

## Teil 2: Ansatz und methodische Konzeption des neuen Verfahrens

# Neues Konzept zur rechnerischen Beurteilung betrieblicher Gefahrstoffexpositionen unter Einbeziehung ausgewählter Brandschutzingenieurmethoden

M.Sc. Florian Pillar, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl

Zur stoffbezogenen Gefährdungsbeurteilung nach § 5 ArbSchG bzw. § 6 GefStoffV können rechnerische Betrachtungen in die Beurteilung eingebunden werden, welche nach GefStoffV dem Stand der Technik entsprechen müssen. Im Arbeitsschutz bekannte Modelle weisen ggf. Schwächen und Anwendungsgrenzen auf, ein neuer konzeptioneller Ansatz zur stoffbezogenen Bewertung am Arbeitsplatz stellt die Verknüpfung ausgewählter Brandschutzingenieurmodelle mit bekannten Arbeitsschutzmodellen zur Stoffemission bzw. -immission dar. Neben der Entwicklung dieses neuen konzeptionellen Ansatzes beinhaltet ein Forschungsvorhaben an der Bergischen Universität Wuppertal dessen Validierung, um Aussagen zur Ergebnisgenauigkeit und zu praktischen Einsatzfeldern treffen zu können.

Teil 2 der Veröffentlichung befasst sich mit der detaillierten Beschreibung des Gesamtverfahrens und der konzeptionellen Umsetzung der Berechnungssystematik. Darüber hinaus werden Potentiale und Möglichkeiten aufgezeigt, die den erhofften Mehrwert durch die Verknüpfung von Modellen des Brand- und des Arbeitsschutzes verdeutlichen.

### 1. Neues rechnerisches Gesamtkonzept zur Gefährdungsbeurteilung

Das neue rechnerische Gesamtverfahren stellt ein Instrument dar, das alle erforderlichen Betrachtungsschritte einer Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen nach [3]<sup>1</sup> einbezieht und modular umsetzt. Dazu wird die allgemeine Vorgehensweise zur Beurteilung inhalativer Gefährdungen durch

- das Modell des Arbeitssystems zur Informationsermittlung,
- Modelle des Arbeitsschutzes zur Ermittlung der Stoffemission,
- das Brandschutzingenieurmodell "Fire Dynamics Simulator" (FDS) zur Ermittlung der Stoffausbreitung und ggf. zur Abschätzung thermodynamischer Rahmenbedingungen als Vorbetrachtungen,

- das staatliche Bewertungskonzept des Arbeitsschutzes mittels Arbeitsplatzgrenzwerten bzw. anderweitiger quantitativer Beurteilungsverfahren sowie
- Validierungsschritte zur methodischen Prüfung der Berechnungen untergliedert (vgl. Abb. 1). Die Module sind untereinander verknüpft, gleichzeitig ist das Brandschutzingenieurmodell zur Ermittlung der Stoffausbreitung auf die Rahmenbedingungen des Arbeitsschutzes angepasst, so dass ein in sich geschlossenes Gesamtverfahren vorhanden ist.

#### 1.1 Modul: Informationsermittlung

Die Informationsermittlung dient der Feststellung des Gefährdungspotentials und aller relevanten Arbeitsbedingungen, die in ihrer Gesamtheit eine Tätigkeit abschließend beschreiben und in der Gefähr-

dungsbeurteilung beachtet werden müssen. Zur Erfassung aller Parameter, die als Eingangsgrößen der nachfolgenden Module erforderlich sind, wird das bewährte Modell des Arbeitssystems<sup>2</sup> verwendet. Die Arbeitssystemelemente<sup>3</sup> sind durch die unterschiedlichen Parameter (geometrische und thermodynamische Umgebungsbedingungen, inhärente Stoffeigenschaften, Verlauf der Stoffemission sowie Arbeitsorganisation der Tätigkeit) konkretisiert und zu einem Katalog zusam-

<sup>1</sup> vgl. Teil 1, Abb. 2

<sup>2</sup> vgl. [8]

<sup>3</sup> Das Arbeitssystem untergliedert sich in die Elemente Arbeitsaufgabe, Arbeitsgegenstand, Arbeitsmittel, Mensch, Arbeitsablauf, Eingabe, Ausgabe und Umgebungs- bzw. Umwelteinflüsse, aus denen sich im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung der Untersuchungsgegenstand definiert.

