

# Untersuchungen zur Staubbelastung beim Abfüllen fester Stoffe

R. Hebisch, J. Karmann, U. Prott, A. Woznica

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Abfüllung von Gefahrstoffen ist eine weit verbreitete Tätigkeit. Nach der Abfüllung von Lösemitteln [1] hat die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) die Abfüllung fester Stoffe in verschiedene Behälter – von der Pulverflasche über Säcke bis hin zu Big Bags – untersucht. Neben der Messung der alveolengängigen und der einatembaren Staubfraktion wurden die Staubwerte für alle abgefüllten Stoffe entsprechend der Norm DIN EN 15051-3 [2] bestimmt. Die Ermittlung der Staubwerte beider Staubfraktionen für die abgefüllten Stoffe ergab eine Korrelation für deren Umrechnung mittels einer Exponentialfunktion. Bei der Befüllung zeigten sich bei personengetragenen Messungen Zusammenhänge zwischen der Konzentration der einatembaren Staubfraktion und dem zugehörigen Staubwert des abgefüllten Feststoffes. Diese Feststellung weist darauf hin, dass der Staubwert für die einatembare Staubfraktion zur Kategorisierung des Freisetzungspotenzials im Rahmen des Einfachen Maßnahmenkonzeptes Gefahrstoffe (EMKG) [3] zur Ableitung geeigneter Schutzmaßnahmen anwendbar ist. Zudem zeigte sich, dass für die Umrechnung der gemessenen Luftkonzentrationen beider Staubfraktionen ineinander eine Potenzfunktion am besten geeignet ist. Diese Umrechnung eignet sich für stärker standardisierte Tätigkeiten deutlich besser als für Tätigkeiten, bei denen das individuelle Verhalten des Beschäftigten expositionsbestimmend ist.

## 1 Einleitung

In vielen Branchen und Betrieben werden feste oder flüssige Stoffe abgefüllt und danach zur Weiterverarbeitung in anderen Betrieben oder aber für private und gewerbliche Anwender bereitgestellt. Für solch häufige Tätigkeiten wie die Abfüllung hat die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) im Rahmen des Einfachen Maßnahmenkonzeptes Gefahrstoffe (EMKG) [3] generische Schutzleitfäden erstellt. Sie beinhalten entsprechende Schutzmaßnahmen und sollen so eine sichere Arbeitsweise in den Betrieben gewährleisten.

Für die Abfüllung organischer Flüssigkeiten [1] wurden bereits umfangreiche Untersuchungen erfolgreich bis zur Erstellung verfahrens- und stoffspezifischer Kriterien [4] durchgeführt. Nun erfolgten derartige Untersuchungen auch für die Abfüllung fester Stoffe. Aufgrund der Erfahrungen bei der Lösemittelabfüllung wurde von vornherein berücksichtigt, dass es nicht nur eine gute Arbeitsweise, sondern durchaus mehrere vergleichbar gute Arbeitsweisen geben kann. Dabei wurden auch die Aktivitäten der einzelnen Betriebe berücksichtigt, die kommerziell verfügbare Maschinen und Geräte dahingehend verbessern, dass die Belas-

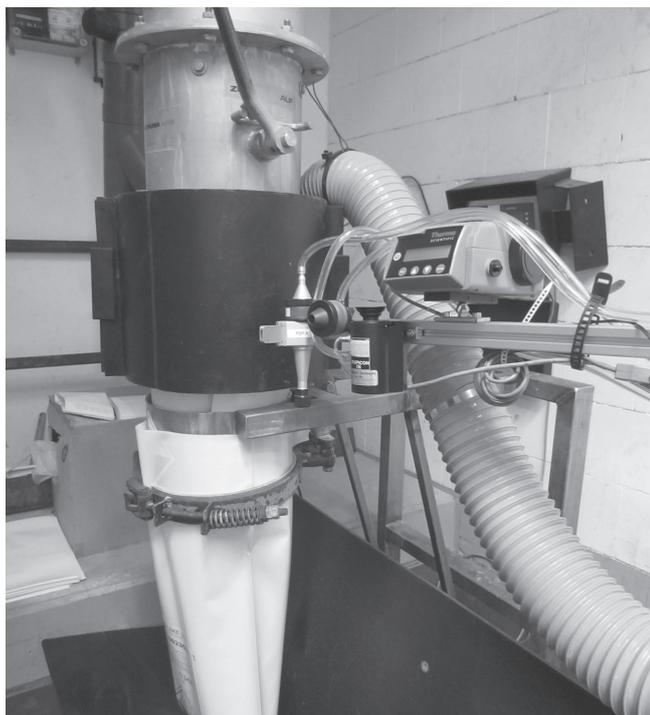
## Investigation of the concentration of airborne particles during filling of containers with bulk material

**ABSTRACT** Filling of containers with bulk material is a widespread activity in many enterprises and branches. Using the measurement strategy developed for filling of containers with organic liquids [1], the Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA) investigated filling of bulk material into containers of different shape and size – from powder flasks over sacks to big bags. Beneath measurement of airborne respirable and inhalable particle fraction the dustiness has been determined according to EN 15051, part 3 [2]. The estimated dustiness for both particle fractions shows a good correlation for their conversion using an exponential function. Personal air sampling of the inhalable particle fraction shows correlations between airborne particle concentration and dustiness both for manual filling and filling stations. This finding indicates that dustiness of the inhalable particle fraction is applicable for the categorisation of the exposure potential in the framework of the “Easy-to-use workplace control scheme for hazardous substances” (EMKG) [3]. Furthermore, for the conversion of inhalable to respirable particle fraction a power function is most suitable. It was found, that this kind of conversion is much better suited for more standardised activities compared to such activities, where workers’ individual behaviour is more determining their exposure.

tung der Beschäftigten gegenüber Gefahrstoffen weiter verringert wird.

Entsprechend dem EMKG werden zur Ableitung erforderlicher Schutzmaßnahmen die Gefährlichkeitsgruppe (stoffliche Eigenschaften, charakterisiert durch den Arbeitsplatzgrenzwert, AGW, oder die H/EUH-Sätze), die Freisetzungsguppe (Menge des Gefahrstoffes) und das Freisetzungspotenzial herangezogen [3]. Im Gegensatz zu organischen Flüssigkeiten, wo letzteres gut mittels Siedepunkt bzw. Dampfdruck gruppiert und beschrieben werden kann, erfolgt dies bei Feststoffen bisher durch eine beschreibende Charakterisierung, indem bekannte Stoffe wie Wachs, Zucker, Mehl oder Toner als Zuordnungskriterien verwendet werden. Hier wäre eine messtechnisch ermittelbare Größe wie das Staubungsverhalten zur Einordnung in eine Freisetzungsguppe hilfreich. Neben den Messungen der Luftkonzentrationen für alle abgefüllten Stoffe wurden daher auch immer die Staubwerte für die einatembare und die alveolengängige Staubfraktion entsprechend normativer Vorgaben [2] zur Bewertung des Staubungsverhaltens ermittelt.

