

### Teil 3: Validierungsuntersuchungen 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. 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 u.a. Aussagen zur Ergebnisgenauigkeit und zu möglichen praktischen Einsatzfeldern treffen zu können.

Nachdem die rechtlichen Grundlagen, die Ausgangssituation sowie der konzeptionelle Ansatz des neuen Verfahrens erläutert wurden, stellt der vorliegende dritte Teil der Veröffentlichung ausgewählte Aspekte der geplanten Validierungsuntersuchungen dar. Es wird aufgezeigt, mit welcher Schrittfolge die einzelnen Module des Verfahrens validiert werden sollen. Darüber hinaus wird auf Versuchsplanung, mögliche Variationen sowie die Zielsetzung der Auswertung hingewiesen.

## 1 Erfordernis und Anliegen von Validierungsuntersuchungen

Für Berechnungsverfahren zur Beurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen muss die Anwendbarkeit über Untersuchungen in Bezug auf die wissenschaftlichen Gütekriterien der Validität<sup>1</sup>, der Reliabilität<sup>2</sup> und der Objektivität<sup>3</sup> nachgewiesen werden.

Für gefährdungsbezogene Berechnungsverfahren sind zudem auch Einsatzfelder und Anwendungsrahmen bzw. -grenzen zu ermitteln. Die Ermittlung erfolgt ebenfalls durch die Betrachtung der Genauigkeit der Berechnungen (bspw. zu Fall- bzw. Anwendungsbeispielen) und die Verknüpfung mit einem Sicherheitsniveau, das für die Ergebnisse sichergestellt werden kann und dadurch Einfluss auf die De- taillierung des Verfahrens nimmt.

Im Allgemeinen wird die Modellgenauigkeit durch Untersuchungen

- zur Verifikation sowie
- zur Validierung

analysiert und bewertet. Dabei umfasst die Verifikation die Ermittlung von Fehlern innerhalb von Algorithmen eines Berechnungsmodells [8]. Es wird die richtige Programmierung und Verknüpfung des Formelwerks betrachtet, so dass die Wiedergabe der phänomenologischen Gleichungen in konkreten Modellen und die mathematische Einbindung untersucht werden. Von besonderer Relevanz ist die Verifikation bei komplexen Modellen mit einer Vielzahl von Verknüpfungen und Eingangsparametern, wie es bspw. das Brandschutzingenieurmodell "Fire Dynamics Simulator"<sup>4</sup> (FDS) ist. Die Validierung dagegen ist auf die Ermittlung der Abweichung von Berechnungsergebnissen zur Realität ab-

gestellt und zielt auf die Überprüfung der Wiedergabe physikalischer Abläufe durch die Modellgleichungen ab [8]. Die Feststellung möglicher Abweichungen zwischen Realität und Modellbetrachtung wird i.d.R. über den Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messwerten durchgeführt.

## 2 Validierungsuntersuchungen des neuen Gesamtverfahrens

### 2.1 Methodische Betrachtungsgegenstände

Das neue Gesamtverfahren ist modular aufgebaut. Es bindet verschiedene Modelle zur Stoffemission sowie das Brandschutzingenieurmodell FDS zur Ermittlung der Stoffausbreitung ein, darüber hinaus sind Module zur Informationsermittlung und Bewertung der Arbeitsbedingungen<sup>5</sup> integriert.

Alle eingebundenen Modelle sind nicht neu abgeleitet, sondern anderweitig bereits veröffentlicht worden<sup>6</sup>, so dass Verifikationen nur geringfügig erforderlich sind: Die Modelle im Modul zur Erfassung der Stoffemission beruhen auf einzelnen Glei-

<sup>1</sup> Grad der Genauigkeit bzw. Unsicherheit der Berechnungsergebnisse

<sup>2</sup> Wiederholbarkeit der Berechnungen mit gleichen Ergebnissen

<sup>3</sup> Ausmaß der Beeinflussbarkeit von Berechnungsergebnissen durch den Anwender

<sup>4</sup> vgl. [3, 4, 5, 6]

<sup>5</sup> vgl. Darstellung in Teil 2 der Veröffentlichung, Sicherheitsingenieur November 2012

<sup>6</sup> vgl. z.B. [1, 2, 7, 3, 4, 6]

chungen, die für bekannte Eingangswerte unmittelbar gelöst werden können. Da die Modelle in einer Tabellenkalkulation zusammengefasst und hierbei konzeptionell mit Zeitabhängigkeiten erweitert wurden, ist die mathematische Überprüfung der Berechnungsdatei erforderlich. Für das Modell FDS (Modul zur Ermittlung der Stoffausbreitung) bestehen vor dem Hintergrund des komplexen Designs umfassende Studien zur Verifikation der mathematischen Ansätze, die bei Weiterentwicklungen kontinuierlich angewendet, überprüft und fortgeschrieben werden<sup>7</sup>. Das Bewertungsmodul muss dahingehend kontrolliert werden, ob die Zusammenführung von zeit- und ortsabhängigen Stoffkonzentrationen aus den Berechnungsergebnissen, Eingangsdaten zu Arbeitsorganisation bzw. Personenaufenthalt und stoffspezifischen Bewertungsmaßstäben (jeweils aus der Informationsermittlung) praktisch möglich ist.