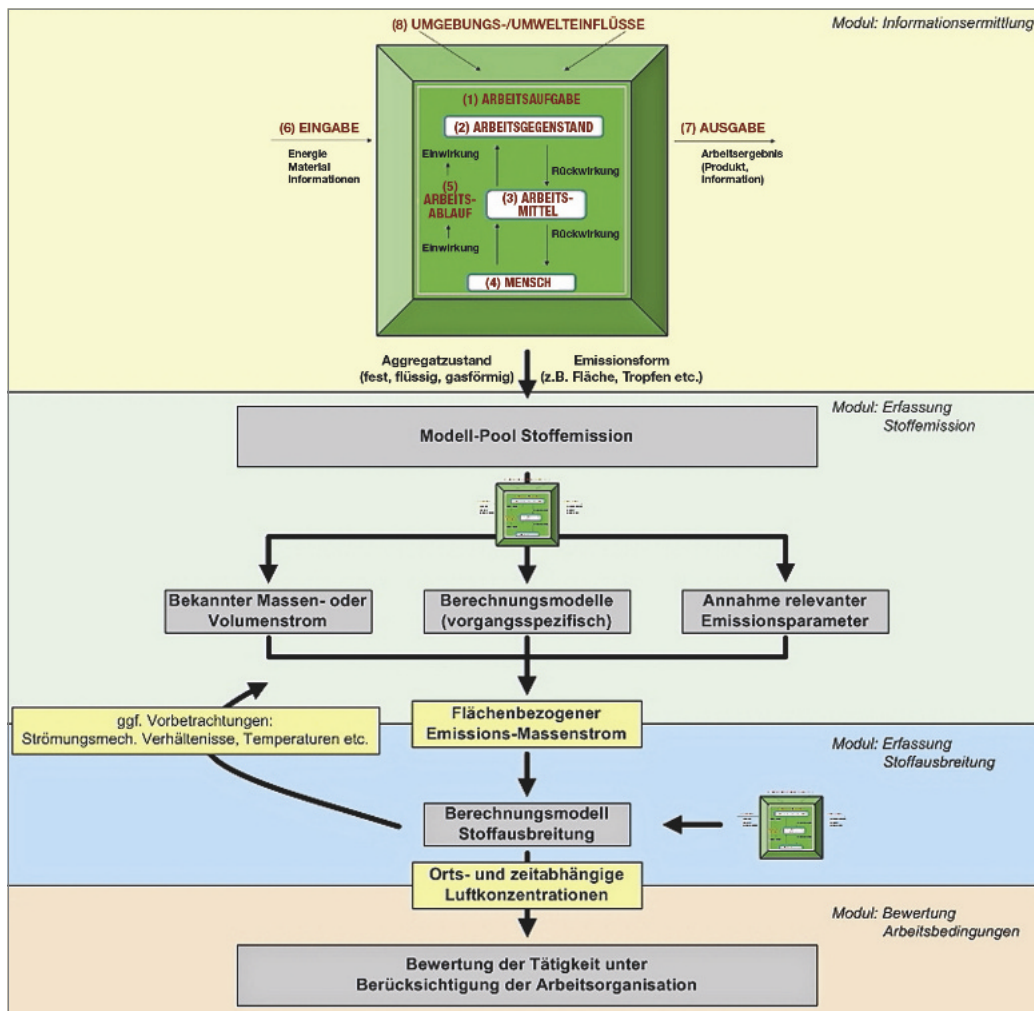


Abb. 1: Ablaufsystematik des neuen Gesamtverfahrens zur stoffspezifischen Gefährdungsbeurteilung

mengefasst. Die Arbeitsbedingungen werden somit einheitlich erfasst. Im weiteren Verlauf des Verfahrens sind keine weiteren Datenerhebungen notwendig. Zu Beginn der Berechnungen von Stoffemission und -ausbreitung sind dadurch alle erforderlichen Eingangsgrößen bekannt.

