

# Berechnung der Messunsicherheit – Teil 2: Unsicherheitskomponenten eines Messverfahrens

C. Wippich, J. Rissler, J. Dospil, K. Pitzke

**ZUSAMMENFASSUNG** Bei der Bestimmung der Konzentration von chemischen Arbeitsstoffen in der Luft am Arbeitsplatz existieren grundlegende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Messverfahren und somit auch an ihre Messunsicherheit. Um die Qualität und Eignung eines solchen Messverfahrens beurteilen zu können, ist es notwendig, die Messunsicherheit der eingesetzten Messverfahren zu ermitteln. Um die Messunsicherheit überhaupt berechnen zu können, müssen zunächst relevante Einflussfaktoren auf den Messwert zusammengetragen werden. Die Einflussfaktoren umfassen verschiedene Schritte der Verfahrensvalidierung, vor allem die Probenahme und die Analytik. Im nächsten Schritt müssen zu den Abweichungen jedes relevanten Schritts der Probenaufarbeitung und Validierung Unsicherheiten berechnet werden, um letztendlich die kombinierte Standardabweichung bestimmen zu können. Im zweiten Teil dieses Artikels werden die relevanten Einflussfaktoren beschrieben, eine Einteilung der zugehörigen Abweichungen in systematische und zufällige Effekte vorgenommen und Unsicherheiten berechnet. Diese Schritte werden als Vorbereitung zum Erstellen eines verfahrensspezifischen mathematischen Modells zur Berechnung der Messunsicherheit benötigt, das im folgenden dritten Teil des Artikels anhand eines Beispiels erläutert wird.

## 1 Messunsicherheit im Regelwerk

Der erste Teil des Artikels zur Berechnung der Messunsicherheit (Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 82, Nr. 1-2/2023) beinhaltet Begriffsdefinitionen, das Grundprinzip der Messunsicherheitsbetrachtung sowie Beschreibungen diverser Leitfäden und erste Rechnungsansätze.

Um eine valide analytische Messmethode erstellen zu können, ist die Berechnung ihrer Messunsicherheit notwendig. Im Bereich der Expositionsbestimmung von chemischen Arbeitsstoffen in der Luft an Arbeitsplätzen existieren spezifische Mindestanforderungen gemäß der Norm DIN EN 482 [1] oder der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 402 [2] an die erweiterte Messunsicherheit, welche die Eignung eines Messverfahrens maßgeblich beeinflussen. Dies gilt auch, wenn das ausführende Labor nicht nach DIN EN ISO/IEC 17025 [3] akkreditiert ist oder den Verordnungen im Trinkwasserbereich unterliegt.

In DIN EN 482 [1] werden die Anforderungen an die erweiterte Messunsicherheit definiert (**Tabelle 1**). Zur Überwachung von Akzeptanz- (AK) und Toleranzkonzentration (TK) bei krebserzeugenden Gefahrstoffen gelten abweichend zur

## Calculation of measurement uncertainty – Part 2: Uncertainty components of a measurement method

**ABSTRACT** When determining the concentration of chemical agents in the air at workplaces, there are fundamental requirements for the performance of measurement methods and thus also for their measurement uncertainty. In order to assess the quality and suitability of such a measurement method, it is necessary to determine the measurement uncertainty of the measurement methods used. To calculate the measurement uncertainty, firstly relevant factors influencing the measured value must be compiled. The influencing factors include different steps of the measurement method validation, especially the sampling processes and analytical procedures. In the next step, uncertainties must be calculated for the deviations of each relevant sample preparation and validation step in order to finally determine the combined standard deviation. In the second part of this article, the relevant influencing factors are described, a classification of the associated deviations into systematic and random effects is made, and uncertainties are calculated. This information is required to be able to create a measurement method-specific mathematical model for the calculation of the measurement uncertainty, which will be explained in the following third part of the article based on an example.

DIN EN 482 [1] die Mindestanforderungen der TRGS 402 [2] (**Tabelle 2**).

