

Auswahl und Anwendung nichtmesstechnischer Methoden zur Ermittlung und Beurteilung der inhalativen Exposition

R. Beisser, L. Anhäuser, M. Arnone, R. Hebisch, D. Koppisch, U. Schlüter, G. Weber

ZUSAMMENFASSUNG Zur Ermittlung und Beurteilung der inhalativen Exposition können messtechnische und nichtmesstechnische Methoden eingesetzt werden. Messtechnische Ermittlungsmethoden können anhand einer einheitlichen Vorgehensweise beurteilt werden. Dem gegenüber existieren für nichtmesstechnische Ermittlungsmethoden (NME) bisher bis auf wenige Ausnahmen keine vergleichbaren Kriterien zu deren Beurteilung. Diese Veröffentlichung soll Ansätze liefern, um die Lücke zu schließen. Dazu werden Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter, die Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze, Risiko-Matrix-Ansätze (Control-Banding-Tools) und Expositionsmodelle näher betrachtet. Für jede dieser NME werden Qualitätskriterien beschrieben, die bei der Auswahl und Nutzung unterstützen sollen. Darüber hinaus werden personelle Anforderungen für eine sachgerechte Anwendung der NME dargestellt.

Selection and application of non-measuring identification methods for the determination and assessment of inhalation exposure

ABSTRACT Measuring identification methods and non-measuring identification methods can be used to determine and assess inhalation exposure. Measuring identification methods are assessed consistently based on a uniform procedure. By contrast, with a few exceptions, there are no similar criteria for assessing non-measuring identification methods. This publication aims to provide approaches to close the gap. For this purpose, we looked in more detail at standardised work procedures, assistance from third parties, the transfer of results of workplace measurements to other workplaces, control banding tools, and exposure models. For each of these non-measuring identification methods, we described quality criteria to help the user select and apply a method. We also present personal requirements for the proper application of these non-measuring identification methods.

1 Einleitung

Arbeitgebende haben fachkundig auf der Grundlage der Gefahrstoffverordnung [1] in Verbindung mit der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 400 eine Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen durchzuführen [2]. Die TRGS 400 enthält die organisatorischen und grundsätzlichen Anforderungen und beschreibt die Vorgehensweise zur Informationsvermittlung, Beurteilung der Exposition und Festlegung von Schutzmaßnahmen.

Die Ermittlung und Beurteilung der inhalativen Exposition wird in der TRGS 402 konkretisiert und kann sowohl mit messtechnischen als auch nichtmesstechnischen Methoden erfolgen [3]. Welche Vorgehensweise dabei zur Anwendung kommt, ist fachkundig zu entscheiden. Ziel ist es, auf der Grundlage einer für einen Arbeitsplatz oder eine Tätigkeit repräsentativ ermittelten Exposition eine Aussage zur Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen zu treffen, um einen Befund „Schutzmaßnahmen ausreichend“ ableiten zu können (**Bild 1**) und letztlich die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten zu gewährleisten. Auf die ebenso erforderliche Beurteilung der dermalen Exposition sowie von Brand- und Explosionsgefahren wird in dieser Publikation nicht weiter eingegangen.

Für die messtechnischen Ermittlungsmethoden gibt es auf der Grundlage der Norm DIN EN 482 [4] gut definierte und allgemein anerkannte Qualitätskriterien, die für die Anwendbarkeit aller Messverfahren bei Arbeitsplatzmessungen entscheidend sind. Im Gegensatz dazu existieren für nichtmesstechnische Ermittlungsmethoden (NME) bisher mit wenigen Ausnahmen [5] lediglich Empfehlungen für Qualitätskriterien von Expositionsmodellen [6; 7]. Für andere NME gelten also grundsätzlich keine allgemein gültigen oder gar normativ vereinbarten Qualitätskriterien. Dies kann für die Anwender derartiger Ermittlungsmethoden erhöhte Anforderungen bei der Auswahl einer geeigneten Ermittlungsmethode bedeuten.

NME sollten grundsätzlich auf Ergebnissen von Arbeitsplatzmessungen oder vergleichbaren Messungen beruhen [3]. Ebenso wäre eine Validierung der Methoden anhand von Messdaten wünschenswert, die unabhängig von den zur Entwicklung herangezogenen Messungen sind.

Die nachfolgenden Kapitel liefern eine Übersicht über die in Deutschland für die Gefährdungsbeurteilung der inhalativen Exposition verbreiteten NME. Dazu gehören Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter, die Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze (sowohl im selben als auch in einem anderen Betrieb), Ri-



Bild 1 Schema zur Beurteilung der inhalativen Gefährdung. Grafik: Autoren

siko-Matrix-Ansätze (Control-Banding-Tools) und Expositionsmodelle. Hierbei wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

Im Einzelnen werden die verschiedenen NME und ihre Anforderungen beschrieben. Für die Anwender und Anwenderinnen soll damit deutlich werden, bei welchen Methoden über die TRGS 400 hinausgehende Kenntnisse notwendig sind. Dabei wird auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede eingegangen. Ebenso wird auf die Grenzen bei der Anwendbarkeit der verschiedenen NME hingewiesen. Größeren Raum nimmt die Beurteilung von Validität und Zuverlässigkeit der Methoden und von deren Ergebnissen ein. Erforderlichenfalls wird auf das Zusammenspiel der nichtmesstechnischen mit messtechnischen Ermittlungsmethoden hingewiesen, um die Beurteilung der inhalativen Exposition sachgerecht durchführen und geeignete Schutzmaßnahmen für die Beschäftigten ableiten und begründen zu können.

2 Übersicht über NME

2.1 Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter

Unter Handlungsempfehlungen und Hilfestellungen Dritter versteht man öffentlich zugängliche Dokumente, die auf der Grundlage von Arbeitsplatzmessungen oder vergleichbaren Messungen Empfehlungen für die sichere Durchführung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen liefern. Die als Grundlage dienenden Messungen müssen entsprechend TRGS 402 [3] durchgeführt worden sein und vom Umfang her, d. h. der Anzahl der Messungen und der zugrunde liegenden Betriebe und Arbeitsbereiche, den Anforderungen der TRGS 420 [5] genügen.

Beispiele für derartige Handlungsempfehlungen und Hilfestellungen Dritter sind:

- Verfahrens- und stoffspezifische Kriterien (VSK) gemäß TRGS 420 [5],
- Empfehlungen Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (EGU) [8],
- Handlungsanleitungen zur guten Arbeitspraxis (unter Federführung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und von Ländermessstellen, gemeinsam mit Berufsgenossenschaften und Branchenverbänden) [9],
- Expositionsbeschreibungen (der Unfallversicherungsträger, UVT) [10 bis 12].

2.2 Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze

In der Regel sollten zur Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze Messungen nach TRGS 402 verwendet werden. Daneben können auch weitere Messergebnisse, die zur Bewertung von Arbeitsplätzen geeignet sind, z. B. von ausländischen Betrieben, herangezogen werden. Die zugrunde liegenden Messverfahren müssen ebenso die Anforderungen nach DIN EN 482 erfüllen. Messergebnisse von vergleichbaren Arbeitsplätzen können aus demselben oder einem anderen Betrieb, entsprechenden Datenbanken oder Expositionsbeschreibungen in der Fachliteratur stammen (z. B. Veröffentlichungen aus der Expositionsdatenbank „Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz“ (MEGA) [13].

Liegen Messergebnisse von Arbeitsplätzen unter ungünstigen Bedingungen (Reasonable Worst Case) vor, können diese ebenso für die Expositionsbeurteilung verwendet werden.

Wenn keine Arbeitsplatzmessungen für den vorhandenen Gefahrstoff vorliegen, kann die Exposition anhand von Analogieschlüssen unter Zuhilfenahme von Messdaten für andere Gefahrstoffe abgeschätzt werden [14].