Die durchgeführten Untersuchungen dienen dem Ziel, einerseits eine sichere Arbeitsweise bei der Abfüllung fester Stoffe zu beschreiben und andererseits die Kriterien für die Festlegung die-



**Bild 1.** Abfüllung fester Stoffe in Säcke an einer Abfüllstation.  
Quelle: Autoren

ser sicheren Arbeitsweise anhand valider Messdaten zu ermitteln. Weiterhin sollte geprüft werden, ob Korrelationen oder gar Umrechnungsmöglichkeiten zwischen den ermittelten Konzentrationen der alveolengängigen und einatembaren Staubfraktion sowie den entsprechenden Staubwerten bestehen.

## 2 Durchführung der Messungen beim Abfüllen fester Stoffe

Die Messungen bei der Abfüllung fester Stoffe in Gebinde unterschiedlicher Form und Größe erfolgten in zehn Betrieben. Dabei handelte es sich sowohl um Betriebe, die die abgefüllten Stoffe oder Mischungen selbst herstellten, als auch um Betriebe, die im Chemikalienhandel tätig waren. In allen Betrieben erfolgte die Abfüllung der festen Stoffe entweder manuell unter Verwendung einer Handschaufel oder an einer stationären Anlage (nachfolgend als Abfüllstation bezeichnet). Einige Betriebe füllten auch organische Flüssigkeiten sowie Säuren und Laugen ab. Dies erfolgte stets in räumlich abgetrennten Bereichen.

Bei den Messungen wurde vergleichbar vorgegangen wie bei den Untersuchungen zur Abfüllung von organischen Flüssigkeiten [1]. Ein Messpunkt lag ortsfest direkt an der Abfüllstelle (MP 1), also im Regelfall neben der Absaugöffnung (**Bild 1**). Auf diese Weise sollte die Wirksamkeit der Absaugung beurteilt werden. Eine weitere ortsfeste Messung erfolgte im Arbeitsbereich (MP 3) etwa zwei bis drei Meter von der Abfüllung entfernt, um beurteilen zu können, ob sich freigesetzter Staub weiträumiger verteilt. Eine personengetragene Messung (MP 2) erfolgte an dem Beschäftigten, der entweder die manuelle Abfüllung mit einer Handschaufel durchführte (**Bild 2**) oder aber die Abfüllvorrichtung bediente. Bei allen Messungen wurden jeweils parallel die alveolengängige und einatembare Staubfraktion erfasst, sodass üblicherweise sechs tätigkeitsbezogene Messwerte resultierten.



**Bild 2.** Manuelle Abfüllung fester Stoffe mittels Handschaufel.  
Quelle: Autoren

Ergänzend wurden die Messungen mit dem PIMEX-System (Fa. KOHS, Wien, Österreich) begleitet. Dabei wurde das Signal eines direkt anzeigenden Aerosolmessgerätes pDR-1500 (Fa. Thermo Fisher Scientific, Franklin, USA) mit einem Videobild gekoppelt, so dass die relative Staubexposition für die Abfülltätigkeit nachvollziehbar visualisiert wurde. Dies diente dem Ziel, die Arbeitsweise und den Expositionsverlauf während der Messungen zu dokumentieren. Auf der Grundlage dieser orientierenden Videoaufzeichnungen sollten dann für den Vergleich wirksamer und weniger wirksamer Schutzmaßnahmen Videoclips erstellt werden, in denen die durchgeführte Tätigkeit mit den jeweiligen Schutzmaßnahmen und der zugehörigen Exposition dargestellt ist.

Alle Messungen erfolgten tätigkeitsbezogen, wobei messtechnisch bedingt eine Abfülldauer von mindestens einer Stunde für die Messung angestrebt wurde. Dies konnte auch in den meisten Fällen sichergestellt werden, so dass die Bestimmungsgrenze bei allen Messungen unterhalb des Allgemeinen Staubgrenzwerts (ASGW) lag. Bei etwa zwei Drittel aller Messungen wurde sogar für mindestens zwei Stunden abgefüllt. Bei einer zweistündigen Probenahme mit den Sammelpumpen SG 10 (Fa. DEHA Haan & Wittmer, Heimsheim) und den zugehörigen Sammelköpfen FSP 10 und GSP 10 betrug die Bestimmungsgrenze für die alveolengängige bzw. einatembare Staubfraktion jeweils  $0,27 \text{ mg/m}^3$ . Lag die ermittelten Staubkonzentrationen unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze, so wurde diese für die weiteren Auswertungen herangezogen.

Inhaltsstoffe in den beiden gemessenen Staubfraktionen wurden nicht bestimmt. Ziel war es, die Wirksamkeit der Maßnahmen allgemein bezüglich der Staubfreisetzung zu beurteilen. Es wurden deshalb nur Abfüllvorgänge berücksichtigt, bei denen der Arbeitsplatz mit Erfassungstechnik, z.B. Absaughaube, Absaug-

**Tabelle 1.** Kategorisierung von Staubwerten in mg/kg für abgefüllte Stoffe.

Staubwert $W_R$ nach DIN EN 15051-3	Staubwert $W_I$ nach DIN EN 15051-3	Freisetzungsguppe EMKG	Beispiele
staubarm (< 20)	staubarm (< 1 000)	niedrig	Zitronensäure, Kaliumchlorid, Bernsteinsäureanhydrid, Natriumborhydrid
gering staubend (20 bis 70)	gering staubend (1 000 bis 4 000)		
staubend (> 70 bis 300)	staubend (> 4 000 bis 15 000)	mittel	Calciumhydroxid
stark staubend (> 300)	stark staubend (> 15 000)	hoch	Kupfer(III)-chlorid (wasserfrei), Natriumacetat

schlauch oder eine in die Abfüllvorrichtung integrierte Absaugung, ausgerüstet war.

### 3 Ermittlung des Staubungsverhaltens der abgefüllten Stoffe

Von allen abgefüllten Stoffen wurde das Staubungsverhalten untersucht. Dazu wurde in allen Betrieben eine Materialprobe von der Charge des Stoffes genommen, die während der Luftmessungen abgefüllt wurde.