Werden die Anforderungen an die Messunsicherheit nicht eingehalten, so liefert die Messunsicherheitsbetrachtung die Einflussgrößen oder Parameter, die zu verbessern sind (oder zu denen mehr Informationen benötigt werden), um die Anforderungen einzuhalten. Auch jenseits der normativen Anforderungen ist das Wissen über die Größe von Einflussfaktoren der zielführendste Vorteil für jedes Labor. Denn damit lässt sich der eigene Messprozess nicht nur transparent beschreiben, sondern auch konsequent verbessern.

## 2 Einflussfaktoren auf den Messwert

Bevor ein mathematisches Modell für weitere Berechnungen der Messunsicherheit erstellt werden kann, müssen alle relevanten Einflussgrößen zusammengetragen werden. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, auch die Abweichungen der Parameter zu erfassen, die beispielsweise aus Herstellerangaben, Prüfcertifikaten und Normen entnommen oder aus der Verfahrensvalidierung berechnet werden können.

**Tabelle 1** Anforderungen an die erweiterte Messunsicherheit nach DIN EN 482 [1]; GW = Grenzwert.

Referenzzeitspanne	Messbereich	Relative erweiterte Messunsicherheit	Relative erweiterte Messunsicherheit (Mischung aus luftgetragenen Partikeln und Dampf)
Kurzzeitmessung (z. B. 15 min)	0,5 bis 2-facher GW	≤ 50 %	≤ 50 %
Langzeitmessung	0,1 bis unter 0,5-facher GW	≤ 50 %	≤ 50 %
Langzeitmessung	0,5 bis 2-facher GW	≤ 30 %	≤ 50 %

**Tabelle 2** Von DIN EN 482 [1] abweichende Mindestanforderungen an die Messunsicherheit zur Überwachung von Akzeptanz- (AK) und Toleranzkonzentration (TK) nach TRGS 402 [2]; BG = Bestimmungsgrenze.

Eignung	Mindestmessbereich	Relative erweiterte Messunsicherheit
Geeignet für die Überwachung der AK und der TK	0,2 AK bis 2 TK	0,2 AK bis AK ≤ 50 % AK bis 2 TK ≤ 30 %
Geeignet für die Überwachung der AK	0,2 AK bis 2 AK	0,2 AK bis AK ≤ 50 % AK bis 2 AK ≤ 30 %
Geeignet für die Überwachung der TK	AK bis 2 TK	AK bis ≤ 0,5 TK ≤ 50 % 0,5 TK bis 2 TK ≤ 30 %
Bedingt geeignet für die Überwachung der AK	BG bis 2 AK	≤ 50 %
Bedingt geeignet für die Überwachung der TK	BG bis 2 TK	≤ 50 %

Nicht alle Schritte der Verfahrensvalidierung haben einen Einfluss auf die Messunsicherheit. Folgende Komponenten müssen bei der Berechnung mindestens berücksichtigt werden:

- Probenahme,
- Evtl. Transport der Proben zum Labor (nur Partikel/Partikel-Dampfgemische [4]),
- Probenvorbereitung,
- Kalibrierung des Messgeräts/der Messgeräte,
- Wiederfindung der Substanz,
- Vergleich- oder Wiederholpräzision der Messergebnisse,
- Drift der Messgeräte,
- Einfluss von Temperatur (für alle außer Metalle/Metalloide [5], bei Gasen und Dämpfen, wenn der Einfluss des Probenträgers nicht bekannt ist),
- Einfluss von Luftfeuchte (für alle außer Metalle/Metalloide [5]).

Der Transport der Proben wird nur dann berücksichtigt, wenn die Obergrenze des Probenverlusts beim Transport von 5 % überschritten wird [6, 7]. Im Allgemeinen geht man aber davon aus, dass der Probenverlust während des Transports vernachlässigbar ist [4].