2.3 Control-Banding-Tools (Risiko-Matrix-Ansätze)

Control-Banding-Tools helfen besonders kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) bei der Bewertung der Expositionen am Arbeitsplatz. Allen Tools ist gemeinsam, dass mit wenigen Einstiegsparametern (Einstiegsbänder) ein Band für die Höhe der Gefährdung der Beschäftigten zugeordnet wird. Die Einstiegsbänder berücksichtigen die intrinsische Gefährlichkeit des Gefahrstoffes und die Expositionshöhe während der Tätigkeit. Über den Einstiegsparameter Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) oder CLP-Einstufung (CLP: Classification, Labelling, Packaging) erfolgt eine Kategorisierung der gefährlichen Eigenschaften der freigesetzten Stoffe (Gefährlichkeitsband). Die zu erwartende Expositionshöhe (Expositionsband) wird über die verwendete Gefahrstoffmenge und die physikalisch-chemischen Eigenschaften (Dampfdruck, Siedepunkt, Staubungsverhalten) bestimmt. Außerdem werden bei einigen Control-Banding-Tools die konkrete Tätigkeit und die zugehörigen Randbedingungen mit einbezogen.

Als Ergebnis erhält man in der Regel Aussagen zu hohen, mittleren und niedrigen Gefährdungen. Für die Darstellung der Aussagen zur Höhe der Gefährdung wird ein Ampelmodell verwendet, das mit einem abgestuften Maßnahmenkonzept verknüpft sein kann (**Bild 2**).

In der TRGS 400 werden das Einfache Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe (EMKG) [15] und der GESTIS-Stoffenmanager® (GESTIS: Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [16]) als Control-Banding-Tools genannt. Im Folgenden werden deshalb diese beiden Tools kurz beschrieben.

2.3.1 EMKG

Der Einstieg ins EMKG erfolgt nach Umsetzung der Mindeststandards, wie sie z. B. in den Schutzleitfäden der Reihe 100 [15] beschrieben sind. Damit sind die Grundanforderungen an eine gute Arbeitspraxis und Hygiene im Arbeitsbereich etabliert. Sie sind die Voraussetzung für weitere zusätzliche Schutzmaßnahmen bei erhöhter Gefährdung. Der Bedarf wird im nächsten Schritt der Gefährdungsbewertung bestimmt. Hierzu nutzt das EMKG leicht zugängliche Parameter aus den Sicherheitsdatenblättern, Angaben zum Arbeitsplatz und zu den konkreten Tätigkeiten.

Das EMKG kombiniert die durch die Kategorisierung erhaltene Gefährlichkeitsgruppe mit der aus der Mengen- und Freisetzungsguppe resultierenden Expositionshöhe zu einer von drei Maßnahmenstufen. Diese werden durch die Schutzleitfäden der Reihe 200 und 300 konkretisiert, wobei darüber hinausgehende „hohe Gefährdungen“ zu der Maßnahmenstufe „Beratung“ [17] führen.

2.3.2 Priorisierungsansatz in Stoffenmanager®

Der Priorisierungsansatz in Stoffenmanager® ermittelt eine Gefährlichkeitskategorie aus der Einstufung nach CLP-Verordnung [18; 19]. Zur Ermittlung der Expositionskategorie nutzt Stoffenmanager® den Emissionsquelle-Empfänger-Ansatz (Source-Receptor) von *Cherrie* und *Schneider* [20]. Bei diesem Ansatz werden die wichtigsten expositionsbestimmenden Faktoren in Kategorien eingeteilt und in einem „Scoring“-System zu einer Gesamtbewertung verrechnet [21 bis 23].

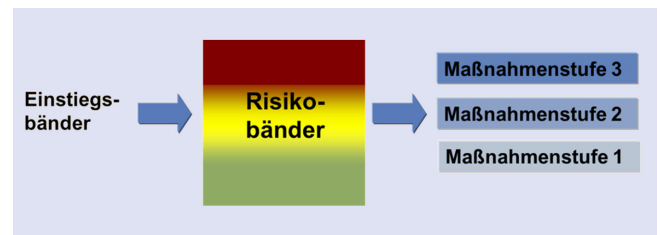


Bild 2 Grundstruktur von Risiko-Matrix-Ansätzen. Grafik: Autoren

Zur Priorisierung wird die Gefährlichkeitskategorie mit der Expositionskategorie zu einer Gefährdungskategorie oder Prioritätsstufe verknüpft [23]. Hierbei bedeutet die Kategorie I die erste Priorität, Expositionskontrollmaßnahmen an diesen Arbeitsplätzen einzuführen. Kategorie II entspricht der zweiten Priorität für die Umsetzung von Kontrollmaßnahmen. Die Kategorie III hat die geringste Priorität und wird für die weniger gefährlichen Gefahrstoffe bei geringer Expositionshöhe ermittelt.

2.4 Expositionsmodelle

Die im Folgenden vorgestellten Modellierungsansätze schätzen entweder die Expositionshöhe aufgrund von expositionsbestimmenden Faktoren ab (Modifying-Factor-Modelle) oder sind deterministische physikalisch-chemische Modelle.

Modifying-Factor-Modelle basieren auf einem Modellierungsansatz, der 1999 von *Cherrie* und *Schneider* veröffentlicht wurde [20]. Diese Modelle verwenden eine Reihe von multiplikativen Faktoren für die wichtigsten expositionsbestimmenden Größen, einschließlich der Quelle. Die Höhe der einzelnen Werte der multiplikativen Faktoren wurden auf der Grundlage von Daten aus der Literatur sowie physikalisch-chemischer Gesetzmäßigkeiten abgeleitet. Aus der Multiplikation der Faktoren wird ein Score berechnet, der dann unter Verwendung empirischer Kalibrierungsdaten aus Expositionsmessungen in eine Konzentration umgerechnet wird.

Auf Massenbilanzen basierende Expositionsmodellansätze beruhen auf physikalischen Gesetzen wie dem Gesetz der Erhaltung der Masse und weiteren physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten. Es steht eine Reihe von Modellen zur Verfügung, die von der unteren Stufe (Screening-Ebene: Tier 1) bis zur oberen Stufe (verfeinerte Schätzungen: Tier 2) reichen [24]. Die Quellenstärke der Emission ist einer der wichtigsten Parameter bei massenbilanzbasierten Expositionsmodellen. Messungen der Quellenstärke sind dann erforderlich, wenn diese nicht mithilfe physikalisch-chemischer Gesetzmäßigkeiten oder anderweitig bestimmt werden kann (z. B. bei Aerosolen).

Neben den im Folgenden beschriebenen Tools gibt es noch weitere Modelle, die aber in der Regel für die Gefährdungsbeurteilung nicht verwendet werden.

2.4.1 Quantitatives Expositionsmodell in Stoffenmanager®

Stoffenmanager® nutzt den Emissionsquelle-Empfänger-Ansatz von *Cherrie* und *Schneider*, um eine Expositionskategorie zu ermitteln [20]. Bei diesem Ansatz werden die wichtigsten expositionsbestimmenden Faktoren in Kategorien eingeteilt und in einem „Scoring“-System zu einer Gesamtbewertung verrechnet [21; 22; 25]. Dieser Score wird unter Anwendung von Regressionsgleichungen vom Modell in die Exposition in mg/m³

umgerechnet. Die Regressionsgleichungen wurden aus mehreren hundert Expositionsmessungen ermittelt.

2.4.2 Advanced REACH Tool (ART)

Das ART in Version 1.5 enthält ein mechanistisches Modell zur Abschätzung der inhalativen Exposition [26 bis 28] und eine statistische Funktion zur Aktualisierung der Schätzungen mit Messungen, die aus einer implementierten Expositionsdatenbank oder den eigenen Daten des Benutzers ausgewählt werden können [29; 30]. Diese Kombination von Modellschätzungen und Daten führt zu verfeinerten Expositionsschätzungen und einer geringeren Unsicherheit.