Die Ermittlung der Staubwerte für die alveolengängige und die einatembare Staubfraktion erfolgte nach der Norm DIN EN 15051-3 [2]. Ihren Vorgaben entsprechend soll immer das Verfahren zur Ermittlung des Staubungsverhaltens ausgewählt werden, das die zu untersuchende Tätigkeit am besten abbildet. Für diese Untersuchungen wurde daher das Verfahren des kontinuierlichen Falls im Gegenstrom angewandt, da es eher einem Abfüllvorgang entspricht als die alternative Vorgehensweise unter Verwendung der rotierenden Trommel.

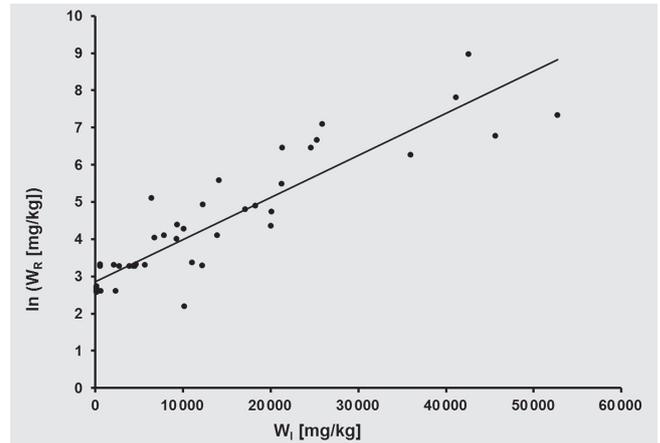
Die Ermittlung der Staubwerte hat das Institut für Gefahrstoff-Forschung der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (IGF) durchgeführt. Von allen untersuchten Stoffen wurden die Schüttdichte und die Gutfeuchte ermittelt. Als relevante Messwerte für die weiteren Betrachtungen resultierten die Staubwerte für die alveolengängige und die einatembare Staubfraktion  $W_R$  bzw.  $W_I$ . Diese werden in der Dimension mg/kg angegeben und stellen somit die Menge der freigesetzten Staubfraktion im Verhältnis zur Menge des verwendeten – in diesem Fall des abgefüllten – Stoffes dar.

Die ermittelten Staubwerte werden gemäß DIN EN 15051-3 [2] in vier Kategorien eingeteilt: staubarm, gering staubend, staubend und stark staubend. Da das EMKG nur drei Freisetzungsguppen für Feststoffe verwendet [3], wurden pragmatisch die beiden Gruppen staubarm und gering staubend zu der dem EMKG entsprechenden Gruppe mit niedrigem Freisetzungspotential zusammengefasst (Tabelle 1). In der niedrigen Freisetzungsguppe ist der dadurch abgedeckte Bereich der Staubwerte immer noch kleiner als derjenige der beiden anderen Freisetzungsguppen mit mittlerer und hoher Freisetzung, die den Staubwerten in den Kategorien staubend und stark staubend entsprechen.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Ermittlung der Staubwerte

Für 56 Stoffe, die bei den durchgeführten Messungen abgefüllt wurden, erfolgte die Bestimmung der Staubwerte  $W_R$  und  $W_I$ . Fast die Hälfte dieser Stoffe wurde anhand der ermittelten Staubwerte  $W_R$  und  $W_I$  verschiedenen Kategorien für die beiden Partikelfractionen entsprechend DIN EN 15051-3 [2] zugeordnet. Bis auf einen Stoff erfolgte diese Zuordnung dann jedoch nur in die jeweils unmittelbar angrenzende höhere oder tiefere Kategorie.



**Bild 3.** Graphische Darstellung der Staubwerte  $\ln(W_R)$  vs.  $W_I$ .  
Quelle: Autoren

Wurden die Staubwerte pragmatisch den drei Freisetzungsguppen nach EMKG zugeordnet, lag noch etwa ein Drittel der Stoffe in unterschiedlichen Freisetzungsguppen für die beiden Staubfraktionen. Bei unterschiedlichen Freisetzungsguppen beider Staubfraktionen resultierten dann durchweg die Kombinationen niedrig/mittel und mittel/hoch. Bei allen anderen Stoffen stimmten die Freisetzungsguppen für beide Staubfraktionen überein.

In Tabelle 1 sind beispielhaft einige Stoffe mit den Kategorien der Staubwerte nach DIN EN 15051-3 [2] und der zugehörigen Freisetzungsguppe nach EMKG aufgeführt. Stoffe mit einer unterschiedlichen Freisetzungsguppe für die beiden Staubfraktionen waren bei den durchgeführten Untersuchungen ausschließlich Gemische, die unter einem Handelsnamen angeboten wurden und daher hier nicht explizit genannt werden können.

Für die Untersuchungen auf mögliche Korrelationen zwischen den Staubwerten wurden drei sehr stark staubende Stoffe nicht berücksichtigt, da deren Staubwerte für beide Fraktionen oberhalb des Messbereichs des Verfahrens lagen. Für Stoffe mit Staubwerten unterhalb der Bestimmungsgrenze des normativen Ermittlungsverfahrens wurde deren Wert für die weiteren Betrachtungen verwendet. In allen Fällen lagen die Bestimmungsgrenzen für die Staubwerte der alveolengängigen und einatembaren Staubfraktion deutlich unterhalb der oberen Grenze von 70 mg/kg bzw. 4 000 mg/kg für die Freisetzungsguppe „niedrig“.

Bei der Prüfung auf mögliche Korrelationen zwischen den beiden Staubwerten ergab sich nur ein geringer linearer Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß [5] von  $R^2 = 0,26$ . Die Verwendung der Staubwerte bei doppelt logarithmischer Betrachtung zeigte eine deutliche Verbesserung mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,61$ . Wie in Bild 3 dargestellt, ergab jedoch die Exponentialfunktion

$$W_R = 17,5 * e^{0,00011 * W_I} \quad (1)$$

mit  $R^2 = 0,84$  das höchste Bestimmtheitsmaß. Diese Beziehung erwies sich als robust und zeigte nur eine geringe Veränderung, selbst wenn alle Datenpaare entfernt wurden, bei denen mindestens einer der Staubwerte unter der Bestimmungsgrenze lag.

Zur Klärung der Güte dieses Zusammenhangs und möglicher Schlussfolgerungen hinsichtlich der Beurteilung von Staubwerten sind weitergehende Untersuchungen erforderlich, da eine ermittelte Korrelation noch keine Kausalität bedeutet. Gegenwärtig sind Vorhersagen bezüglich des Freisetzungspotenzials für die alveolengängige Staubfraktion aus dem Staubungsverhalten der einatembaren Staubfraktion und umgekehrt nicht möglich. Für beide Staubfraktionen ergaben sich keine Korrelationen der ermittelten Staubwerte mit den jeweils gemessenen Schüttdichten und Gutfeuchten.