Folgende Teile der Validierung müssen für die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit im Allgemeinen nicht berücksichtigt werden:

- Transport (außer Partikel/Partikel-Dampfgemische),
- Lagerung (innerhalb des Lagerzeitraums nach Lagerungsvorsuch),
- Nachweis- und Bestimmungsgrenze,
- Blindwerte.

Die Lagerung darf allerdings nur dann vernachlässigt werden, wenn sich bei der Validierung gezeigt hat, dass mit keinem lagerbedingten Verlust der Substanz über einen bestimmten Zeitraum zu rechnen ist [4, 5].

Zur groben Unterteilung, welchen Bezug eine Einflussgröße hat, eignet sich die Gruppierung in „Probenahme“ und „Analytik“

(in **Tabelle 3** als „Übergruppe“ definiert). Jede Einflussgröße ist unsicherheitsbehaftet. Wie schon im ersten Teil dieses Artikels beschrieben, lassen sich Unsicherheiten in systematische und zufällige Abweichungen untergliedern. Letztere lassen sich auch in Kategorie Typ A und Typ B unterteilen. Dies hat im Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) [8] historische Gründe und ist für die Praxis kaum von Bedeutung. Der Typ A ist für die Wiederholungsunsicherheit reserviert. Diese beschreibt die Unsicherheit des Mittelwerts von eigenen Messwerten unter Wiederholbedingungen. Bei den meisten Verfahren zur Bestimmung der Konzentration von chemischen Arbeitsstoffen in der Luft am Arbeitsplatz betrifft das nur die Wiederholungsunsicherheit der Probenahmepumpe. Diese wird aber aus anderen Messungen ermittelt, wodurch sie ebenfalls zu Typ B gehören. Nähere Informationen zur Einteilung in Typ A und Typ B sind in Teil 1 enthalten. In Tabelle 3 werden Beispiele der Einflussparameter für Verfahren zur Expositionsermittlung in der Luft am Arbeitsplatz, sowie ihre Zuordnung und Quelle aufgeführt.

Eine solche Liste von Einflussfaktoren ist die Grundlage jeder Messunsicherheitsbetrachtung. Dabei ist es wichtig, dass die Einflussfaktoren voneinander unabhängig sind, da sonst die Voraussetzungen für die Berechnung nicht gegeben sind. Eine genaue Erklärung der einzelnen Einflussfaktoren und die Berechnung der Unsicherheiten erfolgen in den nächsten Abschnitten.

### 3 Unsicherheiten

Um einen Schätzwert für die kombinierte Standardabweichung zu erhalten (siehe Gleichung 1), muss man – wie im ersten Teil dieses Artikels beschrieben – für jeden Parameter  $X_i$  in Tabelle 3 zwei Größen bestimmen: die Unsicherheit  $s(X_i)$  und den Sensitivitätskoeffizienten  $c_p$ . Dieser Abschnitt widmet sich den Unsicherheiten. Die Bedeutung und Berechnung der Sensitiv-

**Tabelle 3** Beispiele für Einflussparameter, deren zugehörige Abweichungstypen und Quellen; E-Staub: einatembarer Staub, A-Staub: alveolengängiger Staub, m = Masse auf dem Filter, q = gemessener Volumenstrom, d = Bezugsvolumen, A = Ausgegebenes Volumen/Masse im Analysengerät,  $s(X_i)$  = Unsicherheiten.