Das Gesamtverfahren fasst verschiedene Modelle zur Stoffemission konzeptionell in einem Modell-Pool zusammen, so dass unterschiedliche Freisetzungsvorgänge (z.B. Verdunstung, Verdampfung oder Sublimation) rechnerisch erfasst werden können. Für die Modelle bestehen z.T. Anwendungsgrenzen, die den Gültigkeitsbereich der Ergebnisse einschränken und vor einem Einsatz überprüft werden müssen. Zur Verwendung des Modell-Pools ist daher eine Systematik erforderlich, die es dem Anwender gestattet, aus den verschiedenen Ansätzen das für die vorhandenen Arbeits- bzw. Emissionsbedingungen geeignete Modell auszuwählen. Über einen Entscheidungsbaum werden modellspezifische Parameter und Anwendungsgrenzen den Arbeitsbedingungen gegenübergestellt (z.B. Aggregatzustand und Siedetemperatur des Stoffes oder Temperatur der

Umgebung), so dass strukturiert verschiedene Modelle ausgeschlossen werden und Unterstützung bei der Auswahl gegeben wird.

## 1.2 Modul: Erfassung Stoffemission

In der betrieblichen Praxis erfolgen Stoffemissionen durch verschiedene physikalische Vorgänge. Neben der Möglichkeit zur unmittelbaren Annahme von Emissionsbedingungen (z.B. aus Messdaten oder Massenverlustrechnungen) sind innerhalb des Modell-Pools zur Stofffreisetzung unterschiedliche rechnerische Ansätze zusammengefasst:

- Annahmen zur unmittelbaren Stoffemission [16],
  - Modelle zur Fluidemission aus Behältern und Rohrleitungen [15],
  - Verdunstungsmodell für Reinstoffe nach Mackay und Matsugu [6],
  - Verdunstungsmodell für Gemische nach Weidlich und Gmehling [6, 7],
  - dynamisches Verdunstungsmodell [7],
  - theoretisches Verdampfungsmodell [17] sowie
  - theoretisches Sublimationsmodell [17].
- Durch Auswahl und Anwendung eines

Emissionsmodells wird die Stofffreisetzung in Abhängigkeit von vorhandenen Arbeitsbedingungen festgestellt, um als Eingangsgröße in die anschließenden Ausbreitungsrechnungen einzugehen. Sollten die Arbeitsbedingungen keiner der Modellvoraussetzungen entsprechen, müssen anderweitige Erkenntnisse bzw. Abschätzungen durch die Annahme der unmittelbaren Stoffemission für die Ausbreitungsrechnungen einbezogen werden.

Für verschiedene Emissionsmodelle besteht keine Zeitabhängigkeit des stofflichen Freisetzungsverhaltens, die in der Praxis bspw. durch veränderte Lüftungsbedingungen eintreten kann. Da diese Veränderungen jedoch Einfluss auf die gesamte Emission und die Stoffausbreitung haben, sind diese Modelle während der Entwicklung des neuen Gesamtverfahrens konzeptionell erweitert worden. Dabei wurden geeignete Eingangsgrößen zeitabhängig eingebunden und mit einer Abschätzung – entweder anhand von Nebenbetrachtungen oder durch Vorbetrachtungen mit dem Brandschutzingenieurmodell FDS<sup>4</sup> – erweitert. Die abschließende Berechnung der zeitabhängigen Stoffemis-