## 4.2 Tätigkeitsbezogene Staubmessungen

Bei der Abfüllung fester Stoffe wurden insgesamt 57 Messserien in zehn Betrieben durchgeführt. Bei vier Messserien konnten die personengetragenen Messungen (MP 2) nicht berücksichtigt werden, da entweder die Probenahmepumpe ausfiel oder eine vollautomatische Abfüllstation betrieben wurde, an der kein Beschäftigter dauerhaft tätig war, sodass hier 53 Messwerte in die Auswertung einfließen. Von den Messungen im Arbeitsbereich (MP 3) konnte eine Messung wegen einer ausgefallenen Probenahmepumpe nicht in die Auswertung einbezogen werden, was 56 auswertbare Messungen bedeutete.

Die Durchführung der Abfülltätigkeit unterschied sich deutlich, je nachdem, ob diese von Hand mit einer kleinen Schaufel oder an einer Abfüllstation im freien Fall in den darunter befindlichen Behälter erfolgte. Dies zeigte sich sehr ausgeprägt bei einer Betrachtung möglicher Korrelationen zwischen den jeweiligen Staubkonzentrationen derselben Fraktion, die an den drei vorgegebenen Messpunkten ermittelt wurden. Bei der Diskussion der Ergebnisse wurden nur Bestimmtheitsmaße  $R^2 > 0,5$  für die am deutlichsten ausgeprägten Korrelationen betrachtet. Die stärksten Korrelationen ergaben sich dabei nahezu durchweg nach logarithmischer Transformation der Messwerte. Die Bestimmtheitsmaße für die Korrelationen an den Abfüllstationen lagen bis zu einem Faktor fünf höher als die bei manueller Abfüllung. Die Ergebnisse der Arbeitsplatzmessungen wurden daher bei den folgenden Betrachtungen getrennt nach diesen beiden Tätigkeitsgruppen ausgewertet. Diese Tätigkeiten führten somit entsprechend DIN EN 689 [6] zu zwei Gruppen mit ähnlicher Exposition, sogenannten SEGs (Similar Exposure Groups).

Insgesamt zeigten die Messwerte für die einatembare Staubfraktion eine stärkere Korrelation zwischen den drei Messpunkten als diejenigen für die alveolengängige Staubfraktion. Bezüglich der alveolengängigen Staubfraktion lag das ermittelte Bestimmtheitsmaß nur bei manueller Abfüllung für eine Korrelation zwischen den Messpunkten MP1 und MP2 mit  $R^2 = 0,75$  oberhalb des aufgeführten Beurteilungskriteriums ( $R^2 > 0,5$ ). Die Messwerte der einatembaren Staubfraktion zeigten für diese beiden Messpunkte ein vergleichbares Ergebnis mit  $R^2 = 0,59$ . Dies weist darauf hin, dass sich die bei manueller Abfüllung nicht durch die Absaugung erfasste alveolengängige bzw. einatembare Staubfraktion unmittelbar im personengetragenen Messwert manifestiert. Die jeweilige Korrelation der beiden Messpunkte MP1 und MP2 mit MP3 war bei manueller Abfüllung durchweg ge-

ring, was darauf hinweist, dass die Aussagekraft ortsfester Messungen bei derartigen Abfülltätigkeiten nur begrenzt ist.

Für die Abfüllstationen ergab sich für die einatembare Staubfraktion durchweg  $R^2 > 0,5$  für die Korrelation zwischen den drei Messpunkten. Für die alveolengängige Staubfraktion war das ermittelte Bestimmtheitsmaß stets deutlich geringer. Man kann daher davon ausgehen, dass die kleineren Partikel der alveolengängigen Staubfraktion durch die Absaugung an den Abfüllstationen besser erfasst werden. Da das Bestimmtheitsmaß für die Korrelation von MP3 mit den beiden anderen Messpunkten nur für die einatembare Staubfraktion oberhalb 0,5 lag, weist dies darauf hin, dass auch ortsfeste Messungen dieser Staubfraktion eine Aussage zur Exposition ermöglichen, insbesondere von solchen Beschäftigten, die sich aufgrund anderer Tätigkeiten in der Nähe der Abfüllstation aufhalten. Der ortsfesten Messung der alveolengängigen Staubfraktion wird auch in diesem Fall nur eine geringe Aussagekraft bezüglich der Expositionsbeurteilung der an der Abfüllstation tätigen Beschäftigten zugesprochen.

### 4.2.1 Manuelle Abfüllung mit einer Handschaufel

In vier Betrieben wurden feste Stoffe von den Beschäftigten mit einer Handschaufel abgefüllt. Dabei erfolgten 13 Messserien. Zur Abfüllung wurde aus einem Vorratsgefäß mit einer Handschaufel eine bestimmte Menge des Stoffes entnommen und in den auf einer Waage abgestellten Behälter (überwiegend Pulverflaschen) eingefüllt. Dies wurde so oft wiederholt, bis die jeweils vorgegebene Menge erreicht war. Die Füllmenge je Behälter betrug dabei zwischen 250 g und 5 kg. In einem Fall wurden 25 kg von Hand in einen mit Polyethylenfolie ausgekleideten Karton umgefüllt. Die Anzahl der jeweils gleichartigen Behälter lag zwischen 24 und 150. Die Dauer dieser Tätigkeit betrug bis zu drei Stunden. Eine zusammenfassende Übersicht der Messwerte findet sich in **Tabelle 2**.

Die manuelle Abfüllung erfolgte in einem Betrieb in einem begehbaren Abzug, ansonsten auf einem Tisch in einem geschlossenen Raum. In allen Fällen war über oder neben dem zu befüllenden Behälter eine Absaugung angebracht. Ein Betrieb hatte zusätzlich eine weitere Absaugung in der Nähe des Vorratsbehälters installiert. Die Übertragungsstrecke für den abgefüllten Stoff – also der Abstand zwischen dem Vorratsbehälter und dem zu befüllenden Gebinde – lag üblicherweise bei etwa einem halben Meter und war nie mit einer zusätzlichen Absaugung ausgestattet.

Die Konzentration der alveolengängigen Staubfraktion lag bei allen Abfülltätigkeiten an der Absaugvorrichtung (MP 1) und im Arbeitsbereich (MP 3) unterhalb des AGW [7] in Höhe von  $1,25 \text{ mg/m}^3$ . Der höchste Messwert betrug  $0,77 \text{ mg/m}^3$ . Für die alveolengängige Staubfraktion kann man davon ausgehen, dass an der Abfüllstelle ausreichend abgesaugt wurde und auch eine Ausbreitung in den Arbeitsbereich hinein nur in geringem Maße erfolgte.

