

Von fertigkeitsbasiertem zu regelbasiertem Verhalten bei der Bedienung von Werkzeugmaschinen

Patrick PUSCHMANN¹, Günter BECKER², Alexios CAMARINOPOULOS²,
Ulrich HUSSELS², Volker WITTSTOCK¹, Joachim REGEL¹

¹ *Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Technische Universität
Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz*

² *RISA Sicherheitsanalysen GmbH, Xantener Straße 1, D-10707 Berlin*

Kurzfassung: In ersten Studien wurde der Einsatz von Human Reliability Analysis (HRA) an Werkzeugmaschinen untersucht. Den Ausgangspunkt bildete die Bedienerbeobachtung an ausgewählten Arbeitssystemen zur Identifikation fehlerbehafteter Personalhandlungen. Um die Fehlerentstehung und deren Auswirkungen näher zu untersuchen, nahmen 17 Berufsschüler der Berufsgruppe Zerspanungs- und Industriemechaniker an Nutzertests teil. Die Ergebnisse zeigen an der exemplarischen Aufgabe des „Werkstückspannens“, dass eine Vielzahl von Fehlhandlungen existiert und zudem, dass diese sich experimentell erfassen und probabilistisch auswerten lassen. Des Weiteren wird ein möglicher HRA-Ansatz zur Bewertung menschlicher Fehlhandlungen bei der Bedienung von Werkzeugmaschinen vorgestellt.

Schlüsselwörter: Human Reliability Analysis (HRA), Werkzeugmaschine (WZM), Arbeitssicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), Bewertungsverfahren, Nutzertests

1. Einleitung

Der Werkzeugmaschinenbau in Deutschland ist gekennzeichnet durch die Entwicklung hochwertiger und komplexer Werkzeugmaschinen (WZM). Mit einem Jahresumsatz von ca. 15,8 Mrd. Euro (2015) zählt dieser zu den wichtigsten Industriebranchen Deutschlands (Dispan 2017). Für das Inverkehrbringen auf dem europäischen Markt müssen WZM nach der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ausgelegt und konstruiert werden. Damit erfüllen die Hersteller die wesentlichen Anforderungen an Sicherheits- und Gesundheitsschutz und weisen nach, dass ihre Maschinen sicher sind (EG 2006). Dennoch liegt die Zahl der meldepflichtigen Unfälle bei den WZM, mit 17.323 Unfällen im Jahr 2016, sehr hoch (DGUV 2017). Um diesen Trend entgegenzuwirken bemühen sich Maschinenhersteller, ihre Maschinen softwaretechnisch (zusätzliche Sicherheitsfunktionalitäten) sowie durch konstruktive Maßnahmen (verstärkte Schutzeinrichtungen) zu optimieren.

Untersuchungen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) deuten hinsichtlich der Unfallursachen an WZM auf Fehlhandlungen des Bedieners bei manuellen Tätigkeiten hin (Kesselkaul et al. 2016). Darüber hinaus steht die WZM-Branche durch die Einführung neuer innovativer Technologien (u. a. Verfahrensintegration, Smart Data, Machine Learning) verstärkt unter Druck, der sich gleichzeitig auf die Maschinenkomplexität auswirkt und letztlich den Bediener mehr fordert und im schlimmsten Fall überfordert.

Zur Identifikation von Personalhandlungen sowie zur qualitativen und quantitativen Bewertung menschlicher Fehlhandlungen (Zuverlässigkeit) stehen eine Vielzahl methodischer Ansätze zur Verfügung, die unter der Bezeichnung „Human Reliability Analysis“ aufgeführt werden (HRA) (VDI 2015).

