

## **Individuelle Hygienekonzepte für die Produktion während COVID-19**

Bastian SANDER, Stefanie SAMTLEBEN, Thomas DENGLER

*Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF  
Sandtorstraße 22, D-39106 Magdeburg*

**Kurzfassung:** Um während der SARS-CoV-2-Pandemie (COVID-19) die Arbeitsfähigkeit in der Produktion zu gewährleisten, hat das Fraunhofer IFF im Rahmen des Forschungsvorhabens AVATOR ein Vorgehen zur Erstellung von individuellen Hygienekonzepten entwickelt. Die zur Risikobewertung benötigten Daten werden über Raumklimasimulationen erzeugt. Im Projekt AVATOR wurden verschiedene Simulationsansätze verwendet, um den untersuchten Szenarien gerecht zu werden. Im Fall der produzierenden Unternehmen wurde ein sogenanntes Zonenmodell erstellt, das in einem Fall mit einer Agentensimulation gekoppelt wurde. Dadurch können produzierenden Unternehmen Wege aufgezeigt werden, unter pandemischen Einflüssen Produktionsausfälle und Fehlinvestitionen zu vermeiden und Mitarbeitende effektiv zu schützen.

**Schlüsselwörter:** Hygienekonzept, COVID-19, Risikomodellierung, Raumklimasimulation

### **1. Einleitung**

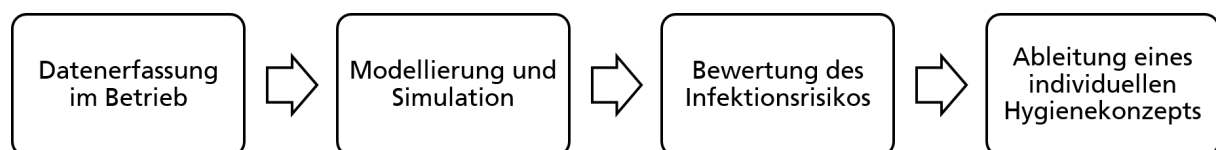
Der nunmehr wiederholte rasante Anstieg der Fallzahlen im Jahr 2021 nach ruhigeren Sommermonaten zeigt klar, dass eine Pandemiebekämpfung ausschließlich durch Kontaktpersonennachverfolgung erfolglos ist. Erneut auf Lock-Downs zu setzen, könnte, in der Hoffnung, Infektionszahlen zu senken, die reflexartige Reaktion darauf sein. Damit einher geht neben anderen besorgniserregenden Nebenwirkungen (Unterlassung dringender medizinischer Behandlungen, soziale Deprivation bei Kindern und Jugendlichen, Brüche in Bildungs- und Berufsausbildungsgängen, Niedergang vieler kultureller Einrichtungen, zunehmende soziale Schieflage) ein Überlebenskampf ganzer Wirtschaftszweige (Kassenärztliche Bundesvereinigung et al. 2020). So gab es im April 2020 im Vergleich zum Vormonat mit 18 % den stärksten Rückgang der Produktion im produzierenden Gewerbe seit 1991 (Rudnicka 2021). Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen sind durch die volatile Auftragslage existenziell bedroht, da sie kaum über materielle und personelle Reserven verfügen. Führende Virologen und Politiker aber mahnen: COVID-19 wird noch uns noch Jahre begleiten (Lauterbach 2021; Priesemann et al. 2021).

Neben kurzfristigen Notfall-Lösungen sind mittelfristige Ansätze geboten. Eine Entscheidungsunterstützung für Verantwortliche zum bedachten, aber proaktiven Handeln im Falle hoher Infektionszahlen fehlt. So steht mit dem Risk-Calculator des Max-Planck-Instituts für Chemie (Lelieveld et al. 2020) eine zwar genaue und aktuelle Abschätzung des Infektionsrisikos zur Verfügung, doch ist es ohne Weiteres nicht möglich, daraus eine direkt umsetzbare Vorgehensweise zum Infektionsschutz von Personen abzuleiten. Vielmehr müssen diese und andere Instrumente (z.B. COVID-Airborne-Transmission-Estimator, Jimenez et al. 2020) in ein Vorgehen eingebettet