Übergruppe	Parameter $X_i$	Beschreibung und Quelle		Berechnung von $s(X_i)$	
Probenahme	Wiederholunsicherheit der Probenahmepumpe	2,3 % [9]		$s(q_{wdh}) = \frac{q \cdot 0,023}{\sqrt{3}}$	
	Kalibrierunsicherheit der Probenahmepumpe	5,2 % [9]		$s(q_{cal}) = \frac{q \cdot 0,052}{\sqrt{3}}$	
	Pumpenstabilität	5 % [10]		$s(q_{stab}) = \frac{q \cdot 0,05}{\sqrt{3}}$	
	Abweichung in Verbindung mit der Messdauer	±1 min (eigene Festlegung und Diskussion nach [5])		$s(t_{tot}) = \frac{1}{\sqrt{6}} \text{ min}$	
	<b>Probenahmekopf (A/E)</b>	<b>A-Staub</b>	<b>E-Staub</b>		
	Kalibrierung des Sammler-Prüfsystems	1 % [4]	0,5 % [4]		
	Abschätzung der gesammelten Konzentration	1 % [4]	4 % [4]		
	Messabweichung in Bezug auf die Probenahmekonvention	8 % [4]	7,5 % [4]		
	Abweichung vom Nenn-Durchfluss bei auf Massenträgheit basierenden Vorabscheidern	6 % [4]	–		
	Individuelle Variabilität des Probenahmeegeräts	7 % [4]	–		
	<b>Summe (A/E):</b>	23 % [4]	12 % [4]	$\frac{m \cdot 0,12}{\sqrt{3}}$	$\frac{m \cdot 0,23}{\sqrt{3}}$
	<b>Probenahmekopf (Modelle)</b>	13,9 bis 49,5 % [4] (je nach Modell unterschiedlich)		$m_{kopf} = \frac{m \cdot x}{\sqrt{3}}$ $x = [0,139; 0,495]$	
Analytik	Gerätedrift	$z_c$ (wird analytisch bestimmt oder Herstellerangaben)		$s(c_{drift}) = \frac{A \cdot z_c}{\sqrt{3}}$	
	Pipetten/Dispenser systematisch	$z_s$ (Kalibrierprotokoll oder Qualifizierung)		$s(V_{sys}) = \frac{d \cdot z_s}{\sqrt{3}}$	
	Pipetten/Dispenser zufällig	$z_r$ (wird analytisch bestimmt oder Kalibrierprotokoll)		$s(V_{rand}) = \frac{d \cdot z_r}{\sqrt{3}}$	
	Ableseungenauigkeiten der Gefäße	$z_0$ (Herstellerangaben oder selbst ermittelt)		$V_0 = \frac{d \cdot z_0}{\sqrt{3}}$	
	Wiederfindung der betreffenden Substanz systematisch	Validierung – Wiederfindung		Regressionsparameter	
	Wiederfindung der betreffenden Substanz zufällig (Vergleichpräzision)	Validierung – Wiederfindung		Standardfehler Regression (Erklärung folgt in Teil 3)	
	Effekt der Luftfeuchte auf die Wiederfindung der betreffenden Substanz systematisch	Validierung – Wiederfindung		Standardfehler Regression (Erklärung folgt in Teil 3)	
	Effekt der Luftfeuchte auf die Wiederfindung der betreffenden Substanz zufällig	Validierung – Wiederfindung		Standardfehler Regression (Erklärung folgt in Teil 3)	
	Effekt der Temperatur auf die Wiederfindung der betreffenden Substanz systematisch	Validierung – Wiederfindung		Standardfehler Regression (Erklärung folgt in Teil 3)	
	Effekt der Temperatur auf die Wiederfindung der betreffenden Substanz zufällig	Validierung – Wiederfindung		Standardfehler Regression (Erklärung folgt in Teil 3)	
	Kalibrierung des Messgeräts	Validierung – Kalibrierung		Standardfehler Regression (Erklärung folgt in Teil 3)	

vitätskoeffizienten  $c_i$  wird im dritten Teil dieses Artikels näher erläutert.

$$s_c = \sqrt{\sum_i s(X_i)^2 c_i^2}$$

Im Zusammenhang mit dieser Formel muss beachtet werden, dass die Standardunsicherheiten  $u$  im GUM als Standardabweichungen  $\sigma$  interpretiert werden [8]. Da man deren wahre Werte nie kennt, berechnet man Schätzwerte  $s$  dafür.