2. Stand der Technik

Der Einsatz von HRA-Methoden ist sehr vielseitig. Zu den bekanntesten zählen die Untersuchungen in Kernkraftwerken (Swain & Guttman 1983; Reason 1994). Aber auch in anderen Bereichen, wie in der Automobilindustrie, Verfahrenstechnik, Luftfahrt, Seefahrt, im Eisenbahnverkehr und Straßenverkehr werden diese eingesetzt. Einerseits spiegeln diese Einsatzgebiete Bereiche wieder, in der die Sicherheit eine tragende Rolle spielt und zum anderen, dass die alleinige Betrachtung technischer Aspekte nicht ausreicht. Mit der steigenden Komplexität technischer Systeme, rückt die Interaktion von Mensch und Technik in den Vordergrund und erfordert eine umfassende Analyse aller sicherheitsrelevanten Systemkomponenten, d. h., nicht nur die Betrachtung der Technik (Zuverlässigkeit technischer Komponenten), sondern auch die des Menschen. („Systemkomponente Mensch“). Auch aktuelle Forschungsarbeiten thematisieren den Einsatz dieser methodischen Ansätze, u. a. im Bereich der Montage (Refflinghaus & Bossmann 2014), bei der Produktentwicklung (Djalouis 2015) oder in der Fertigung (Böllhoff 2018). Der Fokus liegt in diesen Bereichen vorrangig in der Qualität von Arbeitsergebnissen unter Einfluss menschlicher Handlungen und weniger in der Sicherheitsbetrachtung.

Eine wesentliche Grundlage der HRA-Methoden bildet die Datenbasis, die u. a. auf Feld- oder Laborstudien, Simulationen oder Expertenschätzungen beruhen. Eine der umfangreichsten Datenbasis besitzt z. B. die Methode THERP (Technique of Human Error Prediction) (Swain & Guttman 1983).

Im Mittelpunkt einer HRA-Analyse steht die Ermittlung von Kenngrößen (VDI 2015), z.B.: HEP - Human Error Probability, die Wahrscheinlichkeit einer menschlichen Fehlhandlung, d. h. die Relation zwischen einer Zahl n beobachteter Fehler zu einer Zahl N der Möglichkeiten für einen Fehler und deren Komplement HRP – Human Reliability Probability

Die HRA-Analyse beinhaltet im Wesentlichen vier wichtige Kernfunktionen. Die erste Funktion ist die Identifikation menschlicher Fehler, d. h. wo treten Fehler im betrachteten System auf. Die zweite Funktion ist die Darstellung menschlicher Fehlermechanismen (Entstehungsbedingungen). Im Mittelpunkt der dritten Funktion steht die Quantifizierung des menschlichen Fehlers. In der letzten Funktion erfolgt die Reduktion menschlicher Fehler. Diese vier Funktionen sind Bestandteil einer standardisierten systematischen Vorgehensweise (Kirwan 1994).

Der Begriff menschliche Fehlhandlung ist grundsätzlich nicht als negativ anzusehen. Beispielsweise können sich menschliche Fehlhandlungen aus einer mangelnden ergonomischen Gestaltung, aus Arbeitsabläufen oder aus Kombination verschiedener Ursachen ergeben (Sträter 1997). Menschliche Fehlhandlungen können grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt werden, in Unterlassungsfehler, d. h., etwas wurde unterlassen bzw. etwas ist unterblieben und Ausführungsfehler, wie etwas ist falsch (ausgewählt) bzw. etwas ist fehlerhaft (eingestellt). Zu der zweiten Kategorie zählen auch Zeitfehler, qualitative Fehler, Reihenfolgefehler und Verwechslungsfehler (VDI 2003).

3. Nutzerstudie zur Ermittlung von Personalhandlungen und zur Bewertung menschlicher Fehlhandlungen

3.1 Fragestellungen

Für die Portierung der methodischen Ansätze zur Bewertung menschlichen Fehlverhaltens in das Feld der Bedienung von WZM lassen sich nachfolgende Forschungsfragen ableiten:

- Wo treten fehlerbehaftete Personalhandlungen bei der Bedienung bei der WZM auf und wie wirken sich diese auf das Arbeitssystem aus?
- Lassen sich die methodischen Ansätze zur Bewertung menschlicher Fehlhandlungen auf die Werkzeugmaschinenbedienung übertragen?
- Welcher methodische Ansatz ist am besten geeignet für die Portierung in das Feld der Bedienung von WZM?