werden, um Sicherheits- und Arbeitsschutzbeauftragte zur Entscheidung über differenzierte Schutzmaßnahmen zu befähigen. Das Ziel des Forschungsprojekts „Anti-Virus-Aerosol: Testing, Operation, Reduction“ (AVATOR) bestand daher in der Entwicklung eines generischen, doch praktisch anwendbaren Verfahrens, um für unterschiedlichste Anwendungsfälle individuelle Hygienekonzepte ableiten zu können. Zu diesem Zweck wurde in fünf unterschiedlichen Umgebungen (Flugzeug, Klassenzimmer, Supermarkt, zwei Produktionsumgebungen) die Advektion virusbelasteter Aerosole numerisch mit Hilfe von Raumklimasimulationen untersucht, die resultierende zeitabhängige Feldverteilung ermittelt und auf deren Basis die Bewertung des Infektionsrisikos für jeden Mitarbeitenden durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Hygienekonzepte berücksichtigen die spezifischen Gegebenheiten und Anforderungen vor Ort. Nach der Beschreibung der Methodik wird in der vorliegenden Arbeit exemplarisch gezeigt, wie in einer Keramikgießerei die Produktionsfähigkeit unter Beachtung des unbedingten Gesundheitsschutzes für alle Mitarbeitenden aufrechterhalten werden kann.

## 2. Vorgehen zur Ableitung eines individuellen Hygienekonzepts

Im Folgenden werden die vier essenziellen Schritte des entwickelten Verfahrens vorgestellt (vgl. Abb. 1), anhand dessen individuelle Hygienekonzepte für beliebige Umgebungen abgeleitet werden können. An einem Beispiel aus der Produktion wird das Verfahren illustriert.

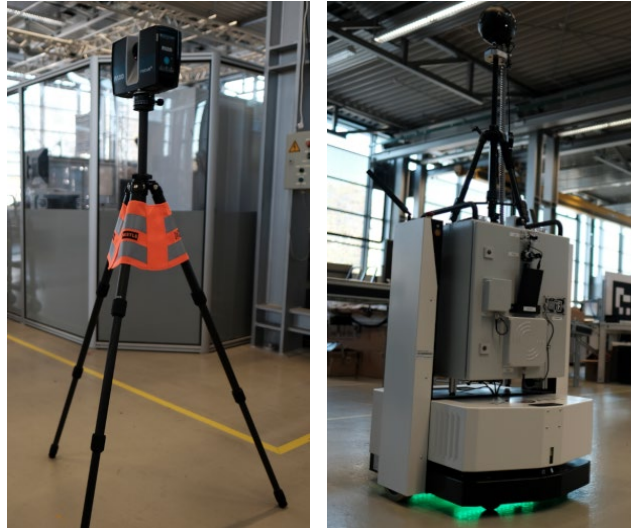


**Abbildung 1:** Chronologische Abfolge der einzelnen Schritte zur Ableitung eines Hygienekonzepts.

### 2.1 Datenerfassung im Betrieb

Zuerst wird gemeinsam mit dem Unternehmen ein kritischer Untersuchungsbereich festgelegt, in dem ein hohes Infektionsrisiko vermutet wird, z.B. wenn viele Personen zusammenkommen, ungünstige klimatische Bedingungen vorliegen oder Personen über einen langen Zeitraum zusammen sind.

Danach werden die Gegebenheiten vor Ort erfasst, damit sie in der Raumklimasimulation berücksichtigt werden können. Dazu gehört die Geometrie des Untersuchungsbereichs, die mit Hilfe eines Laserscanners als Punktwolke erfasst und in ein 3D-Modell überführt wird, um somit die Randbedingungen für die Simulation bereitzustellen, z.B. Lage und Größe von Luftein- und -auslässen. Die Strömungsbedingungen (Lüftungsanlagen, Ventilatoren, Fenster, Tore) werden entweder direkt vermessen oder, falls keine messtechnische Erfassung möglich ist, in Gesprächen mit aussagefähigen Ansprechpartnern plausibilisiert und mit Referenzwerken (z.B. Arbeitsstättenrichtlinien) verifiziert. Weitere Messungen der ortsabhängigen Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Partikelkonzentration werden zur späteren Validierung der numerischen Lösung mittels einer autonom fahrenden Sensorbox durchgeführt (Abb. 2).