### 3.1. Zufällig oder systematisch?

Die zweite Spalte in Tabelle 3 hält zunächst fest, dass die überwiegende Anzahl der Parameter zufällige Einflussgrößen sind. Es gibt nur wenige Ausnahmen, bei denen es sich um systematische Einflüsse handelt: bei den Volumenmessgeräten und der Wiederfindung sowie bei Effekten von Luftfeuchte und Temperatur auf die Substanz. Systematische Einflüsse sind solche, die direkt auf den Messwert wirken und die korrigiert werden müssen (siehe Teil 1).

Wenn die Wiederfindungsversuche ergeben, dass beispielsweise immer 2 mg zu wenig oder immer 5 % zu viel gemessen werden, dann muss das Messergebnis korrigiert werden. Wenn die Wiederfindungsversuche in einem Regressionsmodell beschrieben werden, übernehmen der Achsenabschnitt und die Steigung diese Korrektur (siehe Zeile „Wiederfindung der betreffenden Substanz systematisch“ in Tabelle 3).

Bei Volumenmessgeräten wird die systematische Abweichung bestimmt und in Kalibrierprotokollen angegeben [11] oder bei der regelmäßigen Gerätequalifizierung ermittelt. In den Protokollen findet man die mittlere Abweichung  $e_s$ , die man (auch später im mathematischen Modell, Teil 3 dieses Artikels) zum Volumenwert addieren oder subtrahieren muss. Diese Korrektur nimmt Einfluss auf das Messergebnis.

### 3.2 Systematische Einflüsse der Volumenmessgeräte

Die eben genannte mittlere Abweichung, die als Korrekturparameter fungiert, wird in Tabelle 3 bei den systematischen Abweichungen der Pipetten und Dispenser nicht berücksichtigt. Dafür gibt es folgenden Grund:

Wenn nur ein Volumenmessgerät eingesetzt wird, oder man genau weiß, welches Volumenmessgerät eingesetzt wird, dann wäre  $z_s = e_s$  (siehe Abweichung Pipetten/Dispenser systematisch, Tabelle 3) und man muss dieses nur vom Bezugsvolumen abziehen. In Gleichung 1 gäbe es dann keinen Term für die systematische Abweichung. Allerdings werden an den meisten Laborarbeitsplätzen viele verschiedene Volumenmessgeräte eingesetzt. Dadurch ist es nur schwer nachvollziehbar, welches Gerät bei der Bestimmung des speziellen Messwerts eingesetzt worden ist. Wenn sehr viele Pipetten im arbeitstäglichen Gebrauch sind, deren systematische Abweichung im Bereich  $\pm z_s$  um den Messwert liegen, dann wird jeder Messwert zufällig in diesem Bereich verändert. Dies ist vergleichbar mit einer Fehlergrenze. Aus diesem Grund wird dieser Einfluss behandelt, als ob es sich um einen zufälligen Effekt handelt (siehe Abschnitt 3.5).

Der GUM schließt dieses Vorgehen nicht aus (Anmerkung zu 6.3.1 und F.2.4.5 [8]). Es handelt sich auch nicht um einen pauschalen Sicherheitszuschlag (E.1.2 [8]), der nach GUM zu vermeiden ist.

Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle allerdings, dass akkreditierte Labore rückführbar nachhalten müssen, welche (Volumenmess-)Geräte genutzt wurden und demnach auch deren systematische Abweichungen bei der Messunsicherheitsbetrachtung nutzen sollten.

### 3.3 Quellen

Die Einflussgrößen mit der Quelle ihrer Beschreibung sind in der dritten Spalte in Tabelle 3 enthalten. Die Einflüsse der Probe-

nahme entstammen Normen [4 bis 7] oder werden, wie für die Probenahmedauer, aus Normangaben abgeleitet [5]. In der Analytik sind die Quellen für die Volumenmessgeräte die Kalibrierprotokolle oder Protokolle der Gerätequalifizierung [12]. Die Gerätedrift kann entweder aus Herstellerangaben entnommen oder analytisch bestimmt werden [4, 5]. Die Ablesegenauigkeit von Gefäßen stammt aus Herstellerangaben. Insbesondere bei der Wiederfindung und Kalibrierung der Messgeräte beziehen wir uns jedoch auf eigene Messungen aus der Validierung.

