

Gefahrstoffexposition bei der Flächendesinfektion

W. Wegscheider, R. Beisser, A. Martiny, G. Naujoks, D. Köster, B. Heinrich, J. Gerding

ZUSAMMENFASSUNG Flächendesinfektionen sind im Gesundheitsdienst und inzwischen auch in vielen anderen Branchen alltägliche Routine. Die eingesetzten Desinfektionsmittel enthalten teilweise Stoffe, die in die Luft gelangen und zu einer Exposition der Beschäftigten führen können. In einer Prüfkabine wurden Flächendesinfektionsarbeiten unter realistischen Bedingungen nachgestellt und die inhalative Exposition gegenüber diesen Stoffen bestimmt. Als Desinfektionsmittel wurden handelsübliche Produkte für die Wischdesinfektion ausgewählt. Die Produkte enthielten die Wirkstoffe Ethanol, Glutaraldehyd, eine Mischung aus Glutaraldehyd und Formaldehyd sowie eine Mischung aus Peroxyessigsäure und Wasserstoffperoxid. Die Messungen haben gezeigt, wie sich die Wirkstoffe auf eine Exposition auswirken können und bis zu welchen Flächengrößen sicheres Arbeiten möglich ist. Zudem ergab sich durch die gute Reproduzierbarkeit der Daten die Möglichkeit, Berechnungsmodelle zu überprüfen.

Exposure to hazardous substances during surface disinfection

ABSTRACT Surface disinfection is an everyday routine in the health service and has now become commonplace in many other professions as well. Some of the applied disinfectants contain substances that are released into the air and can lead to occupational exposure. In a test cabin, surface disinfection tasks were simulated under realistic conditions to assess inhalation exposure to these substances. The disinfectants selected were commercially available products. The products contained the active substances ethanol, glutaraldehyde, a mixture of glutaraldehyde and formaldehyde, and a mixture of peroxyacetic acid and hydrogen peroxide. The measurements demonstrated how the active substances can affect exposure, and identified the maximum surface area dimensions on which it is safe to work. Furthermore, the high level of data reproducibility made it possible to assess calculation models.

1 Einleitung

Flächendesinfektion ist eine hygienisch notwendige Tätigkeit, die täglich tausendfach in hygienekritischen Bereichen, z. B. im Gesundheitsdienst, durchgeführt wird. Durch die ubiquitäre Corona-Infektionsgefährdung gibt es Flächendesinfektionen inzwischen auch in vielen anderen Branchen. Die eingesetzten Produkte können Wirkstoffe enthalten, die bei Raumtemperatur nur in unwesentlichem Maße in die Luft gelangen können, wie Alkylamine, Guanidine oder quartäre Ammoniumverbindungen. Häufig kommen aber auch Wirkstoffe zum Einsatz, die bei Raumtemperatur leicht flüchtig sind. Es handelt sich dabei um Alkohole, Peroxide wie Wasserstoffperoxid und Peroxyessigsäure sowie Aldehyde. Aus dem unvermeidbar offenen Arbeitsverfahren resultiert bei den genannten flüchtigen Wirkstoffen eine inhalative Exposition der Beschäftigten, die üblicherweise durch Arbeitsplatzmessungen nach der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 402 [1] ermittelt und beurteilt wird. Eine Alternative zu Expositionsmessungen stellen Handlungsempfehlungen nach TRGS 400 [2] wie die Empfehlungen der Unfallversicherungsträger zur Gefährdungsbeurteilung (EGU) dar. Sie beschreiben bereits untersuchte Arbeitsverfahren und die auftretenden inhalativen Belastungen sowie ausreichende Schutzmaßnahmen für ein sicheres Arbeiten. Die bestehende EGU für Flächendesinfektionen wird derzeit grundlegend überarbeitet und auf einen aktuellen Stand gebracht [3]. Dazu soll ermittelt werden, welche Wirkstoffe eine Expositionsrelevanz haben und wie hoch die inhalative Exposition der Beschäftigten ist. Des Weiteren kam es im Laufe der

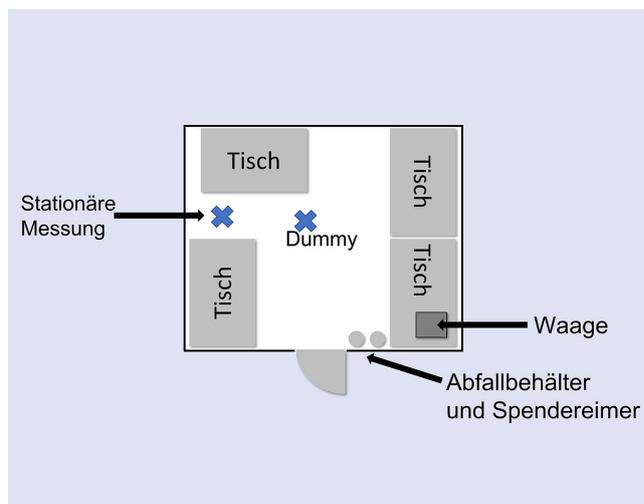
Jahre für einige der expositionsrelevanten Wirkstoffe teilweise zu einer erheblichen Reduzierung der Grenzwerte, nach denen die Exposition nun neu zu beurteilen ist. Eine parallel zu der Überarbeitung der EGU erstellte DGUV Information 207-206 „Tätigkeiten mit Desinfektionsmitteln im Gesundheitsdienst“, greift ebenfalls auf messtechnische Ergebnisse zurück und nutzt diese für Aussagen zu wirksamen Schutzmaßnahmen. Zum Zeitpunkt der Messplanung für ein Messprogramm waren aufgrund der Coronapandemie Arbeitsplatzmessungen in gesundheitsdienstlichen Einrichtungen nicht möglich. Um dennoch Expositionsdaten zu erhalten, wurden Flächendesinfektionsarbeiten unter realistischen Bedingungen in einer Prüfkabine des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) mit ausgewählten Desinfektionsmitteln durchgeführt. Aufgrund des einfachen Arbeitsablaufs und der gängigen Arbeitsmittel ließen sich Flächendesinfektionsarbeiten praxisnah und reproduzierbar nachstellen. Der Versuchsaufbau und die Rahmenbedingungen (geschlossener Raum, Größe der desinfizierten Fläche, eingesetztes Desinfektionsmittel) wurden so gewählt, dass sie z. B. einem Pflegezimmer in einem Krankenhaus entsprechen könnten.