**Abbildung 2:** Laserscanner zur Erfassung der Geometrie (links) sowie die autonom fahrende Sensorplattform zur Erfassung von Luftparametern (rechts).  
Urheber: © Fraunhofer IFF

## 2.2 Modellierung und Simulation

Simulationen auf Basis numerischer Strömungsmechanik haben sich zu einem wichtigen Werkzeug zum Verständnis der Ausbreitungsdynamik aerogener Infektionskrankheiten entwickelt, zu denen auch SARS-CoV-2 gehört (Vuorinen et al. 2020). In AVATOR werden unterschiedliche numerische Ansätze für die Raumklimasimulationen verfolgt, deren Eignung sich jeweils aus der Größe des Untersuchungsbereichs und der räumlichen Auflösung ergibt: Zonenmodelle für große Hallen (Norrefeldt et al. 2012), Gittermodelle für kleinere Räume (McGrattan et al. 2000), gitterfreie Methoden für komplizierte Geometrien (Kuhnert 2014). Im Nahfeld werden Aerosole als Partikel abgebildet, im Fernfeld als Dichteverteilungen.

Die Aerosole bilden den Lebensraum für Viren, sobald diese durch Emissionsereignisse (Atmen, Sprechen, Niesen) den menschlichen Körper verlassen. Die Viren können in den Aerosolen mehrere Stunden überdauern. Die initiale Viruslast kann normal oder drastisch erhöht sein (Super-Spreader). Eine Abnahme der Viruslast in der Luft erfolgt nur durch Verdunstung der Aerosole (Entzug des Lebensraumes) oder durch biologische Inaktivierung (Lebensdauer der Viren).

In den Simulationsstudien werden bestimmte Parameter variiert, die einen Einfluss auf die Verteilung der Aerosole haben. Somit können verschiedene Risikoszenarien mit der Ausgangsvariante verglichen werden. Außerdem werden Abhängigkeiten sichtbar, die einen Hinweis auf sinnvolle technische Schutzmaßnahmen geben.

## 2.3 Bewertung des Infektionsrisikos

Aus der räumlichen Konzentration der virusbelasteten Aerosole, den Bewegungsmustern sowie Expositionszeiten der Mitarbeitenden, dem emittierten Luftvolumen der infizierten Personen, der Inhalationsrate der Rezipienten sowie der Depositionseffizienz aerogener Viren in deren Atemwegen kann der zeitliche Verlauf der Wahrscheinlichkeit einer Infektion für jeden Mitarbeitenden bestimmt werden. Die emittierte Viruslast hängt vom Emissionsereignis und die Inhalationsrate von der körperlichen Aktivität ab. Die Risikobewertung wird durch einen funktionalen Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Virusmenge (Dosis) und der

körperlichen Reaktion (Wirkung) vorgenommen. In AVATOR wird das Wells-Riley-Modell (Wells 1955, Riley et al. 1978) und ein Dose-Response-Modell mit Schwellwert verwendet. Letzteres wird an experimentelle Daten aus der Literatur angepasst und spiegelt das Infektionsrisiko für kleine Dosen besser wider als das Wells-Riley-Modell, das schon für einen Virus eine Infektionswahrscheinlichkeit angibt.