In der DIN EN ISO 21832 [4] gibt es mehrere Möglichkeiten, die Messunsicherheit der Probenahmeköpfe zu beschreiben. Zum einen wird dort eine Liste mit verschiedenen Modellen (z. B. GSP und IOM in Bezug auf bestimmte Volumenströme) aufgeführt, zum anderen auch eine Liste mit Unsicherheitsschätzern für die Probenahme von alveolengängigem und einatembarem Staub (A- und E-Staub). Aus diesem Grund werden in Tabelle 3 zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Probenahmekopfes angegeben (Probenahmekopf nach Modell und Schätzer für E/A, siehe Tabelle 3).

Wenn in Kalibrierprotokollen Unsicherheiten mit Wahrscheinlichkeiten angegeben sind, verbergen sich dahinter erweiterte Unsicherheitsbereiche, wie im Teil 1 dieses Artikels beschrieben:  $u = ks$ . Dabei ist  $s$  die bei der Kalibrierung beobachtete Standardabweichung und der Erweiterungsfaktor  $k$  hängt von der zugeordneten Wahrscheinlichkeit ab. Bei einer Wahrscheinlichkeit von 95 % kann man annehmen, dass  $k = 1,96$ . Um aus Unsicherheiten  $u$  die Standardabweichung für Gleichung 1 zu erhalten, muss also erst noch durch  $k$  dividiert werden. Dies kommt in der Praxis häufiger vor, auch wenn es in Tabelle 3 nicht angewendet werden muss.

### 3.4 Fehlergrenzen

Die meisten Angaben, die man von Geräteherstellern oder aus Normen bezieht, werden in Prozent angegeben (siehe Spalte 3 in Tabelle 3). Dies ist als sogenannte Fehlergrenze zu verstehen. Am Beispiel des Volumenstroms bedeutet dies, dass sich das Messergebnis wegen der Einflussgröße „Pumpenstabilität“ nur um  $\pm 5\%$  ändern kann. Wie bereits im ersten Teil dieses Artikels kurz dargestellt, beschreibt die Statistik an dieser Stelle das Prinzip der maximalen Entropie, das besagt, dass eine Zufallszahl, die nur in einem festen Bereich existiert, mit einer Gleichverteilung beschrieben werden kann. Der Schätzwert für die Standardabweichung einer Gleichverteilung ist aber die halbe Breite des Verteilungsbereichs dividiert durch  $\sqrt{3}$ . In unserem Beispiel ist die halbe Breite 5 % des gemessenen Volumenstroms, also  $q \cdot 0,05$ . Damit ist

$$s(q_{\text{stab}}) = \frac{q \cdot 0,05}{\sqrt{3}}$$

### 3.5 Weitere Annahmen

Ausnahmen zum Vorgehen im Zusammenhang mit der Fehlergrenze bilden nur wenige Parameter, beispielsweise die Probenahmedauer. Hier wird angenommen, dass man die Messung innerhalb einer Minute starten und stoppen kann, sodass unabhängig von der Probenahmedauer die Unsicherheit  $\pm 1$  min beträgt. Diese Unsicherheitsannahme ist absichtlich großzügig gewählt, sodass alle Kalibrierunsicherheiten und Ablesegenauigkeiten der

Uhr dort enthalten sind. Die Normen DIN EN ISO 22065, DIN EN ISO 20581 und DIN EN 482 [1, 5, 13] gehen davon aus, dass diese Zufallsgröße dreiecksverteilt ist. Dadurch muss zur Ermittlung des Schätzwerts der Standardunsicherheit die halbe Breite durch dividiert werden.

Die Unsicherheiten, die sich auf das Regressionsmodell der Kalibrierung und der Wiederfindung beziehen, erschließen sich, wenn im dritten Teil dieses Artikels die Regressionsrechnung und das mathematische Modell genauer beschrieben werden.