2 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in einer Prüfkabine durchgeführt (Bild 1). Der containerähnliche Raum mit einem Raumvolumen von etwa 40 m³ ist mit zwei Türen und vier verschlossenen Fensterfronten versehen. Die Lüftung war natürlich und beschränkte sich auf die Undichtigkeiten des Raumes. Für die Desinfektions-



Bild 1 Prüfkabine mit einer Grundfläche von etwa 13 m² und einer Raumhöhe von 3 m (links); Raumskizze mit Versuchsanordnung (rechts).
Foto/Grafik: Autoren



arbeiten standen horizontal und vertikal angeordnete Flächen im Raum zur Verfügung. Expositionsmessungen konnten so bei Arbeiten durchgeführt werden, bei denen Flächen von 0,5 m², 2 m², 5 m², 10 m² sowie 15 m² desinfiziert wurden. Für Flächen bis 5 m² wurden kunststoffbeschichtete Tische verwendet. Ab 5 m² wurden zusätzlich die lackierten Metallwände desinfiziert.

2.1 Desinfektionsmittel

Für die Desinfektionsarbeiten wurden vier handelsübliche Desinfektionsmittel ausgewählt, die mindestens einen der expositionsrelevanten Inhaltsstoffe Ethanol, Glutaraldehyd, Formaldehyd, Peroxyessigsäure oder Wasserstoffperoxid enthielten. Die Wirkstoffe der Desinfektionsmittel repräsentierten laut Desinfektionsmitteldatenbank der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) ein praxisübliches Spektrum der Gefahrstoffe bei der Flächendesinfektion.

Die Produkte 1E und 4PW waren anwendungsfertige, mit dem Desinfektionsmittel getränkte Tücher. Bei den Produkten 2G und 3FG handelte es sich um Konzentrate, die nach Herstellerangaben zu jeweils 0,5%igen Gebrauchslösungen mit Wasser verdünnt werden mussten. Dazu wurde die Tuchrolle in den handelsüblichen Spendereimer mit Entnahmesystem gegeben, mit

der Gebrauchslösung übergossen und anschließend für mindestens 30 min stehen gelassen. Wie es auch in der betrieblichen Praxis üblich ist, wurde das erste Tuch verworfen. Die Konzentrationen der selbst hergestellten Gebrauchslösungen wurden im IFA Labor analytisch überprüft und stimmten mit den rechnerischen Werten überein. Die Konzentrationen für Wasserstoffperoxid und Peroxyessigsäure wurden im Labor der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) überprüft und ergaben Werte, die für Peroxyessigsäure von den Herstellerangaben abwichen (**Tabelle 1**).

In **Tabelle 2** werden für die expositionsrelevanten Gefahrstoffe Angaben zu Beurteilungsmaßstäben z. B. Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) und Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK) zur Einstufung nach der CLP-Verordnung [4], ergänzende Hinweise aus der TRGS 900 [5] sowie ergänzende Informationen der MAK- und BAT-Liste [6] aufgeführt.

3 Durchführung der nachgestellten Arbeiten und Messstrategie

Es wurde nach Vorgabe gründlich desinfiziert. Dazu wurden die Flächen in einem Arbeitsgang zunächst von rechts oben nach links unten und dann 90° versetzt von links vorne nach rechts

Tabelle 1 Eingesetzte Produkte und Konzentration der expositionsrelevanten Inhaltsstoffe.

Produkt	Gebrauchslösung	Relevanter Inhaltsstoff	Konzentration Inhaltsstoff in der Gebrauchslösung in g/100 g
Produkt 1 E	gebrauchsfertig	Ethanol	45
Produkt 2 G	0,5%ige wässrige Verdünnung	Glutaraldehyd	0,05*
Produkt 3 FG	0,5%ige wässrige Verdünnung	Glutaraldehyd	0,05*
		Formaldehyd	0,05*
Produkt 4 PW	gebrauchsfertig	Wasserstoffperoxid	4,7* (Herstellerangabe: < 8)
		Peroxyessigsäure	0,15* (Herstellerangabe: 0,06)
		Essigsäure	1,5

* Die Konzentrationen für Aldehyde, Wasserstoffperoxid und Peroxyessigsäure wurden laboranalytisch überprüft.

Tabelle 2 Expositionsrelevante Gefahrstoffe bei der Flächendesinfektion.

Gefahrstoff [CAS]	Einstufung nach CLP-Verordnung	Bemerkungen [4; 5]	Beurteilungsmaßstäbe Spitzenbegrenzung: Überschreitungsfaktor/Kategorie in mg/m ³ [4; 5; 6]
Ethanol [64-17-5]	  Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 2; H225 Augenreizung, Kategorie 2; H319	Y	380 mg/m ³ (AGW) 4 (II)
Formaldehyd [50-00-0]	   Akute Toxizität, Kategorie 3, Verschlucken; H301 Akute Toxizität, Kategorie 3, Einatmen; H331 Akute Toxizität, Kategorie 3, Hautkontakt; H311 Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1B; H314 Sensibilisierung der Haut, Kategorie 1; H317 Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335 Keimzellmutagenität, Kategorie 2; H341 Karzinogenität, Kategorie 1B; H350 Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 1; H370	Sh, Y, X K1B, M2	0,37 mg/m ³ (AGW) 2 (I)
Glutaraldehyd [111-30-8]	   Akute Toxizität, Kategorie 3, Verschlucken; H301 Akute Toxizität, Kategorie 2, Einatmen; H330 Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1B; H314 Sensibilisierung der Haut, Kategorie 1A; H317 Schwere Augenschädigung, Kategorie 1; H318 Sensibilisierung der Atemwege, Kategorie 1; H334 Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335 Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400 Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 2; H411	Sah, Y	0,2 mg/m ³ (AGW) 2 (I)
Peroxyessigsäure [79-21-0]	    Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 3; H226 Organische Peroxide, Typ D; H242 Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302 Akute Toxizität, Kategorie 4, Hautkontakt; H312 Akute Toxizität, Kategorie 4, Einatmen; H332 Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1A; H314 Schwere Augenschädigung, Kategorie 1; H318 Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335 Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400	–	0,32 mg/m ³ (MAK) I (1)
Wasserstoffperoxid [7722-84-1]	   Oxidierende Flüssigkeiten, Kategorie 2; H272 Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302 Akute Toxizität, Kategorie 4, Einatmen; H332 Schwere Augenschädigung, Kategorie 1; H318	Y	0,71 mg/m ³ (AGW) 1 (I)

Sh Sensibilisierend über die Haut

Sah Sensibilisierend über die Atemwege und die Haut

X krebserzeugender Stoff der Kat. 1A oder 1B oder krebserzeugende Tätigkeit oder Verfahren nach § 2 Absatz 3 Nr. 4 der Gefahrstoffverordnung – es ist zusätzlich § 10 GefStoffV zu beachten

Y Schwangerschaft: bei Einhaltung des AGW keine Gefahr für Mutter und Kind

K1B Stoffe, die wahrscheinlich beim Menschen karzinogen sind.