3.2 Informationssammlung an ausgewählten Arbeitssystemen

Im Rahmen von zwei Studien wurde das MMS exemplarisch an der manuellen Werkstückspannung untersucht. Einerseits wurde dieses in punkto technischer Schwachstellen untersucht, deren Ergebnisse in (Albero-Rojas 2018) ausführlich dargestellt werden. Auf der anderen Seite hinsichtlich menschlicher Einflussfaktoren, wie nachfolgend beschrieben.

Den Ausgangspunkt bildeten zwei ausgewählte Arbeitssysteme (Dreh- und Fräsmaschine) am Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse. Durch Beobachtung der Bedienertätigkeit beim „Werkstückspannen“ sowie zusätzlicher Informationen über Bedien- und Betriebsanweisungen verwendeter Arbeitsmittel und Fachgespräche mit dem Bedienpersonal konnten Informationen über die betrachteten Arbeitssysteme gesammelt werden.

Das größte Risiko beim „Werkstückspannen“ besteht im Wesentlichen in der Möglichkeit einer Werkstückfreisetzung während des Betriebs und wurde daher als „unerwünschtes Ereignis“ definiert. Daraufhin erfolgte eine Zerlegung der Arbeitsschritte in Tätigkeitselemente mit dem Ziel, mögliche fehlerbehaftete Personalhandlungen zu identifizieren, die zu diesem „unerwünschten Ereignis“ führen. Zusammenfassend konnten folgende Schwerpunkte für fehlerbehaftete Personalhandlungen festgestellt werden:

- Spannstrategie (u. a. Auswahl von Komponenten, Bearbeitungsreihenfolge)
- Montage (Spannsystem- und Werkzeugmontage, Spannkraftherstellung)
- Überwachungstätigkeiten (z. B. nach erfolgter Montage, Prüfung geforderter Spannkraft und Momente)
- Berechnungen (z. B. erforderliche Spannkraft)
- Steuerungseingaben und Messungen (Erfassung von Werkstückparametern)
- Arbeitsvorbereitung (unmittelbar), Organisation (mittelbar)

3.3 Versuchsaufbau und -durchführung (Nutzertests)

Nutzertests bieten die Möglichkeit einzelne Einflussgrößen herausgelöst, unter identischen Randbedingungen, zu untersuchen. Einerseits die Fehlerentstehung und

deren Auswirkung näher zu betrachten, als auch die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit für die jeweilige betrachtete Tätigkeit zu ermitteln. Die experimentelle Studie erfolgte mit 17 Berufsschülern (Azubis der Berufsgruppe Zerspanungs- und Industriemechaniker) an einer realen WZM (s. Abb. 1).

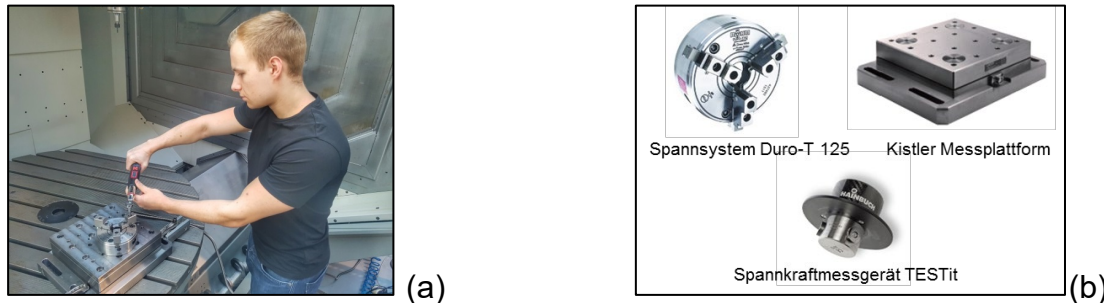


Abbildung 1: „Snapshot“ Nutzertest (a), Testequipment (b)