3 Kriterien für eine Validitätsbeurteilung von NME

Da es sich bei den hier beschriebenen NME um unterschiedliche Ansätze handelt, ist eine einheitliche Vorgehensweise zur Validitätsbeurteilung schwierig umzusetzen. Folgende Kriterien können auf alle Methoden angewendet werden:

- **Anerkennung durch Gremien**

Die Anerkennung der NME sollte durch nationale oder internationale Gremien erfolgen, die auf dem Gebiet Arbeitsschutz gegenüber Gefahrstoffen tätig sind. Hierunter fallen insbesondere der Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Gremien der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV, z. B. Projektgruppe EGU) und der Länder (z. B. Arbeitskreis der Ländermessenstellen für chemischen Arbeitsschutz, ALMA). Auch die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) beschäftigt sich im Rahmen des europäischen Chemikalienrechtes mit NME [31].

- **Beschreibung der Anwendbarkeit und der Grenzen**

Für die NME muss beschrieben sein, für welche Arbeitsplätze und Tätigkeiten sie anwendbar ist. Dies beinhaltet auch eine Darstellung der relevanten Parameter und von deren Geltungsbereichen. Darüber hinaus ist es auch erforderlich, Grenzen der Parameter sowie z. B. Arbeitsplätze und Tätigkeiten, für die diese Methode nicht anwendbar ist, konkret zu benennen.

- **Benutzerfreundlichkeit (Usability)**

Eine NME ist benutzerfreundlich, wenn sie es ermöglicht, den Befund zur Beurteilung der inhalativen Exposition einfach und zuverlässig zu ermitteln. Hierzu gehört unter anderem, dass die erforderlichen Parameter aus allgemein verfügbaren Quellen oder durch einfache messtechnische Ermittlung (z. B. Temperatur und Druck) zugänglich sein müssen. Die Nutzung der NME sollte durch eine geeignete Beschreibung der Vorgehensweise und ggf. Schulungen unterstützt werden. Es sollte schon bei der Entwicklung von NME auf eine intuitive Benutzerführung geachtet werden.

- **Unterstützung bei der Befundermittlung**

Die Anwendung der NME muss mit einem Ergebnis enden, das die Beurteilung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen zur Ableitung eines eindeutigen Befundes zur inhalativen Exposition zulässt. Ebenfalls sollte die NME Hinweise zur regelmäßigen Überprüfung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen im Rahmen der Befundsicherung geben.

- **Plausibilität der Methode und des erzielten Ergebnisses**

Gemäß TRGS 402 sollte die NME auf einer ausreichenden Anzahl repräsentativer Arbeitsplatzmessungen unter Verwendung validierter Messverfahren beruhen. In der Beschreibung zur

NME muss für die untersuchten Arbeitsplätze und Tätigkeiten erklärt werden, wie diese Methode ausgehend von den Eingangsparametern (z. B. definierte Randbedingungen, Modellparameter) das Ermittlungsergebnis ableitet. Das Ergebnis muss nachvollziehbar und zuverlässig sein.

Im Folgenden wird die Erfüllung dieser Anforderungen für die einzelnen Methoden näher beschrieben.

3.1 Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter

Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter werden auf der Grundlage des Technischen Regelwerks mittels repräsentativer Arbeitsplatzmessungen ausreichenden Umfangs für die zu beurteilenden Arbeitsbereiche und Tätigkeiten erstellt. Anschließend werden sie von anerkannten Gremien nach eingehender Prüfung in einem in der Regel mehrstufigen Verfahren verabschiedet.

Der Anwendungsbereich sowie die zu treffenden Schutzmaßnahmen müssen für die zu beurteilenden Tätigkeiten mit Gefahrstoffen klar definiert, detailliert beschrieben und aktuell sein. Die als Grundlage dienenden repräsentativen Arbeitsplatzmessungen müssen die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen belegen und auf validierten Messverfahren beruhen. Als sinnvoll wird angesehen, dass die Arbeitsplatzmessungen zum Zeitpunkt der Erstellung der Handlungsempfehlungen und Hilfestellungen Dritter nicht älter als zehn Jahre sind. Des Weiteren müssen die expositionsbestimmenden Faktoren ausreichend dokumentiert sein. Ebenso müssen die Arbeitsbereiche oder Tätigkeiten aufgeführt werden, für die die Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter gelten sollen bzw. für welche Arbeitsbereiche oder Tätigkeiten diese explizit nicht anwendbar sind. Dies kann einzelne Tätigkeiten, aber auch Betriebe oder Branchen betreffen.

Neben der Ableitung eines Befundes gemäß TRGS 402 und der regelmäßigen Überprüfung durch die verabschiedenden Gremien oder Institutionen auf Aktualität und Konformität mit dem Technischen Regelwerk ist die Benutzerfreundlichkeit zu gewährleisten. Als zusätzliche Unterstützung kann sich dabei eine Checkliste auf der Grundlage der zu erfüllenden Bedingungen als hilfreich erweisen. Handlungsempfehlungen und Hilfestellungen Dritter müssen zur Expositionsbeurteilung eine Aussage zur Höhe der Exposition liefern, die dann bei Erfüllung der vorgegebenen Randbedingungen in die Gefährdungsbeurteilung übernommen werden kann.

3.2 Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze

Arbeitsplatzmessungen können auf andere Arbeitsplätze übertragen werden oder für Analogieschlüsse verwendet werden, sofern die Tätigkeiten und Expositionsbedingungen vergleichbar sind. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise stoffspezifische Faktoren, Gefahrstoffquellen und auch technische Angaben dem zu beurteilenden Arbeitsplatz entsprechen. Nähere Hinweise gibt die TRGS 402. Zusätzlich muss bei Analogieschlüssen beachtet werden, dass die betrachteten Stoffe vergleichbare physikalisch-chemische Eigenschaften besitzen. Diese Vorgehensweise ist insbesondere innerhalb desselben Betriebes oder eines konkreten Unternehmens möglich. Die Übertragung auf andere Betriebe/Unternehmen ist eher die Ausnahme. Ein mögliches Konzept zur Vorgehensweise hierfür wurde von *Franken* et al. beschrie-

ben [14]. Als Grundlage muss eine ausreichende Zahl repräsentativer Messungen vorliegen, die auf der TRGS 402 unter Verwendung validierter Messverfahren beruhen und aktuell (möglichst nicht älter als zehn Jahre) sein sollten.

3.3 Control-Banding-Tools

Die Control-Banding-Ansätze im EMKG und im Stoffenmanager® basieren auf Anhang 2 der nicht verbindlichen praktischen Leitlinie zur Richtlinie 98/24/EG [32], dem Internationalen Chemikalienkontroll-Toolkit (ICCT) der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO) [33] und auf der britischen Handlungshilfe, den COSHH Essentials [34]. In der TRGS 400 werden das EMKG und GESTIS-Stoffenmanager® als Control-Banding-Tools aufgeführt. Die europäische Chemikalienagentur ECHA nennt in ihren REACH-Leitlinien Stoffenmanager® ebenfalls als Tool zur Expositionsermittlung bei der Erstellung von Expositionsszenarien [31].

Die hier beschriebenen Control-Banding-Tools EMKG und Stoffenmanager® sind anwendbar für die Festlegung von Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten mit festen und flüssigen Gefahrstoffen. Sowohl EMKG als auch Stoffenmanager® sind nicht oder nur eingeschränkt für Gase anwendbar.