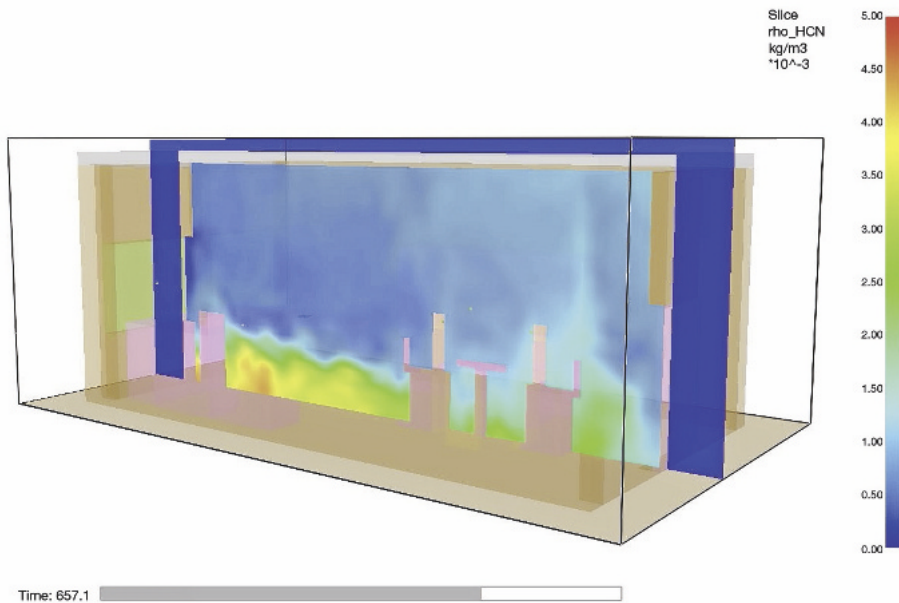


Abb. 1.2: Beispiel der Konzentrationsdarstellung in Abbildungsebene

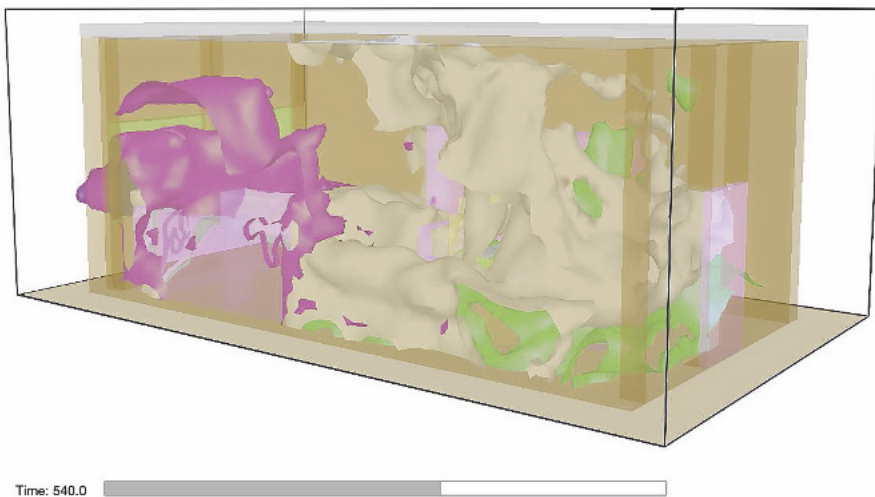


Abb. 1.3: Beispiel der dreidimensionalen Konzentrationsdarstellung (hier: grün als Randfläche der Grenzwertüberschreitung)

sion wurde für alle Modelle in Form einer Tabellenkalkulation umgesetzt, die als Ergebnisse Emissions-Massenströme ausweist.

### 1.3 Modul: Erfassung Stoffausbreitung

Als Synergie zwischen den Schutzbereichen des Arbeits- und des Brandschutzes erfolgt innerhalb des neuen Gesamtverfahrens die rechnerische Ermittlung der Stoffausbreitung durch die Verwendung des Brandschutzingenieurmodells FDS<sup>5</sup>, das auf Computational Fluid Dynamics<sup>6</sup>-Ansätzen (CFD) beruht. Als Ein-

gangswerte gehen in die Modellparametrisierung<sup>7</sup>

- die geometrischen (z.B. Bauteile und weitere Strömungshindernisse) und thermodynamischen (bspw. Umgebungstemperatur und -druck) Umgebungsbedingungen des Arbeitsraums,
- die Lüftungsbedingungen des Arbeitsraums (Zu- und Abluftvolumenströme Lüftungstechnischer Anlagen und Raumöffnungen),
- die Stoffeigenschaften (z.B. Dichte und Temperatur) des Emittierten sowie

- Personenaufenthalte und Betriebsmittel als thermische Einflüsse

ein. Das Freisetzungsverhalten des Stoffes wird durch den flächenbezogenen Emissions-Massenstrom sowie Lage, Größe und Ausrichtung der Emissionsfläche charakterisiert. Im Vorfeld der Betrachtungen muss der Emissions-Massenstrom ggf. mit Faktoren zur Einheitenkonvention angepasst werden<sup>8</sup>.