M2 Kann vermutlich genetische Defekte verursachen

hinten gewischt (**Bild 2**). Pro zu desinfizierendem Quadratmeter wurde jeweils ein Tuch verwendet, das vor und nach dem Gebrauch gewogen wurde, um die ausgebrachte Menge zu ermitteln. Das gebrauchte Tuch wurde in dem bereitgestellten Mülleimer entsorgt, ein neues Tuch entnommen, gewogen und der nächste Quadratmeter Fläche desinfiziert. Der Mülleimer hatte eine Einwurföffnung mit einem Durchmesser von etwa 5 cm, die mit einem Deckel verschlossen wurde, sodass die gebrauchten Tücher als Emissionsquelle ausgeschlossen werden konnten. Die Dauer

des Desinfektionsvorgangs wurde ermittelt, ebenso mittels Sichtkontrolle die Dauer bis zur Verdampfung des Desinfektionsmittels von den Oberflächen.

Die gesamte Exposition des Beschäftigten setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Expositionsanteil 1 beim Ausbringen der Desinfektionslösung nahe an der Emissionsquelle und Expositionsanteil 2, bestimmt durch die entstehende Raumbelastung nach dem Ausbringen des Desinfektionsmittels für die Dauer des Aufenthalts im Raum.



Bild 2 Nachgestellte Flächendesinfektion. Foto: Autoren

Um eine praxisgerechte Aussage zur Exposition zu ermöglichen, wurde deshalb im Rahmen der Messstrategie festgelegt, dass bei jedem Versuch mindestens 15 min beprobt werden, auch wenn die Desinfektionsarbeiten bei kleineren Flächen weniger als 15 min dauerten. In diesen Fällen wurde das personengetragene Probennahmesystem in der Raummitte an einem Dummy in 1,6 m Höhe angebracht und die Probenahme hier bis zum Erreichen der 15 min fortgeführt (**Bild 3**).

Zeitlich parallel zur personengetragenen Messung wurde eine stationäre Messung im Raum durchgeführt (Stationär 1). Eine weitere stationäre Messung lief vom Anfang der Desinfektionsarbeiten bis zur augenscheinlich vollständigen Abtrocknung der Flächen (Stationär 2). Bei größeren Flächen ab 10 m² ergab sich durch die Tätigkeitsdauer eine Probenahmedauer an der Person von mehr als 15 min.

Zur Gefahrstoffmessung wurden die unter Methoden aufgeführten Messverfahren des Messsystems Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (MGU) eingesetzt (siehe Abschnitt 4). Ergänzend zu den sammelnden Verfahren wurden Konzentrationsverläufe an der Person für Ethanol mit einem direktanzeigenden Messgerät aufgezeichnet.

Die Versuche wurden pro Fläche dreimal wiederholt. Zwischen den Versuchen wurde der Raum mit einem starken Ventilator (Entraucher) belüftet und die Luft aus dem Prüfraum nach draußen abgeführt. Die Gefahrstoffkonzentration wurde mit dem entsprechenden direktanzeigenden Messgerät und einer Probenahme kontrolliert. Der nächste Versuch startete erst, wenn sichergestellt war, dass keine Residuen mehr im Raum messbar waren.



Bild 3 Versuchsaufbau mit stationärer Probenahme hinten links und Dummy vorne rechts. Foto: Autoren

4 Methoden

4.1 Bestimmung des Luftwechsels mittels Abklingmethode

Nach dem Verfahren der Konzentrations-Abklingmethode wurde der Prüfraum mit dem Indikatorgas Schwefelhexafluorid (SF₆) geimpft und in regelmäßigen Abständen Luftproben genommen. Die Konzentration des Indikatorgases SF₆ wird gaschromatographisch bestimmt (ECD-Detektion). Aus dem Abfall der Indikatorgaskonzentration über die Zeit wird anschließend die Luftwechselzahl λ berechnet. Das Indikatorgasverfahren zur Bestimmung des Luftwechsels ist in DIN EN ISO 12569 [7] beschrieben.

Der für den Prüfraum messtechnisch ermittelte Luftwechsel lag zwischen 0,7 und 0,9 h⁻¹.

4.2 Analytik der Gefahrstoffe

4.2.1. Ethanol

Ethanol wurde nach dem Verfahren 7330 der IFA-Arbeitsmappe [8] bei einem Volumenstrom von 0,33 l/min auf einem Aktivkohleröhrchen (Typ B, Fa. Dräger) gesammelt. Die Aktivkohle wird mit 10 ml eines ternären Gemisches aus Dichlormethan, Schwefelkohlenstoff und Methanol (Volumenanteile 60 %, 35 %, 5 %) für 30 min extrahiert und über einen Spritzenvorsatzfilter (PTFE, Porengröße 0,45 µm) filtriert. Die quantitative Analyse erfolgt über einen internen Standard mittels Gaschromatographie und Flammenionisationsdetektion. Mit dem Messverfahren kann für Ethanol bei einem Probenahmenvolumen von 40 l eine Bestimmungsgrenze von 5 mg/m³ erreicht werden.

Tabelle 3 Prozessparameter und gemessene Konzentrationen für Produkt 1E mit Wirkstoff Ethanol.