3.3.1 EMKG

Die Vorgehensweise des EMKG und seine Anwendungsgrenzen sind im EMKG-Leitfaden [35] und in der EMKG-Software [36] ausführlich beschrieben. Sie sind die zentralen Bausteine und die Grundlage für die sachgerechte Anwendung des EMKG. Das Programm bietet zudem die Möglichkeit, Dokumente, z. B. Protokolle von Arbeitsplatzmessungen, Sicherheitsdatenblätter oder Dokumentationen von Betriebsbegehungen, in die Gefährdungsbeurteilung zu integrieren. Weitere Instrumente wie die EMKG-Drehscheiben oder die EMKG-App eignen sich für einen leichten Einstieg in das EMKG und zur schnellen Einschätzung der Gefährdung am Arbeitsplatz. Zur benutzerfreundlichen Gestaltung wurden anhand einer Analyse der Bedürfnisse von KMU didaktische Leitlinien [37] entwickelt. In den letzten Jahren wurden die EMKG-Produkte entsprechend angepasst und neue Verbreitungswege etabliert.

Bei der Anwendung des EMKG ist zur Befundung eine zusätzliche Prüfung, ob die Schutzmaßnahmen ausreichend sind, nicht erforderlich, wenn nur eine geringe oder vernachlässigbare Exposition zu erwarten ist. Das ist z. B. der Fall, wenn die Maßnahmen entsprechend den relevanten Schutzleitfäden umgesetzt sind und

- die Freisetzungsguppe und die Verarbeitungstemperatur niedrig sind,
- bei staubenden Gefahrstoffen mit niedriger Freisetzungsguppe ein Staubabrieb ausgeschlossen ist,
- kleine Mengen verwendet werden,
- die Tätigkeitsdauer kürzer als 240 Minuten pro Acht-Stunden-Schicht ist oder
- die verwendeten Schutzleitfäden durch Arbeitsplatzmessungen validiert sind. Validierte Schutzleitfäden gibt es für das Befüllen von Kanistern, Fässern und IBC-Containern mit Lösemitteln [38].

Kann der Befund anhand der oben genannten Kriterien nicht ermittelt werden, ist es für eine ausreichende Sicherheit erforder-

lich, die Gefährlichkeitsgruppe bei der Beurteilung eine Kategorie höher zu wählen (z. B. Gefährlichkeitsgruppe „C“ statt „B“). Alternativ kann der Nachweis der Grenzwerteinhaltung durch eine ergänzende Arbeitsplatzmessung erfolgen.

3.3.2 Priorisierungs-Ansatz in Stoffenmanager®

Die Benutzerfreundlichkeit des Online-Tools Stoffenmanager® wird von der Fa. Cosanta BV in Zusammenarbeit mit einem internationalen wissenschaftlichen Beratergremium (International scientific advisory board, ISAB) kontinuierlich überprüft und an die aktuellen Standards für solche Anwendungen angepasst. Auch Anregungen der Nutzer zur Verbesserung der Bedienbarkeit des Tools werden, wenn möglich, programmtechnisch umgesetzt. Zur Unterstützung der Nutzerinnen und Nutzer gibt es ein Helpdesk sowie zahlreiche Schulungen und Online-Trainings.

Für eine Befundermittlung im Rahmen der inhalativen Expositionsermittlung ist der Control-Banding-Ansatz im Stoffenmanager® nicht geeignet. Er dient ausschließlich zur Priorisierung der Gefährdung bei inhalativer Exposition. Die Grenzwerteinhaltung muss entweder durch eine nichtmesstechnische Ermittlung mit dem quantitativen Expositionsmodell im Stoffenmanager® oder mit anderen messtechnischen oder nichtmesstechnischen Methoden nach TRGS 402 überprüft werden.

Die für das Hazard-Banding in Stoffenmanager® genutzten Prinzipien und Zuordnungen der Gefährlichkeitskategorien wurden 2015 von *Arnone et al.* publiziert [18]. Die Validierung des Expositionsmodells basiert auf denselben Studienergebnissen wie sie für Stoffenmanager® unter Abschnitt 3.4 beschrieben sind.

3.4 Expositionsmodelle

Trotz der umfangreichen Erfahrungen von Expositionswissenschaftlern bei der Bewertung von Modellen und Werkzeugen, die in den letzten Jahren gesammelt wurden, ist bisher kein Standard definiert, der die Mindestanforderungen für die Modellvalidierung beschreibt. Es gibt auch keine unabhängige Institution, die die Gültigkeit oder regulatorische Akzeptanz von Expositionsmodellen bewertet. Eine Bewertung häufig verwendeter Expositionsmodelle wurde von *Spinazzè et al.* bezüglich des aktuellen Wissensstandes zu Genauigkeit und Robustheit der Modelle durchgeführt [39]. Bewertet wurden folgende Modelle:

- European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals Targeted Risk Assessment (ECETOC TRA),
- Estimation and assessment of substance exposure for metals (MEASE),
- EMKG-Expo-Tool,
- Stoffenmanager®,
- ART.

Die Liste umfasst sowohl Tier-1-Modelle als auch „Higher Tier Models“. Tier-1-Modelle für die Expositionsbeurteilung sind in der Regel einfach aufgebaut, breit anwendbar und kommen mit der Eingabe weniger Parameter aus, um mit geringem Aufwand Expositionssituationen am Arbeitsplatz mit einem Gesundheitsrisiko zu identifizieren. „Higher Tier Models“ sind komplexere und detailliertere Modelle für die Expositionsbeurteilung. Sie verlangen oft vom Benutzer ein umfassenderes Verständnis der Expositionssituation und deren Determinanten.

Tischer et al. beschrieben 2017 einen umfassenden Ansatz zur Modellvalidierung, der beim internationalen Modellvalidierungs-

projekt Evaluation of Tier One Exposure Assessment Models (ETEAM) angewendet wurde [6]. Er umfasst nicht nur einen Vergleich mit Messwerten, meist als externe Validierung bezeichnet, sondern auch eine konzeptionelle und operationale Analyse sowie die Untersuchung der „Between-User“-Variabilität. Alle vier Aspekte werden im Folgenden kurz beschrieben.

3.4.1 Konzeptionelle Analyse

Zur Bewertung des Konzepts und der Theorie des Modellhintergrunds, d. h. der Prinzipien und Methoden, die zur Ableitung der Modellgleichungen verwendet werden, werden diese untersucht. Diese Informationen sollten für jedes Modell gut dokumentiert und öffentlich zugänglich sein. Außerdem müssen die Modellentwickler den Anwendungsbereich des Modells und die Grenzen und Beschränkungen des Modells klar beschreiben. Ein solches Vorgehen wurde von Hesse et al. [40] genutzt.

3.4.2 Externe Validierung

Ob die Ergebnisse eines Modells ausreichend genau und präzise sind, lässt sich durch den Vergleich der Schätzungen des Tools mit einem unabhängigen Satz von Arbeitsplatzmessungen [41 bis 44] beantworten, die idealerweise ein breites Spektrum von Expositionsszenarien und Stoffen abdecken. Für diese Aufgabe werden Messdaten von guter Qualität benötigt, für die alle relevanten Variablen (unter anderem Arbeitsplatzbeschreibung, Probenamprotokoll und Messmethode) dokumentiert sind. Für die Bewertung werden verschiedene statistische Parameter verwendet. Bei der Auswahl eines bestimmten Satzes von statistischen Parametern ist es wichtig, Parameter einzubeziehen, die die hohe Variabilität der Exposition im beruflichen Umfeld berücksichtigen.

Zur externen Validierung kann gelegentlich auch der Vergleich von Ergebnissen verschiedener Modelle herangezogen werden. Ein solcher Ansatz wurde z. B. von Savic et al. [45] gewählt. In dieser Studie wurden die Ergebnisse von drei regelmäßig genutzten Expositionsabschätzungsmodellen für den Arbeitsplatz (ART, Stoffenmanager® und ECETOC TRA) miteinander verglichen. Die Ergebnisse der Anwendung müssen kritisch betrachtet werden, da die drei genannten Modelle unterschiedliche Ansprüche verfolgen.

In der Literatur finden sich eine ganze Reihe von Kriterien wie Korrelationskoeffizienten (*Pearson* oder *Spearman*) [25; 42; 44], Verhältnis von modellierten und gemessenen Expositionen (Einzelwerte, Mittelwerte oder Median) [46], Bias (mittlere Differenz zwischen der geschätzten und der gemessenen Exposition) [25], Überlappung der Intervalle zwischen dem 25. und dem 75. Perzentil von Schätzung und Messung [47] sowie der Prozentsatz der Messungen, die das geschätzte Perzentil überschreiten [25; 42; 44]. Meist werden keine Gütemaßstäbe für diese Kriterien angegeben. Eine Ausnahme bilden van Tongeren et al. 2017 [42], die für die Konservativität eines Modells folgende Einteilung vorschlagen:

- Hoch: höchstens 10 % der Messwerte größer als modellierter Wert
- Mittel: 10 bis 25 % der Messwerte größer als modellierter Wert
- Niedrig: mehr als 25 % der Messwerte größer als modellierter Wert

Korrelationskoeffizienten (r) werden oft grob eingeteilt in [25; 42; 44]:

- Niedrig: der Korrelationskoeffizient beträgt höchstens 0,3
- Moderat: der Korrelationskoeffizient liegt zwischen 0,3 und 0,7
- Hoch, gut, stark: der Korrelationskoeffizient liegt zwischen 0,7 und 0,9
- Sehr gut: der Korrelationskoeffizient ist größer als 0,9

Selten findet sich eine Bewertung für das Verhältnis von modellierten und gemessenen Expositionen [46]:

- Gut: das Verhältnis zwischen modelliertem Wert und Messwert liegt zwischen 0,5 und 2
- Akzeptabel: das Verhältnis zwischen modelliertem Wert und Messwert liegt zwischen 0,1 und 10.

3.4.3 Operationale Analyse

Die Benutzerfreundlichkeit eines Instruments wird meist in Interviews, Fragebögen oder Workshops bewertet. In strukturierter Form können auch Methoden des Usability-Tests oder der Usability-Inspektion eingesetzt werden. Dieser Teil einer Validierung wird aber eher selten durchgeführt [48].

3.4.4 „Between-User“-Variabilität

Die Variabilität zwischen unterschiedlichen Nutzenden kann bewertet werden, indem man eine Gruppe von Nutzenden bittet, unabhängig voneinander eine Reihe von Expositionsszenarien zu bewerten. Dabei erhalten alle für jedes Expositionsszenario die gleiche Beschreibung von Arbeitsplätzen und müssen diese beurteilen. Im Anschluss werden dann die individuellen Ergebnisse verglichen [43; 49; 50].

4 Personelle Anforderungen an die Anwender

Die personellen Anforderungen an die hier vorgestellten NME unterscheiden sich in einigen Punkten (vgl. **Tabelle 1**). Allen gemeinsam ist jedoch, dass neben der Fachkunde zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung regelmäßig Weiterbildungen erfolgen sollten. Daneben sollten Erfahrungen bezüglich der zu beurteilenden Arbeitsbereiche und Tätigkeiten vorliegen. Umfang und Tiefe der notwendigen Kenntnisse sind abhängig von der Branche, dem Betrieb und der Tätigkeit.

Zur Weiterbildung wird eine regelmäßige Schulung zur Anwendung der entsprechenden NME empfohlen. Des Weiteren müssen laut TRGS 402 die Erhebung der Randbedingungen und die Beurteilung eines Arbeitsplatzes in einer Person vereint sein. Die Erhebung der Randbedingungen hat vor Ort zu erfolgen und ist zu dokumentieren.

Handlungsempfehlungen, Hilfestellungen Dritter und Control-Banding-Tools bieten einen einfachen Einstieg in die Gefährdungsbeurteilung. Hierbei sowie bei der Übertragung von Ergebnissen von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze sind Kenntnisse der statistischen Auswertung von Messungen für Arbeitsplatzkollektive hilfreich. Erfordert die Wirk-

Tabelle 1 Personelle Anforderungen für die Anwendung von NME.

	Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter	Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze	Control-Banding-Tools	Expositionsmodelle	
Beispiele	VSK, EGU, Branchenregeln, Handlungsanleitungen zur guten Arbeitspraxis		Stoffenmanager ^{®*} , EMKG	ART, Stoffenmanager ^{®**}	Deterministische Modelle
Kenntnis der zu beurteilenden Arbeitsplätze und Tätigkeiten	✓	✓	✓	✓	✓
Kenntnis der erforderlichen Schutzmaßnahmen	✓	✓	✓	✓	✓
Kenntnisse der GefStoffV und des techn. Regelwerks, insbesondere der TRGS 400	✓	✓	✓	✓	✓
Kenntnisse zur Ermittlung und Beurteilung der inhalativen Exposition	(✓)	✓	(✓)	✓	✓
Kenntnisse zur Interpretation statistischer Parameter	(✓)	(✓)	-	✓	✓
Kenntnisse zum statistischen Hintergrund der NME	(✓)	(✓)	-	(✓)	(✓)
Spezielle mathematische Kenntnisse (Regressionsmodelle, Differentialgleichungen u. ä.)	-	-	-	-	✓
Anwendungsschulungen der jeweiligen NME	-	-	(✓)	(✓)	(✓)

* Priorisierungsansatz in Stoffenmanager[®]

** Quantitatives Expositionsmodell in Stoffenmanager[®]

- Nicht erforderlich

✓ Erforderlich

(✓) Empfohlen

samkeitsüberprüfung eine zusätzliche Arbeitsplatzmessung, sind die Anforderungen an die Fachkunde gemäß TRGS 402 zu beachten.

Für die Anwendung von Expositionsmodellen sind im Vergleich zu den oben erwähnten NME Kenntnisse zur Interpretation statistischer Parameter erforderlich. Neben diesen Kenntnissen sind bei der Anwendung deterministischer Modelle mathematische Kenntnisse zu Regressionsmodellen und Differentialgleichungen erforderlich.

Auch Unternehmer aus KMU sind mit einer entsprechenden Einführung in Control-Banding-Tools in der Lage, diese zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung anzuwenden. In wenigen Schritten können sie einschätzen, an welcher Stelle zusätzliche Beratungsleistung erforderlich ist. Zur Einführung und Anwendung des Stoffenmanager[®] und EMKG bieten insbesondere das IFA bzw. die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) regelmäßige Fortbildungen an.

5 Hinweise für Anwendende und Zusammenfassung

Die Ermittlung der inhalativen Exposition gemäß TRGS 402 kann sowohl messtechnisch als auch nichtmesstechnisch erfolgen. Für messtechnische Verfahren existieren auf Grundlage der

DIN EN 482 gut definierte Qualitätskriterien, während dies für NME noch nicht umgesetzt werden konnte. Zu den in Deutschland verbreiteten NME gehören Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter, die Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze, Risikomatrix-Ansätze und Expositionsmodelle. Für die etablierten NME sind lediglich für VSK (TRGS 420) klare Qualitätskriterien und für Expositionsmodelle Empfehlungen für Qualitätskriterien abgeleitet worden.

Allgemein gültige Kriterien für alle NME, wie für die messtechnischen Verfahren, können nicht abgeleitet werden. Während beispielsweise Expositionsmodelle einen Konzentrationswert für eine Exposition ermitteln, werden bei VSK, EGU oder Handlungsanleitungen zur guten Arbeitspraxis Schutzmaßnahmen und der daraus resultierende Befund abgeleitet. Aus diesen unterschiedlichen Ansätzen ergeben sich nicht nur unterschiedliche Qualitätskriterien, sondern – wie in Kapitel 4 gezeigt – auch unterschiedliche Anforderungen an den Anwender und die Anwenderin. Einige Kriterien gelten aber für alle NME, beispielsweise die Plausibilität oder die Beschreibung der Anwendbarkeit und der Grenzen der Methode.