Mit Hilfe des Brandschutzingenieurmodells sind orts- und zeitabhängige Berechnungen zu Stoffkonzentrationen in der Luft des Arbeitsraums, aber auch die Ermittlung weiterer Parameter (z.B. Temperaturen) möglich. Die Größen werden dazu zeitabhängig je Kontrollvolumen ermittelt, wobei gegenseitige Bezüge Beachtung finden. Zur Auswertung müssen Messpunkte definiert werden, an denen die unterschiedlichen Auswertegrößen über die Betrachtungsdauer hinweg, je Berechnungsschritt, dokumentiert werden. Neben der quantitativen Auswertung steht durch Verwendung des ergänzenden Software-Programms "Smokeview"<sup>9</sup> [13, 14] eine Möglichkeit zur qualitativen Darstellung der Ergebnisse als Visualisierung zur Verfügung. Dabei können insbesondere orts- und zeitabhängige Konzentrationsverläufe in verschiedenen Abbildungsebenen (vgl. Abb. 1.2) und dreidimensional z.B. Überschreitungen von definierten Schwellenwerten (z.B. des AGW, vgl. Abb. 1.3) dargestellt und skaliert werden.

### 1.4 Modul: Bewertung der Arbeitsbedingungen

Zur Überprüfung von Arbeitsbedingungen sowie zur Auswahl und Festlegung geeigneter Schutzmaßnahmen ist eine stoffspezifische Bewertung erforderlich. Diese beruht auf dem Vergleich von auftreten-

<sup>4</sup> vgl. Abschnitt 1.5

<sup>5</sup> vgl. [9, 10, 11, 12]

<sup>6</sup> aus dem Englischen: numerische Strömungsmechanik

<sup>7</sup> Modellinterne Beschreibung der Arbeits- und Rahmenbedingungen, die für die Berechnungen durch das Modell berücksichtigt wird.

<sup>8</sup> vgl. Abschnitt 1.5

<sup>9</sup> <http://code.google.com/p/fds-smv/>

<sup>10</sup> vgl. [5]



den Stoffkonzentrationen mit veröffentlichten Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW) und Spitzenkonzentrationen, wobei Aufenthaltsdauer und Ort der Beschäftigten Berücksichtigung finden müssen. Stehen für einen Stoff weder AGW nach TRGS 900 [4] noch ein anderer Grenzwert (z.B. gemäß MAK-Liste der DFG<sup>10</sup>) zur Verfügung, muss die Bewertung als Vergleich unterschiedlicher Gestaltungsmaßnahmen vorgenommen werden (relative Bewertung). Innerhalb des Gesamtverfahrens stellt die Bewertung der Arbeitsbedingungen ein eigenständiges Modul dar. Dabei werden die Aspekte

- der orts- und zeitabhängigen Stoffkonzentrationen in der Luft,
- des tätigkeitsspezifischen Aufenthaltsortes und der Expositionsdauer der Beschäftigten sowie
- des stoffspezifischen Grenzwerts eingebunden.

Für den Vergleich von Stoffexpositionen bei Tätigkeiten mit Grenzwerten ist zunächst die Verknüpfung der rechnerisch ermittelten Stoffkonzentrationen, die über die gesamte Berechnungsdauer protokolliert werden, und der örtlichen und zeitlichen Zuordnung erforderlich. Anhand der ortsbezogenen Aufenthaltszeiten werden

dazu aus der Berechnungsdokumentation an den entsprechenden Messstellen die Expositionsdaten ausgewertet. Die relevanten Konzentrationen werden zu zeitbezogenen Mittelwerten zusammengefasst.