Desinfizierte Fläche in m ²	Ausgebrachte Menge in g	ausgebrachte Menge/m ² in g/m ²	Dauer FD in min	Dauer FD/m ² in min/m ²	Dauer bis Abtrocknen in min	PND in min	Ethanolkonzentration in mg/m ³		
							Personengetragen	Stationär 1	Stationär 2
0,5	3,56	7,1	0,4	0,8	7,5	15	82	64	64
2	11,6	5,8	2,5	1,25	10	15	167	117	117
5	32,5	6,5	6,5	1,3	15	15	380	287	287

4.2.2. Formaldehyd und Glutaraldehyd

Die Messung von Formaldehyd und Glutaraldehyd erfolgte nach dem Verfahren 6045 der IFA-Arbeitsmappe [9]. Dabei werden die in der Luft vorliegenden Aldehyde über eine Kartusche mit einem mit 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) imprägnierten Trägermaterial (Sep-Pak XPoSure, Fa. Waters) geleitet. Je nach erwarteter Aldehydkonzentration im Arbeitsbereich und der Probenahmedauer können Volumenströme von 0,33 bis 1,33 l/min für die Probenahme genutzt werden. Auf dem Trägermaterial werden die Aldehyde als DNPH-Derivate gesammelt. Zur Analyse der Kartuschen werden die DNPH-Aldehyde mit Acetonitril von der Kartusche eluiert. Die Lösung wird mit Phosphorsäure angesäuert und kann nach einer Standzeit von 48 h analysiert werden. Hierzu wird ein flüssigchromatographisches Trennverfahren (HPLC) mit externer Kalibrierung und Detektion über einen Diodenarray-Detektor (DAD) genutzt. Bei einem Probenahmenvolumen von 40 l können mit diesem Verfahren Bestimmungsgrenzen von 0,010 mg/m³ für Formaldehyd sowie 0,020 mg/m³ für Glutaraldehyd erreicht werden.

4.2.3. Peroxyessigsäure und Wasserstoffperoxid

Zur Probenahme auf Wasserstoffperoxid und Peroxyessigsäure nach dem Verfahren 8310 der IFA-Arbeitsmappe [10] wurden die Analyten in einem mit Wasser gefüllten Impinger (Midget-Impinger, 25 ml, Fa. SKC) gesammelt. Die Probenahme erfolgt bei einem Volumenstrom von 1,38 l/min bei einer empfohlenen Probenahmedauer von 15 min bis 1 h. Da sowohl Wasserstoffperoxid als auch Peroxyessigsäure als wässrige Lösung nicht stabil sind, muss die Probenlösung direkt nach der Probenahme weiter aufgearbeitet werden. Dazu wird ein Teil der beprobten Absorptionslösung mit Methyl-p-tolylsulfid und einem Puffer versetzt und zur Reaktion für 10 min im Dunkeln gelagert. In einem zweiten Schritt wird Triphenylphosphin (TPP) zur Probe gegeben. Die absorbierte Peroxyessigsäure oxidiert dabei das Methyl-p-tolylsulfid zum entsprechenden Sulfoxid, während Wasserstoffperoxid mit Triphenylphosphin zum stabilen Triphenylphosphinoxid reagiert. Die Bestimmung von Peroxyessigsäure und Wasserstoffperoxid erfolgt über die Messung der entsprechenden Oxide mittels HPLC und DAD. Die quantitative Bestimmung erfolgt anhand von Kalibrierkurven mit externem Standard. Bei Messungen über 15 min (20,7 l Probenahmenvolumen) können Bestimmungsgrenzen von 0,048 mg/m³ für Peroxyessigsäure bzw. 0,032 mg/m³ für Wasserstoffperoxid erreicht werden.

5 Ergebnisse

Die in den Tabellen 5 bis 8 aufgeführten Werte stellen das jeweilige arithmetische Mittel der Prozessparameter und der ermittelten Gefahrstoffkonzentrationen aus drei Wiederholversuchen dar. Dargestellt sind die Größe der desinfizierten Fläche, die ausgebrachte Menge, die ausgebrachte Menge bezogen auf einen Quadratmeter, die Dauer der Flächendesinfektion (Dauer FD), die Dauer der Flächendesinfektion pro m², die Dauer, bis die Fläche abgetrocknet war, die Probenahmedauer (PND) sowie die Gefahrstoffkonzentrationen für die personengetragene Messung und die zwei stationären Messungen.

Die flächenspezifische Dauer zum Ausbringen der Desinfektionsmittel war für die jeweilige desinfizierte Fläche aufgrund der gleichmäßigen Arbeitsweise konstant und lag zwischen 0,8 min/m² bei 0,5 m² und 1,6 min/m² bei 15 m². Die längere flächenspezifische Dauer der Wischdesinfektion ergab sich durch die Rüstzeiten beim Wechsel der Tücher nach jeweils einem Quadratmeter desinfizierter Fläche. Rüstzeit bedeutet dabei die Entnahme des Tuchs aus der Spenderbox, das Wiegen vor und nach Gebrauch des Tuchs, sowie dessen Entsorgung.

5.1. Produkt 1E

Für Produkt 1E mit Ethanol als Wirkstoff erstrecken sich die personengetragenen gewonnenen Messwerte von 82 mg/m³ bei 0,5 m² bis 380 mg/m³ bei 5 m². Die stationären Messungen 1 und 2 lagen zwischen 64 mg/m³ und 287 mg/m³ und somit erwartungsgemäß etwas unterhalb der personengetragenen Messungen bei entsprechend gleicher desinfizierter Fläche (Tabelle 3).

5.2. Produkt 2G

Produkt 2G hatte lediglich Glutaraldehyd als Wirkstoff. Glutaraldehyd wurde bei einer desinfizierten Fläche von 5 m² personengetragen mit 0,043 mg/m³ nachgewiesen. Bis 5 m² lagen die Glutaraldehydkonzentrationen an allen anderen Messstellen unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze von 0,041 mg/m³. Bei 10 bzw. 15 m² desinfizierter Fläche lagen die Glutaraldehydkonzentrationen an der Person gemessen bei 0,055 bzw. 0,089 mg/m³, Stationär 1 bei 0,048 bzw. 0,079 mg/m³ und somit erwartungsgemäß etwas unterhalb der personengetragenen Messungen bei entsprechend gleicher desinfizierter Fläche. Stationär 2 lagen die Glutaraldehydkonzentrationen bei 10 bzw. 15 m² nach der Verdampfungsphase mit 0,10 bzw. 0,11 mg/m³ höher als die personengetragenen Messwerte (Tabelle 4).

Tabelle 4 Prozessparameter und gemessene Konzentrationen für Produkt 2G mit Wirkstoff Glutaraldehyd.