Demgegenüber stehen jedoch vier Messwerte bis zu  $4,37 \text{ mg/m}^3$  aus drei Betrieben oberhalb des AGW bei der personengetragenen Messung der alveolengängigen Staubfraktion. Die Staubwerte der dabei abgefüllten Stoffe lagen im Bereich von rund  $250 \text{ mg/kg}$  bis fast  $8000 \text{ mg/kg}$ . Es handelte sich also durchweg um staubende (im oberen Bereich der entsprechenden Kategorie) und stark staubende Stoffe gemäß Tabelle 1. Wie auch teilweise visuell wahrnehmbar, kann als Ursache dieser hohen Messwerte die offene Übertragung des Füllgutes vom Vorratsbe-

**Tabelle 2.** Tätigkeitsbezogene Messwerte bei der manuellen Abfüllung fester Stoffe.

Messpunkt	Anzahl der Messungen	Minimum in mg/m <sup>3</sup>	Maximum in mg/m <sup>3</sup>	Median in mg/m <sup>3</sup>	95.-Perzentil in mg/m <sup>3</sup>
alveolengängige Staubfraktion					
MP 1	13	< 0,11	0,77	–	–
MP 2	13	< 0,11	4,37	–	3,90
MP 3	12	< 0,06	0,51	–	–
einatembare Staubfraktion					
MP 1	13	< 0,17	22,6	0,89	17,8
MP 2	12	0,19	69,5	1,01	41,8
MP 3	13	< 0,03	3,49	0,21	3,09

<: Messwert kleiner Bestimmungsgrenze

–: keine Auswertung bezüglich Median und 95.-Perzentil, da der Anteil der Messwerte unter der Bestimmungsgrenze größer 50 % bzw. 90 % war

**Tabelle 3.** Tätigkeitsbezogene Messwerte bei der Abfüllung fester Stoffe an Abfüllstationen.

Messpunkt	Anzahl der Messungen	Minimum in mg/m <sup>3</sup>	Maximum in mg/m <sup>3</sup>	Median in mg/m <sup>3</sup>	95.-Perzentil in mg/m <sup>3</sup>
alveolengängige Staubfraktion					
MP 1	44	< 0,08	6,45	0,29	1,39
MP 2	41	< 0,06	1,00	–	0,99
MP 3	44	< 0,02	0,75	0,12	0,56
einatembare Staubfraktion					
MP 1	44	0,17	118	1,43	22,0
MP 2	41	0,13	36,8	0,82	13,6
MP 3	44	0,04	13,6	0,31	3,17

<: Messwert kleiner Bestimmungsgrenze

–: keine Auswertung bezüglich Median, da der Anteil der Messwerte unter der Bestimmungsgrenze größer 50 % war

hälter zu dem zu befüllenden Gebinde angesehen werden. Hierbei rieselte das Füllgut über die oben aufgeführte Strecke von etwa einem halben Meter von der Handschaufel.

Für die einatembare Staubfraktion wurden an den Messpunkten MP 1 und MP 2 je dreimal Konzentrationen oberhalb des AGW in Höhe von 10 mg/m<sup>3</sup> [7] gemessen. Die zugehörigen Staubwerte bei diesen hohen Messwerten für die einatembare Staubfraktion lagen im Bereich von 14 000 mg/kg bis etwa 67 000 mg/kg. Wie schon für die alveolengängige Staubfraktion festgestellt, lagen auch hier die Staubwerte in einem Fall im oberen Bereich der Kategorie „staubend“ und ansonsten durchweg in der Kategorie „stark staubend“ entsprechend Tabelle 1. Etwa zwei bis drei Meter von der Abfüllung entfernt wurden im Arbeitsbereich (MP 3) durchweg Messwerte deutlich unterhalb des AGW erhalten.

Für feste Stoffe mit einem hohen Freisetzungspotenzial – mit hohen Staubwerten  $W_R$  und  $W_I$ , die der Kategorie „stark staubend“ zugeordnet werden – empfiehlt es sich daher, die Übertragungsstrecke zwischen den Behältern bei der manuellen Abfüllung mit einer Handschaufel so kurz wie möglich zu halten und mit einer entsprechenden Absaugung zu versehen. Diese Maßnahme ist bereits dann sinnvoll, wenn auch nur einer dieser beiden Staubwerte der Kategorie mit dem höchsten Freisetzungspotenzial zugeordnet wird.

Als geeignete emissionsmindernde Maßnahmen erwiesen sich bei den manuellen Abfülltätigkeiten insbesondere:

- die Verwendung eines Trichters mit einer Aussparung, durch dessen Einsatz die Fallhöhe verringert und der freigesetzte Staub besser in Richtung der Absaugung kanalisiert wurde,
- die korrekte Positionierung der Absaugung unter Nutzung des vollständigen Absaugquerschnitts direkt neben oder über dem zu befüllenden Gebinde.

Dies konnte durch Vergleichsuntersuchungen an jeweils derselben Anlage bei Abfüllung desselben Stoffes durch denselben Beschäftigten belegt werden. Dazu wurden bei diesen Tätigkeiten Videoclips aufgenommen, die mit einem gleichzeitig registrierten Messsignal für die freigesetzten Partikel unterlegt sind.

#### 4.2.2 Stationäre Abfüllung an Abfüllstationen

Die Abfüllung fester Stoffe erfolgte in den beteiligten Betrieben überwiegend stationär an Abfüllstationen, bei denen die Beschäftigten die Abfüllung durch Knopfdruck oder einen Bedienelement starteten. An derartigen Abfüllstationen wurden 44 Messserien in acht Betrieben durchgeführt (Tabelle 3). Die Abfüllung erfolgte hauptsächlich in Säcke (Papier oder Kunststoff) und Big Bags, aber auch in geringerem Umfang in Eimer, Kanister, Flaschen und Kartons. Die abgefüllte Menge je Behälter betrug 25 g bis 1,5 t. Die Befüllung der verschiedenen Behälter erfolgte durch freien Fall, mittels eines Schneckenförderers oder durch vollautomatische Dosierung voreingestellter Füllmengen. Wurde die Befüllmenge vorab nicht fest eingestellt, so wurde der Befüllvorgang mittels Wägung kontrolliert.