Der anschließende Grenzwertvergleich erfolgt auf zwei Bezugsebenen: Einerseits kann durch direkte Gegenüberstellung der protokollierten Stoffkonzentrationen ein Vergleich mit Spitzenkonzentrationen erfolgen, die zu keiner Zeit überschritten werden dürfen. Andererseits können anhand der zeitorientierten Mittelwerte im Sinne der TRGS 900 [4] schichtbezogene Beurteilungen mittels AGW vorgenommen werden. Kommt ein anderes Grenzwertkonzept zum Einsatz, so ist ggf. eine Anpassung des Zeitbezuges (für AGW: bezogen auf eine Schichtdauer von 8 Stunden Arbeitszeit) erforderlich.

Wird dagegen ein Vergleich unterschiedlicher Gestaltungsmaßnahmen notwendig (kein Grenzwert vorhanden), werden für die verschiedenen Maßnahmenvarianten (z.B. unterschiedliche Anordnung und Dimensionierung Lüftungstechnischer Maßnahmen) einzelne, vollständige Betrachtungen mit dem Gesamtverfahren durchgeführt. Die Ergebnisse der zeit- und ortsabhängigen Stoffkonzentrationen können

unmittelbar oder auch über Mittelwerte verglichen werden.

### 1.5 Verknüpfung der Module und Vorbetrachtungen

Durch den modularen Aufbau des neu entwickelten Gesamtverfahrens sowie unterschiedliche Emissionsmodelle, die einzelfallabhängig zum Einsatz kommen können, müssen in der Gesamtbetrachtung verfahrensbedingte Verknüpfungen bestehen. Einerseits sind konzeptionelle Verbindungen zwischen den verschiedenen Modulen erforderlich, andererseits werden für verschiedene Emissionsmodelle ggf. Vorbetrachtungen notwendig, die ebenfalls durch den Einsatz des Brandschutzingenieurmodells FDS durchgeführt werden.

Die Informationsermittlung erfasst alle erforderlichen Parameter und stellt diese für die anschließenden Module zur Verfügung. Das angepasste Arbeitssystem bildet die Datensammlung, die als Verknüpfung aller Module fungiert. Stofffreisetzung und -ausbreitung werden durch den flächenbezogenen Emissions-Massenstrom (als Ergebnis der Emissionsmodelle) in  $[kg/(s \cdot m^2)]$  unmittelbar verbunden. Da verschiedene Emissionsmodelle Berech-

+++ Produkte +++ Sicherheitsnews +++ Fachwissen +++

+ Newsletter  
Jetzt abonnieren!

**Sicherheit geht alle an!**



[www.sicherheitsbeauftragter.de](http://www.sicherheitsbeauftragter.de)



nungsergebnisse in unterschiedlichen Einheiten ergeben (bspw. Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling in  $[g/h]$ ), sind ggf. Umrechnungsfaktoren zur Vereinheitlichung notwendig. Die Module der Ausbreitungsrechnung und der Bewertung der Arbeitsbedingungen werden dagegen durch die berechneten zeit- und ortsabhängigen Stoffkonzentrationen verknüpft, um mit Grenzwerten verglichen werden zu können.

Damit die Stofffreisetzung zeitabhängig berechnet werden kann, müssen zeitlich veränderliche Arbeitsbedingungen in die Emissionsmodelle einbezogen werden. Modellabhängig müssen diese Eingangsgrößen – z.B. zeitabhängige Strömungsgeschwindigkeiten über einer Flüssigkeitsoberfläche für das Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling – abgeschätzt werden. Zur Prognose dieser Parameter (bspw. Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen von Umgebungsluft und Stoffen oder Wärmestromdichten auf Oberflächen) kann ebenfalls das Brandschutzingenieurmodell FDS Anwendung finden, wenn keine andere Bestimmung möglich ist. Mit Ausnahme der Emissionsparameter wird eine vollständige Parametrisierung aufgestellt, die thermodynamische und Lüftungstechnische Arbeitsbedingungen umfasst.

### 1.6 Konzeptionelle Plausibilitätsbetrachtungen

Werden in sicherheitsorientierten Betrachtungen Berechnungsverfahren eingesetzt, muss die einzelfallspezifische Plausibilität der Ergebnisse durch den Anwender überprüft werden. Dadurch soll sichergestellt werden, dass falsche Berechnungsansätze bzw. Ergebnisse erkannt und nachvollzogen werden können.