Desinfizierte Fläche in m ²	Ausgebrachte Menge in g	ausgebrachte Menge/m ² in g/m ²	Dauer FD in min	Dauer FD/m ² in min/m ²	Dauer bis Abtrocknen in min	PND Personengetragen/Stationär 1 in min	Glutaraldehydkonzentration in mg/m ³		PND Stationär 2 in min	Glutaraldehydkonzentration in mg/m ³
							Personengetragen	Stationär 1		
0,5	2,3	4,6	0,4	0,8	7	15	< 0,041	< 0,041	15	< 0,041
2	8,48	4,2	2,5	1,25	12	15	< 0,041	< 0,041	15	< 0,041
5	23,2	4,6	6,5	1,3	15	15	0,043	< 0,041	15	< 0,041
10	45,5	4,5	15	1,5	22	15	0,055	0,048	22	0,10
15	77,0	5,1	20	1,47	30	20	0,089	0,079	30	0,11

Tabelle 5 Prozessparameter und gemessene Konzentrationen für Produkt 3FG mit der Wirkstoffmischung aus Formaldehyd und Glutaraldehyd.

Desinfizierte Fläche in m ²	Ausgebrachte Menge in g	ausgebrachte Menge/m ² in g/m ²	Dauer FD in min	Dauer FD/m ² in min/m ²	Dauer bis Abtrocknen in min	PND in min	Formaldehydkonzentration in mg/m ³			Glutaraldehydkonzentration in mg/m ³		
							Personengetragen	Stationär 1	Stationär 2	Personengetragen	Stationär 1	Stationär 2
0,5	2,63	5,3	0,4	0,8	13	15	0,024	0,028	0,025	< 0,041	< 0,041	< 0,041
2	8,96	4,5	2,5	1,25	10	15	0,051	0,051	0,050	< 0,041	< 0,041	< 0,041
5	24,3	4,8	6,5	1,3	13	15	0,17	0,16	0,16	0,052	< 0,041	< 0,041

5.3. Produkt 3FG

Produkt 3FG enthielt eine Wirkstoffmischung aus Formaldehyd und Glutaraldehyd. Die Formaldehydkonzentrationen erstreckten sich von 0,024 mg/m³ bei 0,5 m² bis 0,17 mg/m³ bei 5 m². Glutaraldehyd war erst ab einer desinfizierten Fläche von 5 m² personengetragen mit 0,055 mg/m³ nachweisbar. Alle anderen Glutaraldehydkonzentrationen lagen an allen Messstellen unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze von 0,041 mg/m³ (**Tabelle 5**). Größere Flächen wurden nicht desinfiziert, da eine Grenzwertüberschreitung für Formaldehyd zu erwarten gewesen wäre.

5.4. Produkt 4PW

Produkt 4PW enthielt eine Wirkstoffmischung aus Peroxyessigsäure und Wasserstoffperoxid. Die Peroxyessigsäurekonzentrationen lagen bei 0,5 m² desinfizierter Fläche unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze von 0,05 mg/m³; bei 5 m² wurden personengetragen 0,21 mg/m³ ermittelt. Die Wasserstoffperoxidkonzentrationen erstreckten sich personengetragen von 0,39 mg/m³ bei 0,5 m² bis 2,48 mg/m³ bei 5 m². Die stationären Messungen 1 und 2 lagen bei 2 m² bzw. 5 m² erwartungsgemäß unterhalb der personengetragenen Messungen bei entsprechend gleicher desinfizierter Fläche und lagen für Peroxyessigsäure bei 0,06 bzw. 0,17 mg/m³. Für Wasserstoffperoxid erstreckten sich die stationär ermittelten Werte für die desinfizierten Flächen von 0,25 bis 1,78 mg/m³ (**Tabelle 6**). Größere Flächen wurden nicht desinfiziert, da bereits bei 2 m² an allen Messstellen eine Grenzwertüberschreitung für Wasserstoffperoxid erreicht war.

5.5. Direktazeigende Messungen

Als Ergänzung zu den sammelnden Verfahren wurde Ethanol mit einem Flammenionisationsdetektor (FID BA 3006, Fa. Bernath Atomic) direktazeigend gemessen und der Konzentrationsverlauf auf einem Datenlogger aufgezeichnet. Über eine PFTE-Leitung, die an dem personengetragenen Probenahmesystem befestigt wurde, wurde das zu messende Gas von einer integrierten Messgaspumpe in den FID geleitet und analysiert. **Bild 4** stellt exemplarisch für das ethanolhaltige Produkt 1E und eine desinfizierte Fläche von 5 m² den Konzentrationsverlauf an der Person gemessen dar. Im Konzentrationsverlauf wird ersichtlich, dass beim Ausbringen des Desinfektionsmittels mehrere kurze Ethanolkonzentrationsspitzen über 500 bis maximal 1 250 mg/m³ entstehen können. In der zweiten Hälfte des Versuchs, ab ca. Minute 7, wurde die Probenahmeeinrichtung am Dummy befestigt und kein Desinfektionsmittel mehr ausgebracht. Das aufgetragene Desinfektionsmittel verdampfte bis Minute 15 von den Oberflächen. In dieser Phase war die Konzentration bis zum Ende der 15-minütigen Probenahmedauer nahezu konstant. Anschließend wurde der Prüfraum belüftet, sodass die Konzentration schnell abfiel. Der direktazeigend ermittelte 15-Minuten-Mittelwert ist mit 384 mg/m³ beinahe identisch mit der ermittelten Konzentration des sammelnden Verfahrens.

Neben den Gefahrstoffmessungen wurden die Temperatur und die relative Luftfeuchte während der Desinfektionsarbeiten mit TSI Q-Trak 8550 kontinuierlich dokumentiert. Die Temperatur lag während der Versuche zwischen 19 und 22 °C und die relative Luftfeuchte zwischen 25 und 55 %.