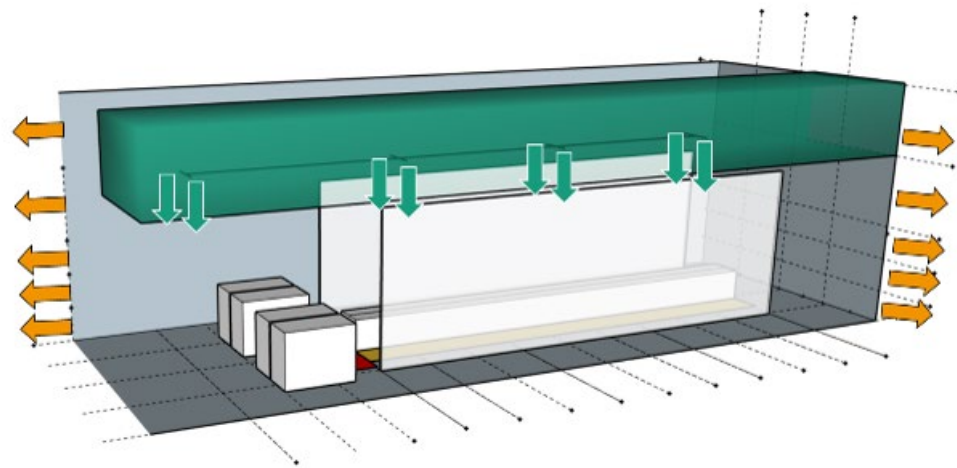
Das Infektionsrisiko wird in der Ausgangsvariante (IST-Situation ohne Schutzmaßnahme) bewertet und bildet den Höchstwert der Risikoskala. Relativ dazu werden Szenarien mit Schutzmaßnahmen (einzeln und kombiniert) bewertet.

## *2.4 Ableitung eines individuellen Hygienekonzepts*

Ein Hygienekonzept besteht aus konkreten Handlungsanweisungen, um einen angemessenen Schutz von Personen gegen eine Infektion zu gewährleisten. Die Schutzmaßnahmen in AVATOR orientieren sich dabei am TOP-Prinzip, einer Maßnahmenhierarchie, die im Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG §4) sowie der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV §4, Abs. 2) verankert ist. Demnach sind zuerst (t)echnische Maßnahmen zu prüfen und umzusetzen, danach (o)rganisatorische und zuletzt (p)ersönliche Schutzmaßnahmen. Mithilfe der Simulationsstudien wird der Einfluss der Schutzmaßnahmen auf das Infektionsrisiko quantifiziert und somit kann ein mit den betrieblichen Abläufen verträgliches Hygienekonzept abgestimmt werden. So entstehen ein Maßnahmenplan und eine Entscheidungsgrundlage für Unternehmen, um den Aufwand gegen den Nutzen abzuschätzen. Dies führt zu mehr Transparenz bei der Maßnahmenumsetzung, einer erhöhten Resilienz des Unternehmens gegen pandemische Situationen sowie einem erhöhten Gesundheitsschutz der Mitarbeitenden.

## *2.5 Beispiel: Schicht in einer Keramikgießerei*

In diesem Szenario arbeiten zwei Personen auf begrenztem Raum mit relativ hoher Luftfeuchtigkeit und hoher Temperatur während einer achtstündigen Schicht zusammen. Sie bewegen sich dabei innerhalb von ca. drei Stunden entlang der beiden Seiten einer Rollenbahn (Länge ca. 13 m), wobei sie sich stetig gegenüberstehen. Danach arbeiten beide Personen für ca. eine Stunde an jeweils einem Nachbearbeitungsplatz am Ende der Rollenbahn. Dieses Bewegungsmuster wiederholt sich in den nächsten vier Stunden. Eine Person ist infiziert, für die andere Person wird das Infektionsrisiko bestimmt. Der gesamte Untersuchungsbereich hat eine Größe von 8 m x 23 m x 7,20 m (Länge, Breite, Höhe) und die feinste räumliche Auflösung beträgt 2 m x 1,5 m x 1 m (Abb. 3). Die Datenaufnahme vor Ort (Geometrie, Luftparameter) dauerte etwa drei Stunden. Die Modellierung und Simulation erfolgte mit einem Zonenmodell (Norrefeldt et al. 2012). Das zentrale Zuluftsystem besitzt acht Auslässe und die Abluft kann über offene Seitenflächen gleichmäßig abgeführt werden. Ventilatoren erzeugen lokale Luftströmungen von 0,1 bis 0,8 m/s. In der Simulationsstudie wurden die Luftwechselrate, das Verhältnis von Frisch- zu Umluft sowie die Infektiosität des Emitters (normal, Super-Spreader) variiert.