Das neu entwickelte Gesamtverfahren bezieht eine Vielzahl an Eingangsgrößen ein, die in den Modellen als detaillierte Beschreibung der Arbeitsbedingungen berücksichtigt werden. Aufgrund der komplexen Konzeptionen – insbesondere des Brandschutzingenieurmodells FDS – und der umfangreichen Einflussmöglichkeiten ist ein direktes Nachvollziehen der Algorithmen und Ergebnisse nur für die Be-

rechnung der Stoffemission möglich. Für die Ausbreitungsrechnung ist ein strukturiertes Vorgehen zur Plausibilitätsprüfung erforderlich.

Für die Kontrolle der Ermittlung der Stofffreisetzung wird durch den Anwender eine Sichtung der Ergebnisse vorgenommen, bspw. ob nichtphysikalische Effekte auftreten (z.B. Erhöhung eines Behälterdrucks trotz Stoffausstroms) oder ob die emittierte Stoffmasse die vorhandene Masse übertrifft. Für die Ausbreitungsberechnungen kommen anderweitige Strategien zum Einsatz: Zunächst werden anhand der Auswertung entsprechender Berechnungsergebnisse Kontrollen durchgeführt, ob die parametrisierten Arbeitsbedingungen tatsächlich innerhalb des Modells berücksichtigt werden (z.B. Überwachung des Volumenstroms an Zuluftöffnungen). Sofern Vorbetrachtungen angestellt wurden, werden im Zuge der Ausbreitungsrechnungen die Größen erneut ausgewertet und verglichen, um ggf. auf sich ändernde Umgebungsbedingungen aufmerksam zu werden. Darüber hinaus können aufgrund von Stoffeigenschaften und Arbeitsbedingungen Vorüberlegungen zum tendenziellen Ausbreitungsverhalten (z.B. dichtebedingter Auftrieb oder Verwirbelungen durch Lüftungsmaßnahmen) angestellt und Abweichungen analysiert werden. Ein unphysikalisches Modellverhalten kann durch Vergleich der Emissions-Massenströme und -Zeiten mit der Gesamtemission identifiziert werden, die durch das Modell immer berechnet wird.

### 2 Anwendungspotentiale des Verfahrens

Das neu entwickelte Gesamtverfahren stellt eine Möglichkeit zur Beurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen dar. Aufgrund der teils komplexen Modellkonzepte sind detaillierte, orts- und zeitabhängige Aussagen zu Stoffkonzentrationen möglich. Es handelt sich nicht um ein "einfach anwendbares" Verfahren, sondern um ein Experten-Tool, das nur mit erheblichem Aufwand durchgeführt werden kann und Kenntnisse zum physikalischen Stoffverhalten und der Berechnungssystematiken erfordert.

Durch die konzeptionelle Zusammenführung der verschiedenen Module des Gesamtverfahrens sind prinzipiell verschiedene Anwendungsfelder denkbar. Diese tragen auf verschiedene Art und Weise dem Ziel der Verbesserung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen bei, wobei sich die Betrachtungsebenen bspw. über

- die einzelfallbezogene Anwendung des Verfahrens im Rahmen von detaillierten Gefährdungsaussagen, z.B. bei Tätigkeiten mit besonders kritischen bzw. besorgniserregenden Stoffen,
- die Beurteilung typischer Arbeitsplätze unterschiedlicher Branchen zur Erarbeitung genereller Schutzmaßnahmenkonzepte, z.B. in Form von Branchenlösungen,
- den Vergleich unterschiedlicher betrieblicher Maßnahmenkonzepte an Arbeitsplätzen im Sinne des Minimierungsgebots,
- die Überprüfung der Maßnahmenkonzepte in technischen Regelwerken für verschiedene Stoffe, z.B. zur Validierung etablierter Schutzmaßnahmen,
- die Ableitung Stoff- und Verfahrensspezifischer Kriterien im Sinne der TRGS 420,
- die retrospektive Ermittlung stoffbezogener Gesundheitsgefährdungen Beschäftigter, z.B. in der historischen Bewertung von Arbeitsbedingungen, denen eine Begünstigung von Berufskrankheiten unterstellt wird sowie
- die Visualisierung der stoffbezogenen Gefährdungen zur Risikokommunikation, bspw. im Rahmen von Unterweisungen erstrecken kann. Zur Festlegung der tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten sind Validierungsuntersuchungen erforderlich, die das Sicherheitsniveau bzw. die Realitätstreue der Berechnungsergebnisse quantifizieren. Da insbesondere für das Brandschutzingenieurmodell FDS bereits brandbedingte Validierungen mit hoher Übereinstimmung vorliegen, wird vermutet, dass als Synergieeffekte ebenfalls eine hohe Ergebnistreue für Arbeitsschutzbetrachtungen besteht.