Für die alveolengängige Staubfraktion wurden bei drei Messserien Konzentrationen oberhalb 1,25 mg/m<sup>3</sup> direkt neben der Absaugvorrichtung (MP 1) ermittelt. In einem Fall kam als zusätzliche Maßnahme eine vorgeschobene Sichtscheibe zum Einsatz, so dass der nicht durch die Absaugung erfasste Staub nicht in den Arbeitsbereich gelangen konnte. In den beiden anderen Fällen handelte es sich einerseits um eine technisch veraltete Anlage, die ersetzt werden sollte, sowie um eine Anlage mit vielen Undichtigkeiten, die überprüft und instandgesetzt werden sollte. Hinzu kam, dass bei diesen hohen Messwerten Stoffe der Kategorie „staubend“ und „stark staubend“ abgefüllt wurden, also Stoffe

mit einem mittleren bzw. hohen Freisetzungspotenzial. Bei den personengetragenen Messungen (MP 2) und den ortsfesten Messungen in der Nähe der Abfüllstationen (MP 3) wurden keine Konzentrationen oberhalb des AGW von  $1,25 \text{ mg/m}^3$  gemessen.

Im Gegensatz dazu lagen für die einatembare Staubfraktion deutlich mehr Messwerte oberhalb des AGW von  $10 \text{ mg/m}^3$ . Ortsfest direkt neben der Absaugvorrichtung (MP 1) war dies sechsmal der Fall, d. h. bei rund 15 % der Messungen. In zwei dieser Fälle handelte es sich um die bereits oben erwähnten Anlagen, die ersetzt oder instandgesetzt werden sollten, bei denen auch der AGW für die alveolengängige Staubfraktion überschritten wurde. Bei den anderen Messwerten oberhalb des Grenzwerts handelte es sich um staubende oder stark staubende Stoffe, die durch eine nicht ausreichende Absaugung nicht wirksam erfasst wurden.

Bei den personengetragenen Messungen (MP 2) traten vier Messwerte oberhalb des Grenzwerts auf, wobei dies dann auch stets bei den ortsfesten Messungen an der Absaugung (MP 1) der Fall war. Einmal erwies sich die Erfassung des freigesetzten Staubs als derart wenig wirksam, dass selbst im Arbeitsbereich (MP 3) noch eine Staubkonzentration feststellbar war, die den Wert von  $10 \text{ mg/m}^3$  deutlich überschritt.

Für die Abfüllstationen konnten bei der Abfüllung in unterschiedliche Gebindearten z. B. folgende emissionsmindernde Maßnahmen als wirksam beurteilt werden:

- Befüllung von Big Bags: Verwendung neuer Big Bags, die dadurch keine Verschmutzungen aus vorherigen Nutzungen aufwiesen, sowie die Abtrennung der Abfüllstation durch eine Sichtscheibe.
- Befüllung von Säcken: Hier erwies sich insbesondere ein Absetzenlassen des Staubs innerhalb des befüllten Sacks infolge des eingefüllten Füllgutes als empfehlenswert. Dies bedeutet, dass ein Verschließen befüllter Säcke immer erst nach einer Wartezeit erfolgte, während der der nächste Sack befüllt wurde. Dadurch wurde beim Falten und dem üblicherweise durchgeführten Vernähen des „wartenden“ Sacks weniger Staub freigesetzt.
- Ebenso minimierte die Verwendung einer Prallplatte oberhalb des zu befüllenden Sacks direkt an der Abfüllstation die Freisetzung von Staub in den Arbeitsbereich.
- Eine Erhöhung der Absaugwirksamkeit war auch bei einer angebrachten Zusatzabsaugung zu verzeichnen, wenn das zu befüllende Gebinde wegen der Kontrolle der Füllmenge mittels Wägung nicht dicht an die Abfüllvorrichtung angeschlossen werden konnte.

Auch die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wurde durch Videoclips veranschaulicht, so wie es bei der manuellen Abfüllung der Fall war.

### 4.3 Prüfung der Umrechnung zwischen der alveolengängigen und der einatembaren Staubfraktion

In einer Reihe von Studien wurden bereits Versuche einer Umrechnung der Messergebnisse von Staubfraktionen ineinander durchgeführt. Für die Umrechnung der alveolengängigen Staubfraktion in die einatembare erfolgte dies z. B. von *Dahmann* et al. für den Uranbergbau [8] und von *Noto* et al. für die Zementherstellung [9]. Die wohl umfangreichste Untersuchung dieser Art wurde jüngst von *Wippich* et al. [10; 11] publiziert. Dort wurden für 15 120 Parallelmessungen die Messwerte der Konzentrationen der alveolengängigen  $C_R$  und der einatembaren

Staubfraktion  $C_I$  sechs Tätigkeits- und drei Materialgruppen zugeordnet. Für diese Gruppierungen erwiesen sich Potenzfunktionen als am besten zur Umrechnung geeignet. Da im Rahmen dieser Untersuchungen alle Messungen unter vergleichbaren Bedingungen erfolgten, wurde die Vorgehensweise von *Wippich* et al. [10; 11] auf die Messdaten – wenn auch mit einem deutlich geringeren Datenumfang – übertragen. Als Tätigkeitsgruppe wurde „Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren“ zum Vergleich gewählt, wobei bei den nachfolgenden Betrachtungen ausschließlich die Tätigkeit „(Be-)Füllen“ relevant ist.

Auch diese Betrachtungen erfolgten getrennt nach den beiden SEGs [6] „manuelle Abfüllung“ und „Abfüllstation“. Da die unter 4.1 dargestellten Ergebnisse den ortsfesten Messungen (MP3) eine nur geringe Aussagekraft zur Expositionsbeurteilung zukommen lassen, wurden nur die personengetragenen Messungen am Messpunkt MP2 berücksichtigt, die den üblichen Arbeitsplatzmessungen zur Expositionsbeurteilung nach TRGS 402 [12] entsprechen.

Für die manuelle Abfüllung mittels Handschaufel ergab sich selbst im besten Fall – bei der manuellen Befüllung von Flaschen (11 Messungen, 4 Betriebe) – für die personengetragenen Messungen bei Anwendung einer Potenzfunktion nur ein Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,17$ , das demjenigen einer linearen Umrechnung zwischen beiden Staubfraktionen ( $R^2 = 0,18$ ) entsprach. Als Ursache für diese schlechte Korrelation können die während der Messungen bei der manuellen Abfüllung beobachteten Stauffreisetzung infolge der Bewegung der gefüllten Handschaufel zwischen dem Vorratsbehälter und dem zu befüllenden Behälter durch den Beschäftigten angesehen werden. Dieser Vorgang war beim Vergleich der einzelnen Beschäftigten aufgrund der individuellen Arbeitsweise unterschiedlich ausgeprägt, so dass eine zusammenfassende Auswertung mit dem Ziel einer Umrechnung hier erwartungsgemäß nicht möglich war.