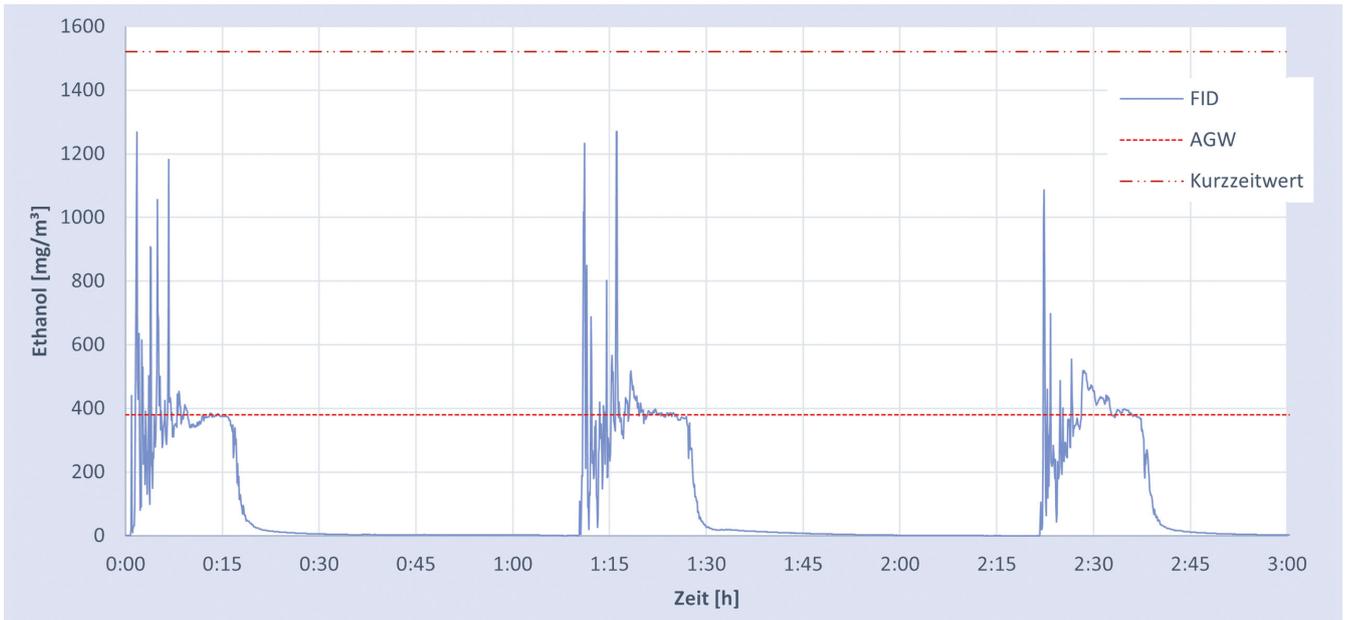


Bild 4 Zeitlicher Verlauf der Ethanol-Konzentration bei der Flächendesinfektion von 5 m² mit einem ethanolhaltigem Desinfektionsmittel – drei Wiederholungen. Grafik: Autoren

6 Rechnerische Abschätzungen bei verschiedenen Lüftungssituationen

Die inhalative Exposition wurde in einer Prüfkammer (Bild 1) mit einem Kammervolumen von 40 m³ und einem mittels Abklingmethode bestimmten Luftwechsel von $\lambda_K = 0,8 \text{ h}^{-1}$ bestimmt.

Die in der Kammer gemessenen Konzentrationen können unter Berücksichtigung der Umgebung (Prüfkammervolumen und Luftwechselrate) in eine Emissionsrate umgerechnet werden. Mit der Emissionsrate kann die inhalative Exposition rechnerisch für beispielsweise verschiedene Raumgrößen und/oder Räumen mit unterschiedlichen Luftwechseln abgeschätzt werden. Dies wird in dieser Veröffentlichung exemplarisch für einige typische Luftwechsel und typische Raumgrößen für Patientenzimmer vorgestellt. Die berechneten Werte sind lediglich als orientierend zu betrachten und geben einen Hinweis darauf, wie sich die Gefahrstoffkonzentration bei unterschiedlichen Lüftungssituationen oder Raumgrößen ändert.

Die Emissionsrate \dot{E} wurde unter der Annahme berechnet, dass sich die Gefahrstoffe gleichmäßig und instantan in der Kammer verteilen und unter Vernachlässigung anderer Effekte, wie beispielsweise Wandeffekte. \dot{E} ist das Produkt aus der Luftwech-

selrate λ_K , dem Kammervolumen $V_K = 40 \text{ m}^3$ und der gemessenen Konzentration c_K für Ethanol (siehe Tabelle 5):

$$\dot{E} = \lambda_K \cdot V_K \cdot c_K \text{ [mg/h]}$$

Die daraus berechnete Exposition steht ebenfalls unter der Annahme, dass sich die Gefahrstoffe gleichmäßig und instantan im Raum verteilen. Diese Annahme wird ungenauer je größer beispielsweise der zu betrachtende Raum ist oder je geringer die Luftbewegung ist, in dem die Arbeiten durchgeführt werden.

Für die Berechnung der Exposition im Patientenzimmer wurde vorausgesetzt, dass die Probenahmezeit der Expositionszeit entspricht. Das Raumvolumen V_{PZ} und der Luftwechsel λ_{PZ} müssen dann in folgende Gleichung eingesetzt werden, um die Konzentration c_{PZ} eines Stoffes berechnen zu können:

$$c_{PZ} = \frac{\dot{E}}{\lambda_{PZ} \cdot V_{PZ}}$$

Mit der gemessenen Luftwechselrate von $0,8 \text{ h}^{-1}$, dem Kammervolumen von 40 m^3 und der gemessenen Ethanolkonzentration bei der Wischdesinfektion (siehe Tabelle 6) von $0,5 \text{ m}^2$ kann die Emissionsrate \dot{E} berechnet werden. In **Tabelle 7** sind ver-

Tabelle 6 Prozessparameter und gemessene Konzentrationen für Produkt 4PW mit der Wirkstoffmischung Peroxyessigsäure und Wasserstoffperoxid.

Desinfizierte Fläche in m ²	Ausgebrachte Menge in g	ausgebrachte Menge/m ² in g/m ²	Dauer FD in min	Dauer FD/m ² in min/m ²	Dauer bis Abtrocknen in min	PND in min	Peroxyessigsäurekonzentration in mg/m ³			Wasserstoffperoxidkonzentration in mg/m ³		
							Personegetragen	Stationär 1	Stationär 2	Personegetragen	Stationär 1	Stationär 2
0,5	1,78	3,6	0,4	1,0	2	15	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,39	0,32	0,25
2	4,35	2,2	2,5	1,5	5	15	0,09	0,06	0,06	1,26	0,86	0,83
5	11,6	2,3	6,5	1,6	8	15	0,21	0,18	0,17	2,48	1,88	1,78

Tabelle 7 Berechnete Exposition für Wischdesinfektion bei einer Fläche von 0,5 m² am Beispiel von Ethanol.