Die erste Teilaufgabe (15 min) bestand darin, für die Fertigung eines Werkstücks ein vorgegebenes Spannsystem (Duro-T 125 der Firma Röhm) für die Bearbeitung vorzubereiten. Das Spannsystem wurde vorab entsprechend präpariert (z. B. beschädigte Schrauben). Dem Probanden wurden alle notwendigen Arbeitsmittel (z. B. Futterbacken, Messmittel, Anleitungen) in einem mobilen Werkzeugschrank zur Verfügung gestellt. Der Proband wurde bei der Aufgabenausführung beobachtet und Fehlhandlungen wurden in entsprechende Checklisten notiert. In der zweiten Teilaufgabe (10 min), sollte der Proband ein Spannkraftmessgerät als Werkstück einspannen (s. Abb. 1). Gleichzeitig wurden mittels einer Messplattform (s. Abb. 1) die Anzugs- und Anschraubmomente erfasst.

3.4 Ergebnisse der Nutzerstudie

Die Ergebnisse des ersten Teils der Nutzerstudie zeigen eine Vielzahl fehlerbehafteter Personalhandlungen (s. Abb. 2).

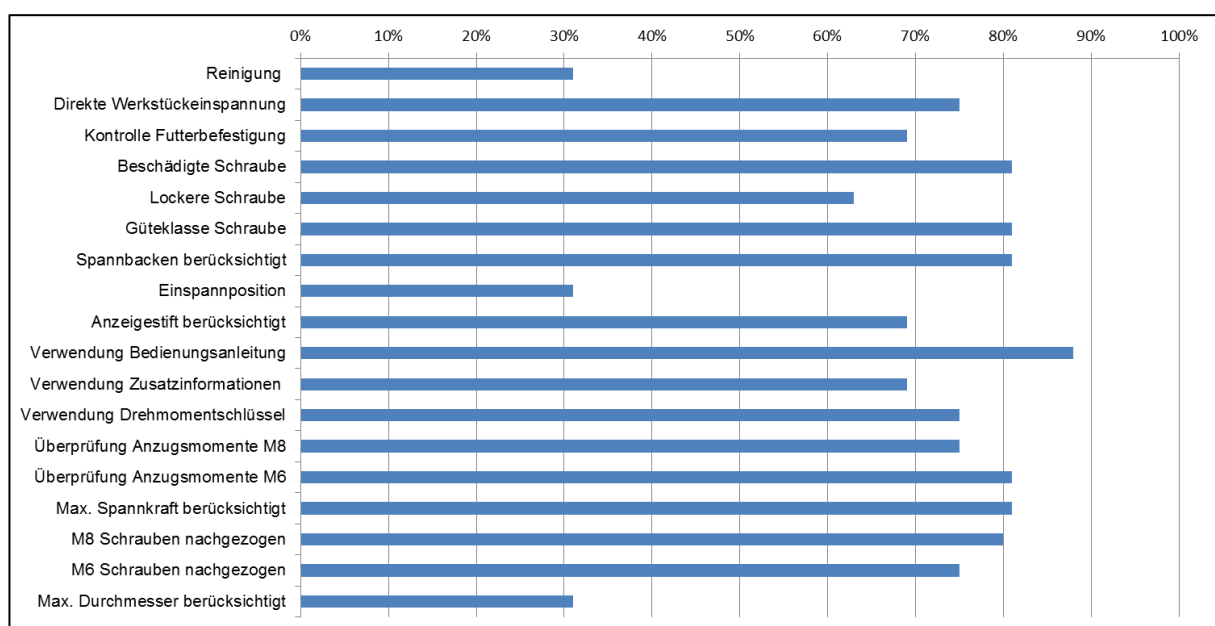


Abbildung 2: Relative Häufigkeit fehlerbehafteter Personalhandlungen (n=16)

Diese reichten von Unterlassungsfehlern, wie das Vergessen der Reinigung, die (Nicht-)Verwendung der Bedienungsanleitung, bis zum direkten Einspannen des Werkstücks ohne Überprüfung von Schraubverbindungen oder die Auswahl falscher Futterbacken als für die Bearbeitung notwendig.