Anders stellte sich das Bild bei der Abfüllung an Abfüllstationen dar. Bei der Befüllung von Säcken betrug  $R^2 = 0,44$  für 27 logarithmisch transformierte Messwerte aus acht Betrieben (MP2). Gegenüber  $R^2 = 0,24$  bei linearer Umrechnung zwischen den beiden Staubfraktionen war das eine deutliche Verbesserung. Für andere Gebindearten war die Anzahl der Messungen für eine gesonderte Betrachtung zu gering ( $<10$ ). Weiterhin wurden alle Gebindearten an den Abfüllstationen (51 Messungen, 8 Betriebe) für eine vergleichende Auswertung zusammengefasst. Auch hier wurde mit  $R^2 = 0,57$  für die Potenzfunktion eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur linearen Umrechnung ( $R^2 = 0,35$ ) erzielt. Die resultierende Umrechnung der beiden Staubfraktionen ergab sich für die Abfüllstationen zu

$$C_R = 0,254 * C_I^{0,339} \quad (2)$$

Die für Abfüllstationen im Vergleich zur manuellen Abfüllung ermittelte Verbesserung der Umrechnung beider Staubfraktionen mittels Potenzfunktion wird in erster Linie dadurch erklärt, dass das individuelle Verhalten der Beschäftigten bei den Abfüllstationen weniger Einfluss auf die Expositionshöhe hat.

Die von *Wippich* et al. [10; 11] empfohlene Umrechnung mittels Potenzfunktion bestätigt sich und ist bevorzugt anzuwenden. Ebenso zeigt sich, dass eine lineare Umrechnung nicht durchgeführt werden sollte.

#### 4.4 Prüfung auf Zusammenhänge zwischen den gemessenen Konzentrationswerten und den Staubwerten bei Abfülltätigkeiten

Bei allen Abfülltätigkeiten wurden stets beide Staubfraktionen an den Messpunkten MP1 bis MP3 und die zugehörigen Staubwerte  $W_R$  und  $W_I$  des jeweils abgefüllten Stoffs gemessen. Weiterhin wurden als zusätzliche Informationen die Tätigkeitsdauer, die Füllmenge je Gebinde sowie die Art und Anzahl der während der Messung befüllten Gebinde erfasst. Da sich für die Staubwerte – wie unter 4.1 dargestellt – Hinweise auf eine Korrelation zeigten, erfolgte eine Prüfung der Daten dahingehend, ob für die beiden Staubfraktionen zwischen den Staubwerten und den gemessenen Luftkonzentrationen ebenfalls Zusammenhänge ableitbar sind.

Eine Unterscheidung wird hierbei nur bezüglich der Messpunkte MP1 und MP2 getroffen, um mögliche Aussagen zur Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen bzw. der Exposition der Beschäftigten abzuleiten. Als Folge der bereits unter 4.2 aufgeführten Feststellungen wurde MP3 nicht weiter betrachtet. Es werden im Folgenden nur Ergebnisse zur linearen Korrelation

$$C_{R,I} = a + b * W_{R,I} \quad (3)$$

dargestellt, da sowohl bei halblogarithmischer als auch bei logarithmischer Transformation der Messwerte geringere Korrelationen mit einem niedrigeren Bestimmtheitsmaß resultierten.

Für die Messung direkt an der Absaugung (MP1) ergab sich nur bei manueller Abfüllung für die einatembare Staubfraktion für  $C_I$  und  $W_I$  gemäß Gleichung 3 mit  $R^2 = 0,82$  ein Bestimmtheitsmaß oberhalb des vereinbarten Kriteriums von 0,5. Man kann davon ausgehen, dass die Konzentration der nicht erfassten einatembaren Staubfraktion mit höherem Staubwert steigt. Dies wird auch dadurch gestützt, dass die Staubkonzentration bezogen auf die Füllmenge je Gebinde und die Anzahl der befüllten Gebinde mit  $R^2 = 0,83$  bzw.  $R^2 = 0,7$  ebenfalls gut mit dem Staubwert  $W_I$  korreliert. Für die alveolengängige Staubfraktion wurde stets  $R^2 < 0,1$  ermittelt, sodass davon auszugehen ist, dass  $W_R$  wenig geeignet ist, Aussagen zur Höhe der Staubbelastung und deshalb erforderlicher Schutzmaßnahmen bei der manuellen Abfüllung abzuleiten. Für Abfüllstationen gilt für MP1 durchweg  $R^2 < 0,18$ , so dass keine weiteren Betrachtungen bezüglich beider Staubfraktionen erfolgen.

Die personengetragen ermittelten Messwerte (MP2) der alveolengängigen Staubfraktion  $C_R$  zeigen weder bei der manuellen Abfüllung noch bei den Abfüllstationen Bestimmtheitsmaße  $R^2$  oberhalb 0,3, wenn bezüglich einer Korrelation mit dem Staubwert  $W_R$  geprüft wird. Für die einatembare Staubfraktion zeigen die Messwerte  $C_I$  dagegen deutliche Hinweise auf eine Korrelation mit dem Staubwert  $W_I$ , sowohl für die manuelle Abfüllung als auch für Abfüllstationen. Die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  betragen hier 0,64 bzw. 0,86. Dies weist darauf hin, dass eine Ableitung von Schutzmaßnahmen für den Beschäftigten besser auf Grundlage der Staubwerte  $W_I$  für die einatembare Staubfraktion durchzuführen sein sollte. Ebenso wird dies als Hinweis interpretiert, dass anhand der Staubwerte  $W_I$  für die einatembare Partikelfraktion eher Aussagen zur Expositionshöhe ableitbar sind, als dies für die alveolengängige Fraktion möglich sein sollte.

