotatorische Bedienelemente zwischen 1,3 – 2,5 sone und für translatorische Bedienelementen zwischen 3,2 – 5,2 sone liegen. Kritisch zu betrachten ist, dass die Geräusche innerhalb der Expertenevaluation ohne die Ausführung einer haptischen Betätigung durch den Nutzer selbst abgespielt wurden. Gemäß des Einflusses der Haptik auf die Akustik (vgl. Glohr et al. 2016) kann sich dies auf die akustische Vorstellungskraft der Experten auswirken.

Die Probandenuntersuchung zeigt, dass die Wertigkeit der Betätigungsakustik nicht auf ein einziges Betätigungsgeräusch spezifiziert werden kann. Die Ergebnisse identifizieren jedoch für rotatorische und translatorische Bedienelemente eine Gruppe hochwertiger Betätigungsgeräusche, die wiederum von nicht hochwertigen Geräuschen getrennt werden können. Dies bestätigt die eingangs erwähnte Annahme bezüglich der komplexen Struktur von Geräuschen. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass für rotatorische und translatorische Bedienelemente unterschiedliche Betätigungsgeräusche als hochwertig wahrgenommen werden. Demzufolge ist eine Unterscheidung der Geräusche zwischen beiden Bewegungsformen der Bedienelemente notwendig.

Die Tonhöhe zeigt anhand der Peakfrequenz eine starke Streuung in der Bewertung der Wertigkeit. Dementsprechend kann der empfohlene Wertebereich gemäß Anguelov (2009) von 900 Hz – 1000 Hz nicht bestätigt werden. Eine Möglichkeit dieser Abweichung ist der Vergleich zwischen synthetischen Geräuschen und realen Bedienelementen. Weiter muss auf Grund der Abweichungen und Streuung die Anwendung der Peakfrequenz als Ersatzwert kritisch betrachtet werden. Für weitere Untersuchungen hinsichtlich der Tonhöhe als Variationsparameter, bleibt die Angabe des Ersatzwertes unbeeinflusst, da die Tonhöhe anhand von Halbtönen gezielt nach oben (hoch) und unten (tief) variiert (gepitch) werden kann. Dies ermöglicht beispielsweise in weiteren Untersuchungen die Überprüfung, inwieweit hochwertige Betätigungsgeräusche bzw. deren psychoakustischer Parameter geeignet sind, um Markenprofile zu übertragen. Gelingt diese Übertragung in Abhängigkeit der Hochwertigkeit, kann ein Differenzierungsansatz zwischen verschiedenen Automobilmarken generiert werden.

#### 5. Literatur

- Anguelov N (2009): Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienelementen im Kfz-Innenraum, Dissertation, Technische Universität Dresden
- Bühner M, Ziegler M (2009): Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. München: Pearson Studium
- Glohr T, Schynoll S, Zimmermann A, Maier T (2016): Interaction of Haptics, Acoustics and Optics in the Perception of Rotatory Control Devices. In: Soares, M. ; Falcao, C. ; Ahram, T. (Ed) Advances in Ergonomics Modeling, Usability & Special Populations, Orlando: Springer Verlag, S. 599-611.
- Treiber, A (2011): Design and Benchmarking of Acoustic Feedback in Human Machine Interface. Dissertation, Slovak University of Technology, Bratislava
- Zwicker, E (1982): Psychoakustik. Berlin: Springer Verlag



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)