Lüftungssituation	Luftwechsel λ_{PZ}	Konzentration c_{PZ} für 1-Bettzimmer mit 27 m ³ (V_{PZ}) in mg/m ³	Konzentration c_{PZ} für 2-Bettzimmer mit 43 m ³ (V_{PZ}) in mg/m ³	Konzentration c_{PZ} für 4-Bettzimmer mit 87 m ³ (V_{PZ}) in mg/m ³
Fenster und Türen geschlossen, neues Gebäude	0,1 h ⁻¹	972	610	302
Fenster und Tür geschlossen, altes Gebäude	0,5 h ⁻¹	194	122	60
Prüfkammer	0,8 h ⁻¹			
geöffnetes Fenster (Fensteröffnung 1 m ²)	3 h ⁻¹	32	20	10

schiedene Szenarien beispielhaft aufgeführt. Für Krankenzimmer in neuen Gebäuden oder auch in energetisch sanierten Gebäuden beträgt die Luftwechselrate etwa 0,1 h⁻¹, wenn Fenster und Türen geschlossen sind. Am Beispiel des Einbettzimmers mit geschlossenem Fenster und Tür im Vergleich mit geöffnetem Fenster mit einem Raumvolumen von mindestens 27 m³ verzehnfacht sich die Ethanolkonzentration im Raum, verglichen mit dem Raum bei geöffnetem Fenster.

7 Diskussion

Ziel der nachgestellten Flächendesinfektionen war es, eine Datenbasis für ein geplantes Messprogramm zu erarbeiten. Zusätzlich wurden die Daten zur Überprüfung verschiedener Berechnungsmodelle für Gefahrstoffkonzentrationen genutzt. Die Ergebnisse der Berechnungen mit den Modellen werden in einer weiteren Publikation veröffentlicht [11].

Nachgestellte Flächendesinfektionen haben sich als sehr gute Methode erwiesen, um reproduzierbare Messergebnisse zu erzeugen. Der gewählte Raum entsprach mit ca. 40 m³ eher ungünstigen Rahmenbedingungen, genauso wie die Lüftungsbedingungen (natürliche Lüftung, LW 0,8 h⁻¹). Die Auswahl an Desinfektionsmitteln bildete ein Spektrum praxisüblicher Wirkstoffe und deren Expositionspotenzial ab. Die Messstrategie der Untersuchungen war zwar nicht darauf ausgelegt, eine Arbeitsplatzbeurteilung durchzuführen, war aber orientiert an den Vorgaben der TRGS 402 für kurzzeitige Expositionen. Ihre Empfehlung für kurze Expositionsdauern eine Probenahmedauer von minimal 15 Minuten zu wählen, wurde bei den Untersuchungen umgesetzt. Beurteilungsmaßstäbe wie AGW und MAK sowie Kurzzeitwerte halfen, die ermittelten Ergebnisse einzuordnen.

Die Beurteilungsmaßstäbe wurden bei einer Flächendesinfektion von 0,5 m² für alle gemessenen Stoffe eingehalten. Für größere Flächen stellte sich die Situation differenzierter dar.

Für Produkt 1E auf Ethanolbasis zeigten die Messungen, dass ab einer desinfizierten Fläche von 5 m² der AGW für Ethanol erreicht wurde. Flächen über 5 m² werden bei der Schnelldesinfektion zwar üblicherweise nicht desinfiziert, es ist aber z. B. beim Patientenwechsel in einer Ambulanz üblich, dass kleinere Flächen immer wiederkehrend desinfiziert werden. Bei nicht ausreichender Lüftung ist eine erhöhte Exposition für Ethanol nicht ausgeschlossen.

Desinfektionsmittel mit aldehydischen Wirkstoffen sind in der klinischen Praxis rückläufig. Sie befinden sich aber noch auf dem Markt und bilden ein Produktsegment, das weiterhin beachtet werden muss. Die von diesen Stoffen ausgehenden besonderen Gefährdungen spielen bei der Expositionsbeurteilung und bei der Substitutionsprüfung eine herausragende Rolle. Aufgrund ihrer gefährlichen Eigenschaften stellen Glutaraldehyd (atemwegsensibilisierend) und Formaldehyd (krebserzeugend Kat. 1B, mutagen Kat. 2) Wirkstoffe mit hohen Gefährdungspotenzialen dar.

Die Glutaraldehydkonzentration lag an der Person gemessen in den nachgestellten Flächendesinfektionen ab 15 m² desinfizierter Fläche mit 0,089 mg/m³ bei ca. 45 % des AGW als Mittelwert über die Desinfektionsdauer von 20 min. Bei Glutaraldehyd war aufgefallen, dass bei größeren Flächen die Konzentrationen an der Messstelle Stationär 2 höher waren als an Stationär 1 oder an der Person. Dieser ungewöhnliche Effekt ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass nach dem Ausbringen des Desinfektionsmittels ein relevanter Anteil von den Flächen nachverdampft und die Konzentration im Raum erhöht. Dies hätte wiederum Konsequenzen für im Raum verbleibende Personen, z. B. Patienten. Betrachtet man nur die gemessenen Konzentrationen, würde das Produkt 2G, mit ausschließlich dem Wirkstoff Glutaraldehyd (Produkte 2G), von allen verwendeten Produkten die größte Flächendesinfektion ermöglichen. Allerdings steht dem die atemwegsensibilisierende Wirkung entgegen. Der AGW schützt nur gegen eine Reizwirkung durch diesen Stoff. Die sensibilisierende Wirkung wird dabei nicht berücksichtigt und muss unabhängig vom AGW beurteilt werden. Allgemein ist Konsens im Arbeitsschutz, dass eine solche Exposition weitestgehend vermieden werden muss (Minimierungsgebot und Substitutionsgebot, TRGS 406 [12]).

Formaldehyd erreicht bei Flächendesinfektionen bis 5 m² nach einer 15-minütigen Expositionsdauer bis zu 50 % des AGW. Flächendesinfektionen über 5 m² lassen unter den gewählten Bedingungen Expositionen erwarten, die immer näher zum Grenzwert führen. Die zulässige Flächengrenze für die Einhaltung des AGW dürfte für das gewählte Setting bei ca. 7 bis 8 m² liegen. Dann wäre der einfache Grenzwert als Mittelwert voraussichtlich erreicht und es würden die Kurzzeitwertkriterien greifen. Diese lassen eine erhöhte Exposition, also eine Exposition über dem AGW, nur bis zu 15 Minuten zu. Die Einhaltung der zulässigen Kurzzeitwerthöhe dürfte unter diesen Bedingungen nicht mehr gewährleistet sein. Kommt wie im untersuchten Produkt 3FG ein

weiterer Wirkstoff wie Glutaraldehyd hinzu, stellt sich die Problematik der Gemischbelastung. Dies zeigt sich ab ca. 5 m² mit einem zusätzlichen Anteil an Glutaraldehyd von 25 % des AGW. Auch hier gilt das für Glutaraldehyd bereits oben Gesagte bezüglich Minimierung und Substitution.