Die Auswertung der messtechnischen Erfassung widerspiegelt das Problem bei einer auf Erfahrungs-basierten (nach Gefühl) Spannkraft- und Momenterstellung. Am Beispiel Aufsatzbackenverschraubung zeigt sich, dass von 102 erfassten Anzugsmomenten 57 außerhalb des geforderten Soll-Wertes (10 bis 15 Nm) liegen.

Auch bei der Auswertung der Futterbefestigung und der Spannkraft konnte das gleiche Problem festgestellt werden. Bei der Futterbefestigung waren 50 von 51 erfassten Anzugsmomenten unterhalb der geforderten 35 Nm. Bei der Spannkraft wurden 17 Werte erfasst, 9 davon lagen unterhalb der erforderlichen Spannkraft von 21 kN und 8 oberhalb. Zudem lagen die 8 auch oberhalb des eigentlichen Herstellergrenzwertes von max. 23 kN.

4. HRA-Ansatz zur Bewertung menschlicher Fehlhandlungen bei der Bedienung von Werkzeugmaschinen (HRA-WZM)

Manuelle Tätigkeiten an WZM sind im Wesentlichen durch fertigkeitbasiertes Verhalten, die stark von wiederholter Ausbildung und häufiger Ausübung beeinflusst werden, geprägt.

Indem die WZM immer komplizierter werden, erfolgt in zunehmendem Maß ein Übergang von der rein fertigkeitbasierten Bedienung zu einer regelbasierten Bedienung nach der zugehörigen Dokumentation. Dies ist besonders dann zu beobachten, wenn Bearbeitungsarten, die nicht Tagesgeschäft sind, gefordert sind. Da die HRA-Analysen in der Kerntechnik in erster Linie mit Maßnahmen zur Beherrschung von Störungen befasst sind, geht es auch dort weitgehend um regelbasierte Maßnahmen. Aus diesem Grund sind einschlägige Verfahren wie THERP (Theory of Human Error Rate Prediction: Swain 1983) und die CBDT Variante (Cause Based Decision Trees) von HCR-ORE (Parry 1992) aussichtsreiche Kandidaten für eine Portierung in das Feld der Bedienung von Werkzeugmaschinen.

Diese bewährten methodischen Ansätze stehen mit entsprechender Softwareunterstützung aus dem nuklearen Bereich zur Verfügung. Darüber hinaus sind sie kalibrierbar. Aus den im Abschnitt 3.4 gewonnenen Verteilungen lassen sich ohne weiteres Wahrscheinlichkeiten mindestens für die Basiswerte (BHWP) einschließlich der Gewinnung von Aussagen zur Unsicherheit gewinnen. Hiermit lassen sich den Methoden inhärenten Daten durch eine entsprechende Bayes'sche Upgrade Methodik anpassen, und es entsteht ein Ausgangspunkt für eine Methodik zur Bewertung komplexer WZM.

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Mit den Experimenten mit Berufsschülern an WZM konnte belegt werden, dass sich Bedienfehler bei der Nutzung von WZM grundsätzlich experimentell erfassen und probabilistisch auswerten lassen. Bereits bei diesen Experimenten hat sich gezeigt, dass ein regelbasiertes Befolgen der Bedienungsanleitung zu weniger Fehlern führt, als ein intuitives, auf Fertigkeit und Erfahrung beruhendes Vorgehen. Es ist zu erwarten, dass diese Tendenz bei fertig ausgebildeten Handwerkern