## 5 Fazit und Ausblick

In zehn Betrieben wurden Messungen der alveolengängigen und einatembaren Staubfraktion bei der Abfüllung fester Stoffe in Gebinde verschiedener Form und Größe durchgeführt. Für alle abgefüllten Stoffe wurden die Staubwerte  $W_R$  und  $W_I$  für beide Staubfraktionen bestimmt [2]. Die für die Abfüllung von Lösemitteln entwickelte Messstrategie [1] mit simultanen ortsfesten Messungen an der Absaugvorrichtung und im umgebenden Arbeitsbereich sowie personengetragen am Beschäftigten erwies sich auch bei der Abfüllung fester Stoffe als geeignet, gleichzeitig Aussagen zur Wirksamkeit der Absaugung als emissionsmindernde Maßnahme und zur Expositionshöhe der Beschäftigten abzuleiten. Beruhend auf den durchgeführten Messungen wurden Videoclips erzeugt, die simultan wirksame und weniger wirksame Schutzmaßnahmen mit einem unterlegten Messsignal für freigesetzten Staub zeigen. Diese sind unter [www.baua.de/abfuellung-feststoffe](http://www.baua.de/abfuellung-feststoffe) für interessierte Nutzer frei verfügbar.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die manuelle Abfüllung unter Verwendung einer Handschaufel und die Abfüllung an Abfüllstationen jeweils als gesonderte Tätigkeiten zu betrachten und im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung zu beurteilen sind. Bei der Abfüllung sind personengetragene Messungen beider Staubfraktionen zur Expositionsermittlung aussagekräftig.

ger als ortsfeste Messungen im Arbeitsbereich und daher grundsätzlich zu bevorzugen.

Die Ermittlung der Staubwerte beider Staubfraktionen für die abgefüllten Stoffe ergab eine Korrelation für deren Umrechnung mittels einer Exponentialfunktion. Inwieweit daraus verallgemeinerungsfähige Aussagen ableitbar sind, bedarf noch weiterer Untersuchungen. Zwischen dem Messwert für die alveolengängige Staubfraktion und dem zugehörigen Staubwert dieser Fraktion ergab sich nur eine geringe Korrelation für die personengetragen ermittelten Messwerte. Für die einatembare Staubfraktion war die Korrelation zwischen dem Mess- und Staubwert dagegen deutlich stärker ausgeprägt. Dies weist darauf hin, dass der Staubwert eines Stoffs für die einatembare Staubfraktion zur Kategorisierung des Freisetzungspotenzials von festen Stoffen bei der Ableitung geeigneter Schutzmaßnahmen im Rahmen des EMKG [3] anwendbar ist. Das eröffnet die Möglichkeit, das Freisetzungspotenzial fester Stoffe als Stoffeigenschaft mit einer im Labor unter standardisierten Bedingungen gut messbaren Größe zu charakterisieren, wie das bei Lösemitteln mit dem Siedepunkt bzw. Dampfdruck der Fall ist.

Der Versuch einer einfachen linearen Umrechnung der gleichzeitig gemessenen, personengetragenen Staubkonzentrationen der alveolengängigen und einatembaren Fraktion erwies sich nicht als zielführend. Dagegen konnte die Vorgehensweise von Wippich et al. [10; 11] unter Verwendung einer Potenzfunktion als sehr erfolgversprechend bestätigt werden. Es zeigte sich aber auch, dass das individuelle Verhalten des Beschäftigten bei einer Tätigkeit wie dem manuellen Abfüllen ausgeprägt expositionsbestimmend ist und hier daher keine Umrechnung empfohlen wird. Ist die Tätigkeit dagegen stärker standardisiert, z.B. infolge der technischen Ausführung einer (Abfüll-)Anlage, die den Einfluss der Arbeitsweise des Beschäftigten überwiegt, konnte eine Umrechnung beider Staubfraktionen mittels Potenzfunktion zufriedenstellend durchgeführt werden.

#### DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Verband Chemiehandel (VCH) e. V. sowie allen beteiligten Betrieben und deren Beschäftigten für die Unterstützung der Untersuchungen. Weiterhin gilt unser Dank dem Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) in Bochum für die Bestimmung der Staubwerte.

#### Literatur

- [1] *Hebisch, R.; Karmann, J.; Fritzsche, J.; Fröhlich, N.; Baumgärtel, A.:* Validation of control guidance sheets for filling of containers with organic solvents. *Gefährstoffe – Reinhalt. Luft* 75 (2015) Nr. 1/2, S. 17-22.
- [2] DIN EN 15051-3: Exposition am Arbeitsplatz – Messung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern: Verfahren mit kontinuierlichem Fall. (3/2014), Berlin, Beuth 2014.
- [3] *Kahl, A.; Wilmes, A.; Guhe, Ch.; Packroff, R.; Lotz, G.; Tischer, M.:* EMKG-Leitfaden. Einfaches Maßnahmenkonzept Gefährstoffe. Version 2.2. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund 2014. [www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd64.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd64.pdf?__blob=publicationFile)
- [4] Technische Regel für Gefahrstoffe: Verfahrens- und stoffspezifische Kriterien (VSK) für die Ermittlung und Beurteilung der inhalativen Exposition (TRGS 420). *BArBBl.* (2014) Nr. 48; zul. geänd. *GMBI.* (2020) Nr.9-10, S. 199.
- [5] *Sachs, L.:* Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. 4. Aufl. München: Carl Hanser Verlag 2013.
- [6] DIN EN 689: Exposition am Arbeitsplatz – Messung der Exposition durch Einatmung chemischer Arbeitsstoffe – Strategie zur Überprüfung der Einhaltung von Arbeitsplatzgrenzwerten (1/2020). Berlin: Beuth 2020.
- [7] Technische Regel für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). *BArBBl.* (2006) Nr. 1, S. 41-55; zul. geänd. *GMBI.* (2020) Nr. 12-13, S. 276.
- [8] *Dahmann, D.; Bauer, H.; Stoyke, G.:* Retrospective exposure assessment for respirable and inhalable dust, crystalline silica and arsenic in the former German uranium mines of SAG/SDAG. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 81 (2008) No. 8, S. 949-958.
- [9] *Notø, H. P.; Nordby, K.-C.; Wijnand, E.:* Relationships between personal measurements of „total“ dust, respirable, thoracic, and inhalable aerosol fractions in the cement production industry. *Ann. Occup. Hyg* 60 (2016), No. 4, S. 453-466.
- [10] *Wippich, C.; Koppisch, D.; Breuer, D.:* Möglichkeit zur Umrechnung der Konzentration von einatembarem in alveolengängigen Staub. *Gefährstoffe – Reinhalt. Luft* 79 (2019) Nr. 9, S. 303-311.
- [11] *Wippich, C.; Rissler, J.; Koppisch, D., Breuer, D.:* Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposure and Health* 64 (2020), No. 4, S. 430-444.
- [12] Technische Regel für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). *BArBBl.* (2010) Nr. 12, S. 231-253, zul. geänd. *GMBI.* (2016) Nr. 43, S. 843-846.

**Dr. rer. nat. Ralph Hebisch,**  
**Dipl.-Ing. (FH) Jörg Karmann,**  
**Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Prott,**  
**Dipl.-Ing. (FH) Anita Woznica,**  
 Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund.