

Simulationsmodell zur Abbildung der Ursachen und Auswirkungen von menschlichen Fehlern in der Produktentwicklung

Sönke DUCKWITZ¹, Sven TACKENBERG², Dennis KOBELT²

*¹ Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen
Bergdriesch 27, D-52062 Aachen*

*² Labor für Industrial Engineering, Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Liebigstraße 87, 32657 Lemgo*

Kurzfassung: Wird die zur Verfügung stehende Zeit für eine Produktentwicklung reduziert, so nimmt die menschliche Zuverlässigkeit ab. Dieser postulierte Zusammenhang findet Bestätigung durch die Ergebnisse einer durchgeführten empirischen Studie und bildet die Grundlage für die Entwicklung eines aktororientierten, personenzentrierten Simulationsmodells. Durch das simulierte Verhalten der Arbeitspersonen eignet sich das Modell sehr gut für die Prognose von menschlichen Fehlern sowie zur Beschreibung der Auswirkungen im Arbeitsprozess.

Schlüsselwörter: Menschliche Zuverlässigkeit, Produktentwicklung, Simulation

1. Einleitung

Durch die fortschreitende digitale Transformation von Arbeitsprozessen und die damit verbundene Unterstützung der Arbeitspersonen ist zu beobachten, dass Hersteller von komplexen Produkten dazu übergehen, die zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit weiter zu reduzieren. Dies hat zur Folge, dass der erlebte Zeitdruck bei den involvierten Arbeitspersonen ansteigt und die Wahrscheinlichkeit menschlicher Zuverlässigkeit sinkt. Der Zeitpunkt des Auftretens von Fehlhandlungen sowie deren prozessuale Auswirkungen sind aber durch das Zusammenspiel der heterogenen Einflussfaktoren von Person, Produkt und Prozess bei einer Produktentwicklung (PE) bisher nur sehr schwer zu prognostizieren (Djaloeis 2015). Im Folgenden wird daher ein menschenzentriertes Modell zur Simulation der Entstehung und der Auswirkungen von menschlichen Fehlern bei einer PE eingeführt und mittels der Erkenntnisse aus einer Laborstudie ausgestaltet und parametrisiert.

2. Stand der Forschung

Bubb (1992) beschreibt Zuverlässigkeit als Fähigkeit des Menschen, eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall in einem Akzeptanzbereich durchzuführen. Diese Fähigkeit lässt sich differenzieren in sachliche und menschliche Leistungsvoraussetzungen (VDI-Richtlinie 4006). Der Begriff der sachlichen Leistungsvoraussetzung umfasst die organisatorischen, auf die Aufbau- und Ablauforganisation bezogenen Vorbedingungen sowie die technischen Vorbedingungen, wie beispielsweise situationsbezogene Faktoren oder die Schwierigkeit einer Aufgabe. Hingegen beziehen sich die menschlichen Leistungsvoraussetzungen auf

die physische und psychische Leistungsfähigkeit sowie Leistungsbereitschaft einer Arbeitsperson. Werden die Entscheidungen und das daraus resultierende Handeln von Arbeitspersonen als Ursache für eine veränderte Wahrscheinlichkeit von Fehlern bei einer PE zugrunde gelegt, so sind die folgenden Aspekte zu betrachten (Bartsch 2004):

- ausreichende Qualifikation der Arbeitsperson,
- korrekte und vollständige Informationen sowie keine übermäßige Unterbrechung,
- ausgeprägtes Vigilanzverhalten,
- psychologische Leistungsvoraussetzung,
- zugrunde liegende Organisation.

Die Multi-Aspekt-Taxonomie von Rasmussen (1982) wird im Folgenden für die Entwicklung des Simulationsmodells herangezogen, da in dieser sowohl situative als auch leistungsbeeinflussende Faktoren Berücksichtigung finden. Durch die von Rasmussen dargestellten Beziehungen lässt sich erklären, ob ein Fehler das Resultat eines externen Ereignisses (wie z.B. Ablenkung), einer Über- bzw. Unterforderung oder unzureichender Leistungsvoraussetzungen (z.B. Krankheit) ist. Ferner sind leistungsbeeinflussende Faktoren (Ziele und Absichten, Ressourcen) und situative Faktoren (physikalische Arbeitsumgebung, zeitliche Arbeitsorganisation) berücksichtigt, so dass auf dieser Basis eine ganzheitliche Betrachtung von Fehlern in der PE ermöglicht wird.

3. Empirische Studie zum Einfluss des Faktors „Verfügbare Zeit“

Für die menschliche Zuverlässigkeit bei der Ausführung von schwach-strukturierten Arbeitsprozessen liegen nur wenige empirische Daten vor. Um daher eine fundierte Entwicklung und Verifizierung des aktororientierten Simulationsmodells zu gewährleisten, sind aufbauend auf der phasenabhängigen Taxonomie von Djalois (2015) die Entscheidungsvariablen des Simulationsmodells (Tackenberg et al. 2010) betrachtet worden, die einen Einfluss auf die PE aufweisen und zugleich als valide Prädiktoren der menschlichen Zuverlässigkeit in der Literatur gelten.

3.1 Methodik

Im Folgenden wird sich ausschließlich auf menschliche Handlungen bzw. Fehlhandlungen während einer PE für eine definierte Entwicklungsaufgabe unter gegebene Rahmenbedingungen beschränkt. Ausgangspunkt für die Entwicklung des aktororientierten Simulationsmodells war die Analyse der Wirkung der Menge der verfügbaren Zeit auf die menschliche Zuverlässigkeit. Es handelt sich hierbei um eine Übertragung der bisherigen „Speed-Accuracy Tradeoff“ Untersuchungen für einfache sensumotorische Tätigkeiten auf PE, so dass die zu untersuchende Hypothese lautet: *„Die Arbeitsergebnisqualität bei einer PE steht in einem positiven Zusammenhang zur verfügbaren Bearbeitungszeit“*. Hieraus leitet sich die zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit der Aufgaben als unabhängige Variable für die vier Probandgruppen ab (s. Tabelle 1). Als abhängige Variablen sind je Aufgabe die Ergebnislänge und die Fehleranzahl erhoben worden. Ferner kam es zu einer verbalen, qualitativen Selbstkonfrontation mit den entwickelten Lösungen.

Das Aufgabensetting des Versuchs ist in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus an der RWTH

Aachen entwickelt worden und basiert auf den Grundsätzen der Konstruktionsmethodik nach Pahl et al. (1977):

- A_{1a}: Handschriftliches *Skizzieren der Bauteilstruktur für ein als Explosionszeichnung dargestelltes Produkt „Fahrradkurbel“*,
- A_{1b}: Handschriftliches *Skizzieren der Funktionsstruktur sowie Herstellen der Verbindung zwischen Bauteilstruktur und Funktionsstruktur*,
- A₂: *Anfertigen einer handschriftlichen Prinzipskizze zur Darstellung von Verbesserungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung des Produkteinsatzes*,
- A_{3a}: *Konstruieren der Fahrradkurbel mit dem CAD-Programm*,
- A_{3b}: *Montieren der unter A_{3a} entwickelten Kurbel mit dem CAD-Programm*.

Die Versuchsumgebung bestand aus einem Computerarbeitsplatz mit den CAD Programmen Wildfire 3.0 sowie Unigraphics NX 5.0. Die Dokumentation der Handlungen der Probanden erfolgte durch eine Videokamera sowie einer Software zum Aufzeichnen des Bildschirminhalts. Das Probandenkollektiv bestand aus 112 Studierenden des Wahlpflichtfachs „Konstruktionslehre I“ an der RWTH Aachen.

Tabelle 1: Bearbeitungsgruppen.

Teilaufgabe	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
1 _a , 1 _b	5 min	8 min	10 min	12 min
2	10 min	12 min	16 min	20 min
3 _a	5 min	8 min	10 min	13 min
3 _b	10 min	12 min	16 min	20 min
Gesamt	30 min	40 min	52 min	60 min

3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Voruntersuchung zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen den personenindividuellen Faktoren – Vorerfahrungen und räumliches Vorstellungsvermögen – und der Arbeitsergebnisqualität für die fünf Aufgaben nicht nachgewiesen werden kann.

Das Konstrukt der Arbeitsergebnisqualität für die fünf Aufgaben ist operationalisiert als Grad der Aufgabenerfüllung, das mit einer a priori definierten vierstufigen Bewertungsskala (mangelhafte Aufgabenerfüllung: Kategorie 1, sehr gute Aufgabenerfüllung: Kategorie 4) gemessen wurde. Die inhaltliche Auswertung der Aufgaben erfolgte durch einen Konstruktionsexperten des Lehrstuhls und Instituts für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus an der RWTH Aachen.

Der auf den Datensatz angewendete Kruskal-Wallis Test weist bei einem Signifikanzniveau von 0,01 nach, dass je Unteraufgabe keine Gleichverteilung der Arbeitsergebnisqualität über die vier Zeitgruppen vorliegt. Die weitergehende Analyse der Rangkorrelation mit dem Verfahren nach Spearman Roh bestätigt den vermuteten hoch signifikanten Zusammenhang zwischen der Ergebnisqualität der fünf Aufgaben und der zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit bei einem zweiseitigen Signifikanzniveau von 0,01. Die graphische Darstellung der Daten mittels Fehlerbalkendiagramm sowie der paarweise Vergleich der Gruppen mit Hilfe des post hoc Mann-Whitney-Tests weisen nach, dass signifikante Unterschiede in Bezug auf die Ergebnisgüte erst bei ausreichend großen Zeitabständen zwischen den Gruppen entstehen (s. Abbildung 1). Die formulierte Hypothese ist beizubehalten, so dass im Simulationsmodell eine negative Korrelation zwischen der Entscheidungsvariable Bearbeitungszeit und der Wahrscheinlichkeit eines Fehlers abzubilden ist.

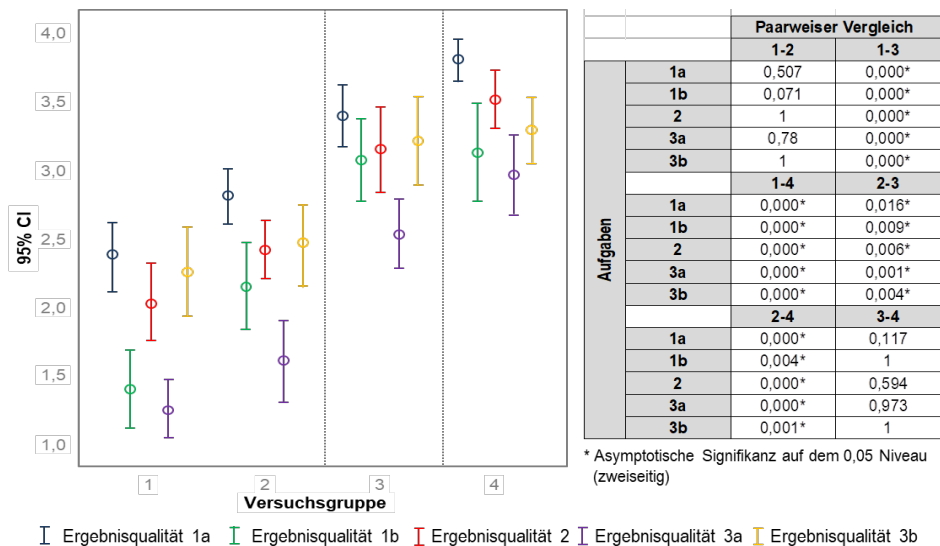


Abbildung 1: Erreichte Ergebnisqualität der vier Zeitgruppen je Aufgabentyp.

4. Aktororientiertes personenzentriertes Simulationsmodell

Das Simulationsmodell basiert auf den vorangegangenen Veröffentlichungen zu unserem aktororientierten, personenzentrierten Simulationswerkzeug mit stochastischen Aktivitätsdauern (Tackenberg et al. 2010). Im Folgenden wird sich daher auf die Darstellung der vorgenommenen Erweiterung um den Aspekt der menschlichen Zuverlässigkeit beschränkt.

4.1 Softwarewerkzeug

Während der simulierten Durchführung einer PE wechselt die Arbeitsperson mehrfach zwischen ihren Status „Sperrzeit“, „Organisieren“ und „Bearbeiten“. Der Status „Sperrzeit“ bildet die Nicht-Verfügbarkeit der Arbeitsperson z.B. aufgrund einer Pause ab. Im Status „Organisieren“ priorisiert die Arbeitsperson die ausführbaren Aufgaben mittels des von Licht (2008) vorgestellten Priorisierungsalgorithmus und wählt eine Aufgabe für die Bearbeitung aus. Die Handlungen zur Bearbeitung der ausgewählten Aufgabe erfolgen im Status „Bearbeiten“.

Der implementierte Algorithmus durchläuft während einer Simulation immer die gleiche Abfolge von Ereignissen und Zuständen. Die Arbeitsperson priorisiert zunächst alle Arbeitsaufgaben in ihrem Aufgabenpool, wählt die Aufgabe mit der höchsten Priorität aus und prüft die Verfügbarkeit der erforderlichen Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte. Ist deren Verfügbarkeit gegeben, wechselt sie in den Status „Bearbeiten“, andernfalls wird die Aufgabe mit der nächstniedrigeren Priorität ausgewählt. Sollte keine Aufgabe von der Arbeitsperson ausgewählt werden können, wechselt die Arbeitsperson in den Status „Unbeschäftigt“. Ein solcher Status kann aufgrund einer unzureichenden Bearbeitung aller Vorgängeraufgaben durch andere Arbeitspersonen auftreten oder eine andere Arbeitsperson steht für die geforderte kooperative Bearbeitung nicht zu Verfügung. Während der Aufgabenbearbeitung erhöht sich der Bearbeitungsgrad der Aufgabe. Ferner prüft die Arbeitsperson, ob die Arbeitsaufgabe fertig gestellt ist oder ob eine personenindividuell festgelegte Zeitspanne abgelaufen ist. In beiden Fällen wechselt die Arbeitsperson in den Status „Organisieren“, priorisiert den Aufgabenpool und wählt eine neue oder die gleiche Aufgabe für die Bear-

beitung aus. Bei einer vollständigen Bearbeitung einer Aufgabe wird ein Arbeitsobjekt als Output erzeugt, welches den erforderlichen Input für die initiale Bearbeitung der nachfolgenden Aufgaben darstellt.

Basierend auf den Erkenntnissen der empirischen Studie ist der Zusammenhang zwischen der Bearbeitungszeit einer Aufgabe und der menschlichen Zuverlässigkeit in das Simulationsmodell aufgenommen worden. Um diesen Zusammenhang abzubilden, erfasst der Algorithmus den Fertigstellungszeitpunkt einer Aufgabe und ermittelt die von der Arbeitsperson benötigte Bearbeitungszeit. Dieser Zeitwert wird mit einer aufgabenspezifischen Wahrscheinlichkeitsverteilung abgeglichen und führt zu der Festlegung, ob es bei der Aufgabenbearbeitung zu einem Fehler gekommen ist. Liegt ein Fehler vor, wird der Fehler dem Arbeitsobjekt mit den Attributen „Fehlerart {Fehler-ID}, Fehler bekannt {ja, nein} zugeordnet. Wird ein Fehler während der Bearbeitung einer nachgelagerten Aufgabe entdeckt, ist im Modell berücksichtigt, dass dies zu einer iterativen Bearbeitung von bereits abgeschlossenen Aufgaben und/oder zu einem Mehraufwand von zukünftig zu bearbeitenden Aufgaben führen kann. Die hierzu erforderlichen Informationen sind in einer Design Structure Matrix abgebildet:

- Wahrscheinlichkeit je Aufgabe, mit der ein Fehler bei der Bearbeitung, dieser der Fehlerursache nachfolgenden Aufgabe, identifiziert wird,
- Aufgaben, die durch den Fehler iterativ zu bearbeiten sind,
- Zeitaufwand für die iterative Bearbeitung je abgeschlossener Aufgabe,
- Zeitlicher Mehraufwand für noch nicht begonnene Aufgaben.

Der Algorithmus bestimmt in Abhängigkeit des Zeitpunktes der Kenntnis des Fehlers die Anzahl der iterativ zu bearbeitenden Aufgaben sowie die erforderlichen Zeitaufwände zur Fehlerbehebung. Weist der Algorithmus basierend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung im Anschluss an eine Aufgabenbearbeitung einem Arbeitsobjekt einen konkreten Fehler zu, so werden die nachfolgenden Aufgaben von den Arbeitspersonen solange entsprechend der initialen Planung bearbeitet, bis eine Arbeitsperson den Fehler im Rahmen einer Aufgabenbearbeitung feststellt. Dieses Ereignis führt zu einer Festlegung der erforderlichen Nacharbeit in Form von iterativ zu bearbeitenden Aufgaben oder der erforderlichen Anpassung des Zeitaufwands für die noch nicht abgeschlossenen Aufgaben.

4.2 Verifizierung

Zur Verifizierung des Simulationsmodells wurde ein bereits bestehendes Modell (Tackenberg et al. 2010) eines Produktentwicklungsprojektes angepasst. Auf der Abszisse des Graphen in Abbildung 2 ist die Dauer der PE und auf der Ordinate die kumuliert geleistete Arbeit in Zeiteinheiten [ZE] abgetragen. Die ausgewählten drei Kurven zeigen den zeitlichen Verlauf der PE in Abhängigkeit der Fehlerart, des Zeitpunktes der Fehlerentstehung sowie des Zeitpunktes, an dem der Fehler von der Arbeitsperson identifiziert worden ist. Die Heterogenität der simulierten Dauer der PE resultiert aus dem Entscheidungsverhalten der Arbeitspersonen und den Mehraufwänden, die sich aus dem Zeitpunkt der Fehlerentstehung und -identifizierung ergeben. Unterschiede bei der kumulativ geleisteten Arbeit je Simulationslauf ergeben sich aus der stochastischen Dauer einer Aufgabenbearbeitung (abgebildet durch eine Beta-Verteilung) sowie aus dem fehlerbedingten zeitlichen Mehraufwand.

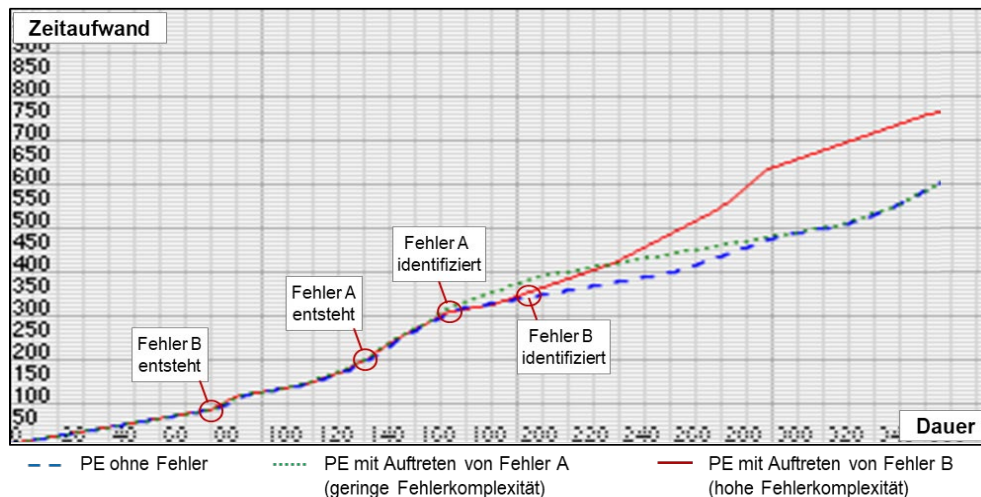


Abbildung 2: Unterschiedliche Simulationsläufe in Abhängigkeit von der Fehlercharakteristik

5. Ausblick

Der Simulationsansatz ermöglicht die Beschreibung und Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit im Kontext einer PE. So werden Entscheidungsträger durch das aktororientierte, personenzentrierte Simulationsmodell befähigt, das Entscheidungsverhalten von Arbeitspersonen zu berücksichtigen und angemessene Planzeiten für eine PE festzulegen, um die Wahrscheinlichkeit von Fehlern zu minimieren.

Das bestehende Simulationsmodell muss noch einer umfangreichen Verifizierungsstudie unterzogen werden, da bisher ausschließlich die Erprobung der Algorithmen zur Abbildung des Entscheidungsverhaltens von Arbeitspersonen, der iterativen und kooperativen Ausführung von Aufgaben sowie der stochastischen Ermittlung von Zeitaufwänden fokussiert wurde. Ferner ist angedacht, bedingte Wahrscheinlichkeiten für das Entstehen und das Identifizieren von Fehlern in das Modell aufzunehmen. Hierzu soll basierend auf dem Bayes-Theorem eine dynamische Berechnung der Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom aktuellen Projektfortschritt erfolgen.

6. Literatur

- Bartsch H (2004) Menschliche Zuverlässigkeit in Flug-Arbeitssystemen. Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion. 46. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V. DLGR-Bericht 2003-04. Bonn, 147-157.
- Bubb H (1992) Menschliche Zuverlässigkeit. Definitionen, Zusammenhänge, Bewertung. Landsberg, Lech: Ecomed.
- Djaloeis BRS (2015) Entwicklung eines Modells zur Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit in der Produktentwicklung. Aachen: Shaker.
- Licht T (2008) Entwicklung eines personenzentrierten Simulationsmodells zur Unterstützung des Multiprojektmanagements in der Produktentwicklung. Aachen: Shaker.
- Pahl G, Beitz W, Feldhusen J, Grote KH (1977) Konstruktionslehre. Berlin: Springer.
- Rasmussen J (1982) Human Errors: A Taxonomy for Describing Human Malfunction in Industrial Installations. Journal of Occupational Accidents 4:311-333.
- Tackenberg S, Duckwitz S, Schlick C M (2010) Simulation des Entscheidungsverhaltens von Akteuren zur Evaluation der Produktivität von Dienstleistungen. Conference: Informatik 2010: Service Science - Neue Perspektiven für die Informatik, 641-646.
- VDI 4006 Blatt 1 (2002): Menschliche Zuverlässigkeit – Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung. VDI-Handbuch technischer Zuverlässigkeit.



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