schwächer ausgeprägt ist, aber spätestens bei Sonderteilen ist sie zu erwarten. Die Bewertung regelbasierten Verhaltens ist in einigen sicherheitsrelevanten Fachgebieten seit langem etabliert. Auch, wenn es bei den WZM nicht um große spektakuläre Unfälle geht: Jeder Unfall, jeder Tote ist einer zuviel. Deshalb sollten Bedienungsanleitungen mit HRA-Verfahren analysiert werden. Eine Kalibrierung der Methodik mit den Ergebnissen der Experimente wird auf gesicherte Ergebnisse führen und die Welt der industriellen Arbeit in Interaktion mit komplexen Maschinen nicht nur ein wenig sicherer machen.

6. Literatur

- Albero-Rojas, A.; Wittstock, V.; Regel, J.; Putz, M. (2018) Advances in Production Research, Aachen, November 19-20, 2018, Springer Nature Switzerland AG, 208-217.
- Böllhoff, J. (2018) Einflussfaktoren auf die Werkstückqualität zur simulationsgestützten Berechnung der Fehlerfortpflanzung in der Sequenzfertigung. Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe des PTW: „Innovation Fertigungstechnik“, Aachen, Shaker Verlag, Dissertation.
- DGUV (2017): Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Arbeitsunfallgeschehen 2016, Statistik. München: DGUV, 62-63.
- Dispan J. (2017) Entwicklungstrends im Werkzeugmaschinenbau – Kurzstudie zu Branchentrends auf Basis einer Literaturrecherche, Düsseldorf, Hans-Böckler-Stiftung (Hrsg.)
- Djaloeis B. R.-S. (2015) Entwicklung eines Modells zur Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung. Technische Hochschule Aachen, Schriftenreihe Industrial Engineering and Ergonomics, Aachen, Shaker Verlag, Dissertation.
- EG, Europäische Gemeinschaft (2006) Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). In: Amtsblatt der Europäischen Union, L157/24, 24-86.
- Kesselkaul, R., Meyer, C. (2016) Priorisierung des Handlungsbedarfs – Schwerpunkte des Unfallgeschehens. Vortrag VDW –Technologietag – Risikobeurteilung und Nachweis eines tolerierbaren Restrisikos, Düsseldorf, 23.02.2016.
- Kirwan, B. (1994) A Guide to PRACTICAL HUMAN RELIABILITY ASSESSMENT. Boca Raton London New York Washington D. C.: CRC Press.
- Parry, G.W., Lydell, B.O.Y., (1992) An Approach to the Analysis of Operator Actions in Probabilistic Risk Assessments, EPRI TR-100259, Palo Alto, California.
- Reason, J. (1994) Menschliches Versagen – Psychologische Risikofaktoren und moderne Technologien. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag (Hrsg.).
- Refflinghaus, K., Bossmann, E. (2014) Prospektive Ermittlung und Reduzierung potenzieller Fehler für manuelle Montagelinien. In: Gesellschaft für Qualitätswissenschaft e. V. (Hrsg.) - Berichte zum Qualitätsmanagement. Shaker Verlag, 67-92.
- Sträter, O. (1997) Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit auf Basis von Betriebserfahrung. Technische Universität München, Köln: GRS Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH, Dissertation.
- Swain, A.-D., Guttman, H.-E (1983) Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications - Final Report NUREG/CR-1278. Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- VDI, Verein Deutscher Ingenieure (2003) Menschliche Zuverlässigkeit – Methoden zur quantitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit. VDI 4006 Blatt 2.
- VDI, Verein Deutscher Ingenieure (2015) Menschliche Zuverlässigkeit – Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung. VDI 4006 Blatt 1.

Danksagung: Die Autoren danken dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V., insbesondere dem Arbeitskreis 3 - Sicherheitstechnik für die spanende Bearbeitung - und seinen Mitgliedern, für die Finanzierung und Unterstützung der Studien. Die Autoren danken außerdem der Richard-Hartmann-Schule in Chemnitz, die die experimentelle Studie durch ihre Teilnahme unterstützt hat.



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