In der nächsten Ausgabe Teil 3: Validierungsuntersuchungen des neuen Verfahrens

## Literatur

- [1] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG), Fassung August 1996 (zuletzt geändert Februar 2009); in Bundesgesetzblatt I, 2009
- [2] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV), Fassung 2010 (zuletzt geändert Juli 2011); in Bundesgesetzblatt I, 2011
- [3] TRGS 400 – Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, Ausgabe: Januar 2008
- [4] TRGS 900 – Arbeitsplatzgrenzwerte, Ausgabe: Januar 2006 (zuletzt geändert 2012)
- [5] MAK- und BAT-Werte-Liste 2012 – Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte, Band 48. Weinheim: Wiley-VCH, 2012
- [6] Eickmann, U.: Methoden der Ermittlung und Bewertung chemischer Expositionen an Arbeitsplätzen. Landsberg/Lech: Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2008
- [7] Keil, C.B.: Mathematical Models for Estimating Occupational Exposure to Chemicals. Fairfax, USA: American Industrial Hygiene Association (AIHA), 2000
- [8] Lehder, G.: Taschenbuch Arbeitssicherheit. 12., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2011

- [9] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [10] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide, Volume 2: Verification. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [11] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide, Volume 3: Validation. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [12] McGrattan, K. et. al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) – User’s Guide. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2010
- [13] Forney, G.P.: Smokeview (Version 6) – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data – Volume I: User’s Guide. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2012
- [14] Forney, G.P.: Smokeview (Version 6) – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data – Volume II: Technical Reference Guide. Washington, USA: National Institute of Standards and Technologie (NIST), U.S. Department of Commerce, 2012
- [15] van den Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M. (Hrsg.): Methods for the calculation of physical effects. Third Edition – Second revised print. Den Haag: Committee for the Prevention of Disasters, 2005
- [16] Lindner, Helmut: Physik für Ingenieure. 18. Auflage. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2010
- [17] Jany, P., Thieleke, G., Langeheinicke, K. (Hrsg.): Thermodynamik für Ingenieure - Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium. 8. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011

## Autoren

M.Sc. Florian Pillar



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl



Das neue

# BAPPU<sup>®</sup>

## evo

Das Multimeßgerät für die Arbeitsplatzanalyse

### Jetzt mit:

- Farbdisplay
  - Touchscreen
  - Berechnung von PMV/PPD-Indizes (Klimasummenmaße) und Wärmestrahlung
  - USB-Schnittstelle
  - und vieles mehr
- + BAPPU-time Langzeitaufzeichnung



Besuchen Sie uns auf der  
**Arbeitsschutz Aktuell!**  
**Halle 7**  
**Stand C32**

### 10 Messbereiche!

- Lufttemperatur
- Globetemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Luftgeschwindigkeit
- Lärmpegel (Klasse 2)
- Beleuchtungsstärke (Kl. C)
- Flimmerfrequenz
- Bildschirmhelligkeit
- Leuchtdichtekontraste
- CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid)
- Berechnung von PMV/PPD Indizes (Klimasummenmaße) und Wärmestrahlung

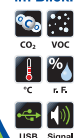
## LUQA<sup>®</sup>

CO<sub>2</sub>-IAQ-Monitor

Die Luft ist rein!

LUQA überwacht die Raumluft und zeigt an, wenn es Zeit ist zu lüften

Immer im Blick!



[www.luqa-co2.de](http://www.luqa-co2.de)

Quality made in Germany!

ELK GmbH Krefeld  
fon: 0 21 51 - 39 56 70

[www.bappu.de](http://www.bappu.de)