**Abbildung 3:** Simulationsszenario der Keramikgießerei mit Zu- und Abluft (Pfeile), der Rollenbahn (zentrale längliche weiße Box) sowie den beiden Nachbearbeitungsplätzen (weiße Boxen, links im Bild).  
Urheber: © Fraunhofer IBP

In Tabelle 1 ist das Infektionsrisiko in der Ausgangsvariante sowie der Einfluss einzelner und kombinierter Schutzmaßnahmen nach dem TOP-Prinzip angegeben. Ein mögliches Hygienekonzept, das auch effektiv bei einem Super-Spreading-Ereignis schützt, wäre durch Kombination von T2, O1 und P2 gegeben.

**Tabelle 1:** Infektionsrisiko nach einer Expositionsdauer von acht Stunden. Die Wirkung ausgewählter technischer (T), organisatorischer (O) und persönlicher (P) Schutzmaßnahmen und deren Kombinationen ist dargestellt. In der Effizienz der Masken sind Leckagen berücksichtigt (Persson 2021). Das Risiko in einer Variante muss immer mit der Ausgangsvariante verglichen werden.

Risikovariante	Infektionsrisiko (normal / Super-Spreader)	
	Wells-Riley-Modell	Dose-Response-Modell
Ausgangsvariante (ungeschützt)	3,3 % / 99,8 %	1,1 % / 100 %
T1: Erhöhung des Frischluftanteils	1,7 % / 94,8 %	0,7 % / 99,9 %
T2: Erhöhung der Luftwechselrate	0,8 % / 72,6 %	0,2 % / 82,5 %
O1: Personen bewegen sich diagonal	3,0 % / 99,5 %	1,0 % / 100 %
P1: Personen tragen N95-Maske	0,02 % / 4,4 %	< 0,01 % / 1,4 %
P2: Personen tragen FFP2-Maske	< 0,01 % / 0,8 %	< 0,01 % / 0,5 %
Kombination: T1, O1	1,1 % / 85,5 %	0,6 % / 98,1 %
Kombination: T2, O1	0,3 % / 44,3 %	0,07 % / 27,5 %
Kombination: T2, O1, P2	< 0,01 % / 0,08 %	< 0,01 % / 0,4 %

### 3. Zusammenfassung

Das vorgestellte Vorgehen erweitert bisherige Untersuchungen zum Infektionsgeschehen (Jimenez 2020; Lelieveld 2020), indem durch den numerischen Ansatz eine orts- und zeitaufgelöste Risikobewertung für jeden einzelnen Mitarbeitenden möglich ist. Durch Datenerfassungen vor Ort werden spezifische lokale Gegebenheiten wie Luftströmung, Temperatur, Anzahl und Bewegungsmuster von Personen, Expositionsdauer, körperlicher Aktivität und Emissionsereignisse berücksichtigt. Es können sowohl die Auswirkung mehrerer Emitter auf das Infektionsrisiko als auch Super-Spreader-Ereignisse untersucht werden. Der

Untersuchungsbereich kann dabei von kleinen Räumen mit wenigen Personen bis zu Produktionshallen mit vielen anwesenden Personen variieren. Der betrachtete Zeitraum umfasst wenige Minuten bis mehrere Tage. Der Einfluss von einzelnen oder kombinierten Schutzmaßnahmen auf das Infektionsrisiko kann quantifiziert werden. Dadurch wird Sicherheitsbeauftragten eine fundierte Entscheidungsunterstützung zur Ableitung individueller Hygienekonzepte bereitgestellt, die sowohl effektiv risikomindernd als auch verträglich mit betrieblichen Abläufen sind. Das Vorgehen ist dabei nicht auf SARS-CoV-2 beschränkt, sondern durch eine parametrische Beschreibung auf beliebige aerogene Infektionskrankheiten adaptierbar.