Führt die NME nicht zu plausiblen und eindeutigen Ergebnissen, sollte die Einhaltung des Beurteilungsmaßstabes durch eine Arbeitsplatzmessung überprüft werden.

Alle Methoden müssen regelmäßig auf ihre Anwendbarkeit (Veränderungen von Arbeitsbedingungen und Verfahren) und die Gültigkeit der Beurteilungsmaßstäbe und Expositionshöhen überprüft werden. Gegebenenfalls ist eine Überarbeitung nötig oder die Methode kann nicht mehr angewendet werden. Bei der Anwendung einer NME und deren Übertragung auf die konkrete Arbeitsplatzsituation ist die Verwendung von Checklisten zu empfehlen. Diese sollten die durchgeführten Tätigkeiten, die eingesetzten und/oder freiwerdenden Gefahrstoffe (Art, Menge, Durchsatz) und ihre Beurteilungsmaßstäbe sowie die Schutzmaßnahmen beinhalten. Nach Anwendung der NME muss das Ermittlungsergebnis zur inhalativen Exposition so dokumentiert werden, dass alle erforderlichen Eingangsparameter sowie der Befund enthalten sind. Insbesondere müssen die expositionsbestimmenden Faktoren ausreichend dokumentiert sein. Dies sollte durch die NME unterstützt werden.

5.1 Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter

Wenn die Kriterien gemäß den ausgewählten Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter erfüllt werden, kann das Ergebnis zur Beurteilung der Exposition auf den konkreten Arbeitsplatz bzw. die Tätigkeit direkt übertragen werden. Dieses Ergebnis muss schriftlich im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung der inhalativen Exposition dokumentiert und jährlich überprüft werden. Die Überprüfung umfasst auch die Gültigkeit der angewendeten Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter.

5.2 Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze

Für die Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze gilt sinngemäß das Gleiche wie für die Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter. Die als Grundlage für die Übertragung der Ergebnisse dienenden Arbeitsplätze müssen dabei explizit aufgeführt werden. Ebenso müssen die diesbezüglichen Unterlagen (z. B. Messberichte) vorliegen und im Rahmen der Dokumentation nachvollziehbar referenziert werden.

5.3 Control-Banding-Tools (Risiko-Matrix-Ansätze)

Control-Banding-Tools dienen zur einfachen systematischen Expositionsermittlung und -beurteilung. Da die Ergebnisse anhand weniger, relativ grob gefasster Einstiegsparameter ermittelt werden, können der Befund „Schutzmaßnahmen nicht ausreichend“ und die Empfehlung weiterer Schutzmaßnahmen unter Umständen der zugrunde gelegten Konservativität der Ansätze geschuldet sein. Vor der Umsetzung möglicherweise unnötiger Schutzmaßnahmen sollte die Expositionssituation mit anderen messtechnischen oder nichtmesstechnischen Methoden nach TRGS 402 überprüft werden.

5.4 Expositionsmodelle

Von den in Abschnitt 3.4 genannten Modellen für die Expositionsbeurteilung sind das EMKG-Expo-Tool, MEASE und ECETOC TRA einfach aufgebaute, breit anwendbare Modelle, die mit der Eingabe weniger Parameter auskommen, um mit geringem Aufwand Expositionssituationen am Arbeitsplatz mit einem

Gesundheitsrisiko zu identifizieren. Die Zusammenfassung der Studien von Spinazzè et al. [39; 46] zeigt, dass die Leistung von ECETOC TRA bei verschiedenen Chemikalien unterschiedlich sein kann. Dadurch können Expositionsabschätzungen ungenaue und/oder falsch sichere Ergebnisse liefern. Das Modell wird als nicht ausreichend konservatives Tier-1-Modell in bestimmten Expositionssituationen (z. B. flüchtige Chemikalien) diskutiert. ECETOC TRA ist ein Modell, das für die Stoffsicherheitsbeurteilung entwickelt wurde und nicht für die Expositionsermittlung im Rahmen der inhalativen Gefährdungsbeurteilung vorgesehen ist. Das EMKG-EXPO-Tool und MEASE sind bisher nur in wenigen Studien evaluiert worden, die diese Modelle jedoch als ausreichend konservativ betrachten, wenngleich die Korrelation zwischen Messwert und Abschätzung für Tätigkeiten mit staubenden Stoffen bei MEASE und für Flüssigkeiten beim EMKG-Expo-Tool nicht gut ist [42]. Dies sollte bei der Anwendung der Modelle berücksichtigt werden.

Stoffenmanager® und ART sind komplexere und detailliertere Modelle für die Expositionsbeurteilung. Sie verlangen vom Benutzer ein umfassenderes Verständnis der Expositionssituation und von deren Determinanten. Stoffenmanager® wird als robustes Modell mit einer hohen Genauigkeit und hoher Korrelation in Spinazzè et al. zusammengefasst [39]. In Situationen mit geringer Exposition kann das Modell zu einer Überschätzung und in Situationen mit hoher Exposition zu einer Unterschätzung tendieren. Die Konservativität des Modells liegt dennoch im mittleren Bereich. Für gut dokumentierte Expositionssituationen zeigen modellierte Abschätzungen des Stoffenmanager® eine gute Übereinstimmung mit Messdaten. Die Modellbenutzung ist jedoch auch geeignet, wenn eine hohe Unsicherheit bei der Charakterisierung der Expositionssituation herrscht. Für ART wurden ähnliche Eigenschaften bezüglich der Über- und Unterschätzung bei geringer und hoher Exposition wie für Stoffenmanager® ermittelt. Bei korrekter Anwendung ist ART nach Meinung von Spinazzè et al. das genaueste und präziseste, aber auch anspruchsvollste der hier genannten Modelle mit einem mittleren Grad der Konservativität [39; 46].

Neben den zuvor genannten Expositionsmodellen, die die Expositionshöhe aufgrund von expositionsbestimmenden Faktoren abschätzen (Modifying-Factor-Modelle), besteht die Möglichkeit, deterministisch physikalisch-chemische Modelle heranzuziehen. Je nach individueller Arbeitsplatzsituation sind Ein-, Zwei- oder Mehrzonen-Modelle für die Expositionsabschätzung gas-, dampf- oder partikelförmiger Substanzen einsetzbar [51]. Sie basieren auf der Massenbilanzbildung in gut durchmischten Räumen und der geeigneten Wahl von Expositions-determinanten. Folglich erfordern sie vom Anwendenden ein umfassendes physikalisch-chemisches Verständnis. Aufgrund fehlender systematischer Evaluierungen und mangelnder Anwendungshilfen ist der praktische Einsatz deterministischer Modelle im Arbeitsschutz derzeit wenig verbreitet [51 bis 53].

Vor- und Nachteile von Modifying-Factor-Modellen einerseits und deterministisch physikalisch-chemischen Modellen andererseits werden kontrovers diskutiert [54]. Zurzeit werden beide Ansätze benötigt und haben daher ihre Berechtigung.

6 Ausblick

Im Gegensatz zu messtechnischen Verfahren gibt es für NME keine unabhängigen Beurteilungskriterien, die für alle NME an-

gewendet werden können. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich die NME hinsichtlich ihrer Einordnung in der Gefährdungsbeurteilung voneinander unterscheiden. So liefern z. B. Expositionsmodelle nur eine berechnete Expositionshöhe, während VSK die Beurteilung der inhalativen Gefährdungen einschließlich des Befundes liefern.

Für alle genannten Methoden wären weitere Entwicklungen von Unterstützungssystemen und eine Vereinheitlichung von Qualitätssicherungssystemen für die Benutzer von Vorteil. Einige Vorschläge, wie eine Weiterentwicklung von verschiedenen Interessenvertretern (Behörden, Industrie, Wissenschaft) vorangetrieben werden könnte, wurden von *Schlüter* und *Tischer* [55] entwickelt. Die Veröffentlichung von *Arnone* et al. [18] kann als Grundlage für die Vereinheitlichung des Hazard-Bandings in Risiko-Matrix-Ansätze dienen.