## 4 Ausblick

In diesem Teil des Artikels zur Berechnung der Messunsicherheit wurden die Messunsicherheit im Regelwerk beschrieben, Einflussfaktoren auf den Messwert benannt und die Berechnung einiger relevanter Unsicherheiten sowie ihrer Untergliederung zu systematischen und zufälligen Abweichungen aufgeführt. Im Fall der Einflussfaktoren Wiederfindung der Substanz, Kalibration der Messgeräte und Effekte von Temperatur und Luftfeuchte auf den Messwert werden zur Bestimmung der Unsicherheiten Regressionsfunktionen verwendet. Diese werden im nächsten Teil des Artikels näher erläutert.

Zur korrekten Berechnung der Messunsicherheit müssen zusätzlich zu den Unsicherheiten auch Sensitivitätskoeffizienten berechnet werden, um die Einheiten anzugleichen und dem jeweiligen Parameter eine Gewichtung zuzuschreiben. Die Berechnung der Sensitivitätskoeffizienten sowie das Aufstellen eines mathematischen Modells und die eigentliche Berechnung der Messunsicherheit werden an einem praktischen Beispiel ebenfalls im nächsten und abschließenden Teil des Artikels beschrieben. ■

### Literatur

- [1] DIN EN 482: Exposition am Arbeitsplatz – Verfahren zur Bestimmung der Konzentration von chemischen Arbeitsstoffen – Grundlegende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit (5/2021). Berlin: Beuth 2021.
- [2] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). GMBI. (2010) Nr. 12, S. 231; zul. geänd. GMBI. (2016) Nr. 43, S. 843.

- [3] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (3/2018). Berlin: Beuth 2018.
- [4] DIN EN ISO 21832: Luft am Arbeitsplatz – Metalle und Metalloide in luftgetragenen Partikeln – Anforderung an die Evaluierung von Messverfahren (8/2020). Berlin: Beuth 2020.
- [5] DIN EN ISO 22065: Luft am Arbeitsplatz – Gase und Dämpfe – Anforderungen an die Evaluierung von Messverfahren mit pumpenbetriebenen Probenahmeeinrichtungen (2/2021). Berlin: Beuth 2021.
- [6] DIN ISO 15767: Arbeitsplatzatmosphäre – Kontrolle und Charakterisierung der Unsicherheit beim Wägen von gesammelten Aerosolen (10/2010). Berlin: Beuth 2010.
- [7] DIN EN 13205-1: Exposition am Arbeitsplatz – Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sammlern für die Messung der Konzentration luftgetragener Partikel – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (9/2014). Berlin: Beuth 2014.
- [8] ISO/IEC Guide 98-3: Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement [GUM: 1995] (9/2008). Berlin: Beuth 2008.
- [9] ISO 20581: Luft am Arbeitsplatz – Allgemeine Leistungsanforderungen an Verfahren zur Messung chemischer Arbeitsstoffe (11/2016). Berlin: Beuth 2016.
- [10] DIN EN ISO 13137: Arbeitsplatzatmosphäre – Pumpen für die personengetragene Probenahme von chemischen und biologischen Arbeitsstoffen – Anforderungen und Prüfverfahren (1/2023). Berlin: Beuth 2023.
- [11] DIN EN ISO 8655-6: Volumenmessgeräte mit Hubkolben, Teil 6: Gravimetrische Prüfverfahren zur Bestimmung der Messabweichung (12/2002). Berlin: Beuth 2002.
- [12] S. Kromidas: Validierung in der Analytik. Weinheim: Wiley-VCH 2011.
- [13] ISO 20581: Luft am Arbeitsplatz – Allgemeine Leistungsanforderungen an Verfahren zur Messung chemischer Arbeitsstoffe (11/2016). Berlin: Beuth 2016.



Dr. rer. sec. Cornelia Wippich,

Dr. rer. nat. Jörg Rissler,  
Jana Dospil M.Sc.,  
Dipl. Chem. Katrin Pitzke  
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen  
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.