#### 4. Literatur

- Jimenez J-L, Human K, Simpkins K (2020) COVID-19 Airborne Transmission Tool Available, Accessed Dec 13, 2021. <https://cires.colorado.edu/news/covid-19-airborne-transmission-tool-available>
- Kassenärztliche Bundesvereinigung, Streeck H, Schmidt-Chanasit J (2020) Positionspapier von Wissenschaft und Ärzteschaft zur Strategieanpassung im Umgang mit der Pandemie. Evidenz- und Erfahrungsgewinn im weiteren Management der Covid-19-Pandemie berücksichtigen, Accessed Dec 13, 2021. [https://www.kbv.de/media/sp/KBV-Positionspapier\\_Wissenschaft\\_Aerzteschaft\\_COVID-19.pdf](https://www.kbv.de/media/sp/KBV-Positionspapier_Wissenschaft_Aerzteschaft_COVID-19.pdf)
- Kuhnert J (2014) Meshfree numerical schemes for time dependent problems in fluid and continuum mechanics. In: Sudarshan S (Ed) Advances in PDE modeling and computation, Ane Books, 119-136
- Lauterbach K (2021) Fernsehinterview bei BILD Live am 10.12.2021. Accessed Dec 15, 2021. <https://www.bild.de/politik/inland/politik-inland/gesundheitsminister-lauterbach-werden-corona-in-meiner-amtszeit-nicht-besiegen-78503852.bild.html>
- Lelieveld J, Helleis F, Borrmann S, Cheng Y, Drewnick F, Haug G, Klimach T, Sciare J, Su H, Pöschl U (2020) Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments, Int. J. Environ. Res. Public Health, 17:1-18.
- McGrattan KB, Baum HR, Rehm RG, Hamins A, Forney GP (2000) Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6467.
- Norrefeldt V, Grün G, Sedlbauer K (2012) VEPZO e Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space, Building and Environment, 48:183-194.
- Persson BNJ (2021) Side-leakage of face mask, The European physical journal E, 44:75.
- Priesemann V, Meyer-Hermann M, Pigeot I, Schöbel A (2021) Der Beitrag von epidemiologischen Modellen zur Beschreibung des Ausbruchsgeschehens der COVID-19-Pandemie, Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz; 64:1058-1066.
- Riley EC, Murphy G, Riley RL (1978) Airborne spread of measles in a suburban elementary school. American Journal of Epidemiology, 107:421-432.
- Rudnicka J (2021) Veränderung der Produktion im produzierenden Gewerbe zum Vormonat bis Oktober 2021, Statista, Accessed Dec 13, 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/150649/umfrage/produktion-im-produzierenden-gewerbe/#professional>.
- Vuorinen V, Aarnio M, Alava M, Alopaeus V, Atanasova N, Auvinen M, Balasubramanian N, Bordbar H, Erästö P, Grande R, Hayward N, Hellsten A, Hostikka S, Hokkanen J, Kaario O, Karvinen A, Kivistö I, Korhonen M, Kosonen R, Kuusela J, Lestinen S, Laurila E, Nieminen HJ, Peltonen P, Pokki J, Puisto A, Råback P, Salmenjoki H, Sironen T, Österberg M (2020) Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors, Saf. Sci., 130:104866.
- Wells WF (1955) An Ecological Study of Droplet Infections. In: Airborne Contagion and Air Hygiene. Harvard Univ. Press, 117-122.

**Danksagung:** Ein ganz besonderer Dank gilt den beiden produzierenden Unternehmen für ihre Bereitschaft zur Teilnahme an dem Projekt, für die Unterstützung bei der Aufnahme von Daten sowie für weiterführende Auskünfte für die Modellierung der Produktionsszenarien. Das Forschungsprojekt „AVATOR“ wurde aus Mitteln des Sofortprogramms „Anti-Corona“ der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.





Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

## Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten

68. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und  
Fabrikautomatisierung IFF, Magdeburg

02. – 04. März 2022

---

## GfA-Press

---

**Bericht zum 68. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. – 04. März 2022**

**Otto-von Guericke-Universität Magdeburg;  
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.  
Sankt Augustin: GfA-Press, 2022  
ISBN 978-3-936804-31-7

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin**

**Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

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,
- den Kongressband 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.

### **Geschäftsstelle der GfA**

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003

Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

[info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](mailto:info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de) · [www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](http://www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de)

### **Screen design und Umsetzung**

© 2022 fröse multimedia, Frank Fröse

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