Ein möglicher Ansatz für eine unabhängige Validierung von NME müsste nach Meinung der Autoren weiterhin nach den Methoden unterscheiden. Für Handlungsempfehlungen oder Hilfestellungen Dritter sowie die Übertragung der Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen auf andere Arbeitsplätze können als Grundlage die TRGS 420 und TRGS 402 dienen. Es werden beispielsweise der Anwendungsbereich definiert, eine Aussage über die ausreichende Anzahl repräsentativer Messungen gemacht oder Beurteilungskriterien festgelegt. Die Veröffentlichungen von *Schlüter* et al. [54] und *Spinazzè* et al. [39] können als Informationsgrundlage für Expositionsmodelle herangezogen werden. Stärken und Schwächen von Modifying-Factor-Modellen und deterministisch physikalisch-chemischen Modellen werden hier aufgeführt. Außerdem wird zum aktuellen Wissensstand über die Zuverlässigkeit der Modelle berichtet.

Neben den Kriterien für die verschiedenen NME müssen Schulungsangebote entwickelt und ausgebaut sowie Vorgaben für die Weiterentwicklung und Qualitätssicherung der NME erarbeitet werden. Dies müsste dann durch eine unabhängige Institution geprüft und überwacht werden. ■

Literatur

- [1] Gefahrstoffverordnung (GefStoffV). BGBl. I (2010) Nr. 59, S. 1643-1692, zul. geänd. BGBl. I (2021), S. 3115 (2010).
- [2] Technische Regel für Gefahrstoffe: Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen (TRGS 400). GMBI. (2017) Nr. 36, S. 638.
- [3] Technische Regel für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). GMBI. (2016) Nr. 43, S. 843-846.
- [4] DIN EN 482-Arbeitsplatzatmosphäre – Allgemeine Anforderungen an Verfahren zur Messung von chemischen Arbeitsstoffen (2021).
- [5] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Verfahrens- und stoffspezifische Kriterien (VSK) für die Gefährdungsbeurteilung (TRGS 420). Ausg. Januar 2006. GMBI. (2014) Nr. 48, S. 997-1002; zul. geänd. GMBI. (2020) Nr. 9-10, S. 199.
- [6] *Tischer, M.; Lamb, J.; Hesse, S.; van Tongeren, M.*: Evaluation of Tier One Exposure Assessment Models (ETEAM): Project Overview and Methods. *Ann Work Expo Health* 61 (2017) Nr. 8, S. 911-920.
- [7] United States Environmental Protection Agency: Guidance for Quality Assurance Project Plans for Modeling (2002)
- [8] IFA Praxishilfen: Empfehlungen Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). [https://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/praxishilfen-gefahrstoffe/empfehlungen-gefaehrderungsermittlung-der-unfallversicherungstraeger-\(egu\)/index.jsp](https://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/praxishilfen-gefahrstoffe/empfehlungen-gefaehrderungsermittlung-der-unfallversicherungstraeger-(egu)/index.jsp)
- [9] Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen – Handlungshilfen und Checklisten für die sachgerechte Handhabung. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrstoffe/Arbeiten-mit-Gefahrstoffen/Handlungshilfen.html>
- [10] *Arnone, M.; Mattenklopp, M.; Pflaumbaum, W.; Smola, T.; Stamm, R.; Steinhausen, M.* et al.: Arbeitsbedingte Exposition gegenüber der einatembaren und der alveolengängigen Staubfraktion (IFA Report 6/2020). Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2020.
- [11] Expositionsbeschreibungen. Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft. <https://www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/verkehrsmittel/verkehrsmittel-gefahrstoffe/gisbau/expositionsbeschreibungen/>
- [12] Expositionsbeschreibungen. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM). <https://www.bgetem.de/reaktion/arbeits-sicherheit-gesundheitsschutz/dokumente-und-dateien/themen-von-a-z/verkehrsmittel-gefahrstoffe/expositionsbeschreibungen>
- [13] Expositionsdaten aus MEGA in Publikationen. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). <https://www.dguv.de/ifa/gestis/expositionsdatenbank-mega/expositionsdaten-aus-mega-in-publikationen/index.jsp> (abgerufen am 23.05.2022).
- [14] *Franken, R.; Shandilya, N.; Marquart, H.; McNally, K.; Fransman, W.*: Extrapolating the Applicability of Measurement Data on Worker Inhalation Exposure to Chemical Substances. *Ann Work Expo Health* 64 (2020) Nr. 3, S. 250-269.
- [15] Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe (EMKG). Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrstoffe/EMKG/Einfaches-Massnahmenkonzept-EMKG_node.html
- [16] GESTIS-Stoffenmanager®. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). <http://www.dguv.de/ifa/gestis-stoffenmanager>
- [17] Schutzleitfäden konkretisieren die EMKG Maßnahmenstufe. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrstoffe/EMKG/EMKG-Schutzleitfaeden.html>
- [18] *Arnone, M.; Koppisch, D.; Smola, T.; Gabriel, S.; Verbist, K.; Visser, R.*: Hazard banding in compliance with the new Globally Harmonised System (GHS) for use in control banding tools. *Regul Toxicol Pharmacol* 73 (2015) Nr. 1, S. 287-95.
- [19] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (CLP-Verordnung), 2008.
- [20] *Cherrie, J. W.; Schneider, T.*: Validation of a New Method for Structured Subjective Assessment of Past Concentrations. *Ann Occup Hyg* 43 (1999) Nr. 4, S. 235-245.
- [21] *Tielemans, E.; Schneider, T.; Goede, H.; Tischer, M.; Warren, N.; Kromhout, H.* et al.: Conceptual Model for Assessment of Inhalation Exposure: Defining Modifying Factors. *Ann Occup Hyg* 52 (2008) Nr. 7, S. 577-86.
- [22] *Marquart, H.; Schneider, T.; Goede, H.; Tischer, M.; Schinkel, J.; Warren, N.* et al.: Classification of Occupational Activities for Assessment of Inhalation Exposure. *Ann Occup Hyg* 55 (2011) Nr. 9, S. 989-1005.
- [23] *Marquart, H.; Heussen, H.; Le Feber, M.; Noy, D.; Tielemans, E.; Schinkel, J.* et al.: Stoffenmanager, a Web-Based Control Banding Tool using an Exposure Process Model. *Ann Occup Hyg* 52 (2008) Nr. 6, S. 429-41.
- [24] *Keil, C. B.*: A Tiered Approach to Deterministic Models for Indoor Air Exposures. *Appl Occup Environ Hyg* 15 (2000) Nr. 1, S. 145-51.
- [25] *Schinkel, J.; Fransman, W.; Heussen, H.; Kromhout, H.; Marquart, H.; Tielemans, E.*: Cross-validation and refinement of the Stoffenmanager as a first tier exposure assessment tool for REACH. *Occup Environ Med* 67 (2010) Nr. 2, S. 125-32.
- [26] *Schinkel, J.; Warren, N.; Fransman, W.; van Tongeren, M.; McDonnell, P.; Voogd, E.* et al.: Advanced REACH Tool (ART): Calibration of the mechanistic model. *J. Environ. Monit.* 13 (2011) Nr. 5, S. 1374-82.
- [27] *Fransman, W.; Van Tongeren, M.; Cherrie, J. W.; Tischer, M.; Schneider, T.; Schinkel, J.* et al.: Advanced Reach Tool (ART): development of the mechanistic model. *Ann Occup Hyg* 55 (2011) Nr. 9, S. 957-79.
- [28] *Tielemans, E.; Warren, N.; Fransman, W.; Van Tongeren, M.; McNally, K.; Tischer, M.* et al.: Advanced REACH Tool (ART): overview of version 1.0 and research needs. *Ann Occup Hyg* 55 (2011) Nr. 9, S. 949-56.
- [29] *McNally, K.; Warren, N.; Fransman, W.; Entink, R. K.; Schinkel, J.; van Tongeren, M.* et al.: Advanced REACH Tool: A Bayesian Model for Occupational Exposure Assessment. *Ann Occup Hyg* 58 (2014) Nr. 5, S. 551-65.