Peroxide stellen eine weitere Gruppe der Desinfektionsmittelwirkstoffe dar. Bei den nachgestellten Flächendesinfektionen wurde Produkt 4PW eingesetzt, das einen vergleichsweise hohen Anteil Wasserstoffperoxid (ca. 5 g/100 g) und einen wesentlich geringeren Anteil Peroxyessigsäure enthielt. Bei der kleinsten desinfizierten Fläche von 0,5 m² wurde für Produkt 4PW die MAK für Peroxyessigsäure sowie der AGW für Wasserstoffperoxid unterschritten. Ab einer desinfizierten Fläche von 2 m² wurden der AGW und der Kurzzeitwert für Wasserstoffperoxid überschritten und ca. 30 % der MAK für Peroxyessigsäure erreicht. Ab einer desinfizierten Fläche von 5 m² wurden zusätzlich ca. 70 % der MAK für Peroxyessigsäure erreicht. Der Vergleich zwischen den personengetragen und den stationären Messungen zeigen die gleichen Trends wie bei den Messungen bei Produkt 1E.

8 Zusammenfassung

Flächendesinfektionen sind inzwischen in allen Branchen übliche Tätigkeiten. Die ermittelten Konzentrationen bei den nachgestellten Flächendesinfektionen müssen im Kontext der Rahmenbedingungen gesehen werden. Dazu gehören die gewählten Desinfektionsmittel und deren Wirkstoffe und Wirkstoffkonzentrationen, die bei der Emission eine wesentliche Rolle spielen. Für die Höhe der Exposition sind das Arbeitsverfahren und die Raum- und die Lüftungsbedingungen wichtige Parameter. Alle nachgestellten Bedingungen waren praxisnah. Teilweise können sie aber auch als Worst-Case-Bedingungen für die Untersuchungen angenommen werden. Dazu gehören die Prüfkabine, die einen verhältnismäßig kleinen Raum mit geringem Luftwechsel repräsentiert, und das Produkt 4PW mit hohem Wasserstoffperoxidgehalt.

Bei Arbeiten mit einem üblichen alkoholischen Desinfektionsmittel mit dem Wirkstoff Ethanol war für kleine Flächen ab 5 m² der AGW erreicht.

Für die Wirkstoffgruppe der Peroxide wurde Produkt 4PW mit einer Wirkstoffmischung aus Wasserstoffperoxid und Peroxyessigsäure eingesetzt. Laut Hersteller ist dieses Produkt für besondere Desinfektionsaufgaben vorgesehen. Die ermittelten Konzentrationen zeigten, dass der hohe Wasserstoffperoxidgehalt bereits bei Flächen < 2 m² zu erhöhten Wasserstoffperoxidkonzentrationen führen kann.

Beurteilungsmaßstäbe für die Schicht, also AGW oder MAK, wurden bei den Untersuchungen für Ethanol und Wasserstoffperoxid schnell erreicht oder überschritten. Erhöhte Konzentrationen erfordern die Beachtung der Kurzzeitwertbedingungen. Da es sich bei den nachgestellten Flächendesinfektionen nicht um Arbeitsplatzmessungen im eigentlichen Sinne handelte, wurde auf eine detaillierte Expositionsbewertung verzichtet.

Die Expositionsermittlungen bei den nachgestellten Flächendesinfektionen haben eine gute Grundlage für die aktuell im Gesundheitsdienst geplanten Arbeitsplatzmessungen geschaffen und werden eine hilfreiche Ergänzung bei der Validierung der dabei gewonnenen Messdaten sein. Es hat sich zudem gezeigt, dass die Ergebnisse der Untersuchungen aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit eine Überprüfung von Berechnungsmodellen ermöglichen. ■

Danksagung

Wir danken der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) für die Durchführung der Probenahme und der Analytik für Peroxyessigsäure und Wasserstoffperoxid.

Literatur

- [1] Technische Regel für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). GMBI. (2010) Nr. 12, S. 231-253; zul. geänd. GMBI. (2016) Nr. 43, S. 843-846.
- [2] Technische Regel für Gefahrstoffe: Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen (TRGS 400). GMBI. (2017) Nr. 36, S. 638.
- [3] Empfehlungen Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger: Flächendesinfektion in Krankenhausstationen (EGU 1039) – BG/BIA-Empfehlungen zur Überwachung von Arbeitsbereichen Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), Berlin 2002.
- [4] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLP). Abl. (2008) Nr. L353.
- [5] Technische Regel für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). BAuB. (2006) Nr. 1, S. 41-55; zul. geänd. GMBI. (2022) Nr. 20-21, S. 469.
- [6] Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe: MAK- und BAT-Werte-Liste. Hrsg.: Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn 2022.
- [7] DIN EN ISO 12569: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen – Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden – Indikatorgasverfahren (4/2018). Berlin, Beuth 2018.
- [8] *Lichtenstein, N.*: Ethanol. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Lfg. 18/1997. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 1997 – Losebl.-Ausg.
- [9] *Assenmacher-Maiworm, H.; Hahn, J. U.*: Aldehyde. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Lfg. 43/2009. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2009 – Losebl.-Ausg.
- [10] *Kästner, T.; Müller, A.; Schuh, C.*: Peroxyessigsäure und Wasserstoffperoxid. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Lfg. 01/2022. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 1997 – Losebl.-Ausg.
- [11] *Anhäuser, L.; Arnone, M.; Piorr, B.; Wegscheider, W.; Gerding, J.*: Inhalation occupational exposure during surface disinfection – Exposure assessment based on exposure models compared with measurement data. Manuskript in Vorbereitung
- [12] Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe und Gefahrstoffe: Sensibilisierende Stoffe für die Atemwege (TRBA/TRGS 406). GMBI. (2008) Nr. 40/41, S. 845; ber. GMBI. (2009), S. 236. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS-TRBA-406.html>

Dipl.-Ing. Wolfgang Wegscheider,
Günter Naujoks,
Dr. rer. nat. Johannes Gerding
 Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW),
 Hamburg.

Dr. rer. nat. Renate Beisser,
Anastasia Martiny,
Dr. rer. nat. Daniel Köster,
Dipl.-Ing. (FH) Birgit Heinrich
 Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
 (IFA), Sankt Augustin.