- [30] Schinkel, J.; Ritchie, P.; Goede, H.; Fransman, W.; van Tongeren, M.; Cherrie, J. W. et al.: The Advanced REACH Tool (ART): incorporation of an Exposure Measurement Database. *Ann Occup Hyg* 57 (2013) Nr. 6, S. 717-27.
- [31] Guidance on information requirements and chemical safety assessment Chapter R.14: Occupational exposure estimation Version 3.0 – August 2016. Aufl. European Chemicals Agency (ECHA), Helsinki, Finnland, 2016.
- [32] Nicht verbindliche praktische Leitlinien zum Schutz von Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch chemische Arbeitsstoffe bei der Arbeit. Hrsg.: European Commission Directorate-General for Employment Social Affairs Inclusion, Publications Office 2007
- [33] International Chemical Control Toolkit (ICCT). Hrsg.: International Labour Organization (ILO), 2006. https://www.ilo.org/legacy/english/protection/safework/ctrl_banding/toolkit/icct/hgroup.htm
- [34] COSHH ESSENTIALS Easy steps to control health risks from chemicals. Hrsg.: British Health and Safety Executive (HSE), 2014. <http://www.hse.gov.uk/coshh/essentials/index.htm>
- [35] Leitfäden zum Einfachen Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe (EMKG). Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrstoffe/EMKG/Leitfaeden.html>
- [36] Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe (EMKG) am Computer anwenden. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrstoffe/EMKG/EMKG-Software.html>
- [37] Eickholt, C.; Blanco, S.: Entwicklung eines Didaktikkonzeptes für das Einfache Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe EMKG 3.0. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- [38] Hebisch, R.; Baumgärtel, A.; Fröhlich, N.; Karmann, J.: Wirksamkeitsüberprüfung von Schutzmaßnahmen beim Befüllen von Behältern mit Lösemitteln. *Technische Sicherheit* 5 (2015) Nr. 9, S. 42-47.
- [39] Spinazzè, A.; Borghi, F.; Campagnolo, D.; Rovelli, S.; Keller, M.; Fanti, G. et al.: How to Obtain a Reliable Estimate of Occupational Exposure? Review and Discussion of Models' Reliability. *Int J Environ Res Public Health* 16 (2019) Nr. 15, S. 2764-93.
- [40] Hesse, S.; Schroeder, K.; Mangelsdorf, I.; Lamb, J.; van Tongeren, M.: Evaluation of Tier 1 Exposure Assessment Models under REACH (eTEAM) Project – Substudy Report on Gathering of Background Information and Conceptual Evaluation. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2015.
- [41] Tischer, M.; Bredendiek-Kämpfer, S.; Poppek, U.: Evaluation of the HSE COSHH Essentials exposure predictive model on the basis of BAuA field studies and existing substances exposure data. *Ann Occup Hyg* 47 (2003) Nr. 7, S. 557-69.
- [42] van Tongeren, M.; Lamb, J.; Cherrie, J. W.; MacCalman, L.; Basinas, I.; Hesse, S.: Validation of Lower Tier Exposure Tools Used for REACH: Comparison of Tools Estimates With Available Exposure Measurements. *Ann Work Expo Health* 61 (2017) Nr. 8, S. 921-938.
- [43] Landberg, H. E.; Berg, P.; Andersson, L.; Bergendorf, U.; Karlsson, J. E.; Westberg, H. et al.: Comparison and Evaluation of Multiple Users' Usage of the Exposure and Risk Tool: Stoffenmanager 5.1. *Ann Occup Hyg* 59 (2015) Nr. 7, S. 821-35.
- [44] Koppisch, D.; Schinkel, J.; Gabriel, S.; Fransman, W.; Tielemans, E.: Use of the MEGA exposure database for the validation of the Stoffenmanager model. *Ann Occup Hyg* 56 (2012) Nr. 4, S. 426-39.
- [45] Savić, N.; Gasic, B.; Vernez, D.: ART, Stoffenmanager and TRA: A Systematic Comparison of Exposure Estimates Using the TREXMO Translation System. *Ann Work Expo Health* 62 (2017) Nr. 1, S. 72-87.
- [46] Spinazzè, A.; Lunghini, F.; Campagnolo, D.; Rovelli, S.; Locatelli, M.; Cattaneo, A. et al.: Accuracy Evaluation of Three Modelling Tools for Occupational Exposure Assessment. *Ann Work Expo Health* 61 (2017) Nr. 3, S. 284-298.
- [47] Landberg, H. E.; Axmon, A.; Westberg, H.; Tinnerberg, H.: A Study of the Validity of Two Exposure Assessment Tools: Stoffenmanager and the Advanced REACH Tool. *Ann Work Expo Health* 61 (2017) Nr. 5, S. 575-588.
- [48] Crawford, J.; Cowie, H.; Lamb, J.; van Tongeren, M.; Galea, K. S.: Evaluation of Tier 1 Exposure Assessment Models under REACH (eTEAM) Project – Substudy Report on User-Friendliness of Tier 1 Exposure Assessment Tools under REACH. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2015.
- [49] Schinkel, J.; Fransman, W.; McDonnell, P. E.; Klein Entink, R.; Tielemans, E.; Kromhout, H.: Reliability of the Advanced REACH Tool (ART). *Ann Occup Hyg* 58 (2014) Nr. 4, S. 450-68.
- [50] Lamb, J.; Galea, K. S.; Miller, B. G.; Hesse, S.; Van Tongeren, M.: Between-User Reliability of Tier 1 Exposure Assessment Tools Used Under REACH. *Ann Work Expo Health* 61 (2017) Nr. 8, S. 939-953.
- [51] Eickmann, U.; Liesche, A.; Wegscheider, W.: Harmonization and further development of models to calculate airborne contaminant concentrations at the workplace. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 67 (2007) Nr. 4, S. 127-132.
- [52] Arnold, S. F.; Shao, Y.; Ramachandran, G.: Evaluation of the well mixed room and near-field far-field models in occupational settings. *Journal of occupational and environmental hygiene* 14 (2017) Nr. 9, S. 694-702.
- [53] Ribalta, C.; Lopez-Lilao, A.; Fonseca, A. S.; Jensen, A. C. O.; Jensen, K. A.; Monfort, E. et al.: Evaluation of One- and Two-Box Models as Particle Exposure Prediction Tools at Industrial Scale. *Toxics* 9 (2021) Nr. 9, S. 201-19.
- [54] Schlueter, U.; Arnold, S.; Borghi, F.; Cherrie, J.; Fransman, W.; Heussen, H. et al.: Theoretical Background of Occupational-Exposure Models-Report of an Expert Workshop of the ISES Europe Working Group „Exposure Models“. *Int J Environ Res Public Health* 19 (2022) Nr. 3, S. 201-47.
- [55] Schlueter, U.; Tischer, M.: Validity of Tier 1 Modelling Tools and Impacts on Exposure Assessments within REACH Registrations-ETEAM Project, Validation Studies and Consequences. *Int J Environ Res Public Health* 17 (2020) Nr. 12, S. 4589-4612.

Dr. rer. nat. Renate Beisser,
Dr. rer. nat. Mario Arnone,
Dr. rer. nat. Dorothea Koppisch

Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA), Sankt Augustin.

Dr. rer. nat. Lea Anhäuser

Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Köln.

Dr. rer. nat. Ralph Hebisch,
Dr. rer. nat. Urs Schlüter

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund.

Dr. rer. nat. Gitta Weber

Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, Frankfurt am Main.