Validierungsuntersuchungen zur Ergebnissenauigkeit müssen für die Module zur Ermittlung der Stoffemission und -ausbreitung durchgeführt werden. Die Emissionsmodelle sind für bestimmte Anwendungsbereiche konzipiert und ggf. in ihrem Entstehungsprozess anhand weniger empirischer Untersuchungen abgeleitet worden (vgl. [1]). Es ist daher zu klären, ob innerhalb der Anwendungsgrenzen die Stoffemission ausreichend genau dargestellt wird und ob die Anwendungsbereiche erweitert werden können. Für das Brandschutzingenieurmodell FDS bestehen bislang Validierungsuntersuchungen ausschließlich in Verbindung mit Brandereignissen<sup>8</sup>, so dass die Anwendbarkeit und Ergebnissenauigkeit für Untersuchungen ohne thermische Einflüsse eines Brandes auf die Stoffausbreitung zu ermitteln ist. Diese Kontrolle bildet die Grundlage der wissenschaftlich fundierten Übertragung auf spezifische Betrachtungen des Arbeitsschutzes. Aus den Genauigkeitsuntersuchungen lassen sich für die betrachteten Arbeitsbedingungen Sicherheiten zu Ergebnissen ermitteln, auf deren Grundlage die Festlegung von Einsatzfeldern erfolgt.

## 2.2 Validierungskonzeption

Das neu entwickelte Gesamtverfahren verfügt über vielfältige potentielle Einsatzmöglichkeiten zur Beurteilung von Arbeitsbedingungen<sup>9</sup>. Die Validierung dient der Ermittlung und Bewertung von Anwendungsmöglichkeiten und -bedingungen sowie der eindeutigen Festlegung von Anwendungsgrenzen. Es bestehen die Thesen, dass die Übertragung des Brandschutzingenieurmodells FDS auf Arbeitsschutzbetrachtungen zulässig ist, aufgrund der Struktur des Gesamtverfahrens und der integrierten Modelle eine hohe Ergebnissenauigkeit erzielt werden kann und sich daraus weitreichende Anwendungsmöglichkeiten ableiten lassen. Die Untersuchungen des Fachgebiets Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) sollen in Kooperation mit dem Fachbereich Gefahrstoffe der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) durchgeführt werden<sup>10</sup>.

Die Validierung des Verfahrens dient dem Vergleich von empirischen Messungen und Berechnungsergebnissen. Dabei werden die gemessenen Werte als Referenzwerte<sup>11</sup> herangezogen. Die Berechnungen werden unter Verwendung homogener, bei den Messungen ermittelter bzw. berücksichtigter Rahmenbedingungen durchgeführt. Zur wissenschaftlichen Strukturierung werden die Untersuchungen in eine aufeinander aufbauende Schrittfolge unterteilt (vgl. Tab. 1), mit der gleichzeitig die ausstehende Verifikation einzelner Teilaspekte erfolgen soll.

Der Praxisbezug für die Validierung soll über die beispielhafte Auswahl von Tätigkeiten und Arbeitsbedingungen, die zur stofflichen Emission und Ausbreitung führen, gebildet werden. Dazu stehen aus dem Betätigungsfeld und Erfahrungen der BGW diverse mögliche Untersuchungsgegenstände zur Verfügung, wie z.B. die Flächendesinfektion mit Aldehyden oder Alkoholen, die Stofffreisetzung durch Behandlungen in Operationsbereichen oder die Belastung durch Narkosegase für Beschäftigte bei der Anästhesie. Aufgrund des erforderlichen Aufwands erfolgt eine geeignete, beispielhafte Auswahl von Tätig-

keiten durch Festlegungen innerhalb des Validierungskonzepts (Schritt A). Diese Eingrenzung führt zu einer Einschränkung der Anwendungsgrenzen des Gesamtverfahrens, da die ermittelten Genauigkeiten nur für vergleichbare praktische Anwendungsbedingungen gelten. Ziel des Forschungsvorhabens kann daher nicht ein allgemeiner Anwendungsnachweis sein, sondern vielmehr die Untersuchung der generellen Möglichkeit einer Verwendung und beispielhafte Identifizierung eines Einsatzrahmens. Weitere Anwendungsfelder bzw. berücksichtigte Arbeitsbedingungen können durch zusätzliche Untersuchungen (bspw. im Zuge weiterer Forschungsvorhaben) ergänzt werden.

Das Modul zur Ermittlung der Stofffreisetzung beinhaltet Modelle, die bereits im Arbeitsschutz Verwendung finden und innerhalb ihres Anwendungsrahmens erprobt sind. Das Modul zur Berechnung der Stoffausbreitung überträgt dagegen das Brandschutzingenieurmodell FDS in einen erweiterten Anwendungsbereich, der entgegen der ursprünglichen Verwendung kein Brandereignis beinhaltet. In der Validierungskonzeption bietet es sich daher an, die Untersuchungen der Module aufeinander aufzubauen und sukzessiv zu erweitern:

Es ist vorgesehen, messtechnische Versuche für das Modul der Stoffausbreitung durchzuführen, indem die Emission kontrolliert erfolgt – z.B. durch Freisetzung eines definierten Gasmassenstroms - und als singulärer Betrachtungsgegenstand Stoff-

<sup>7</sup> vgl. [5]

<sup>8</sup> vgl. [5]

<sup>9</sup> vgl. Darstellung in Teil 2 der Veröffentlichung, Sicherheitsingenieur November 2012

<sup>10</sup> Ergänzend zur bestehenden Kooperation ist ein Antrag an den Forschungsfond der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) zur Unterstützung des Forschungsprojekts ergangen, über den zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht entschieden wurde.

<sup>11</sup> Die Messunsicherheiten, die sich aus den Messaufbauten und genutzten -geräten ergeben, werden statistisch nicht erfasst, da diese ebenso in der bisherigen Praxis bei Gefährdungsbeurteilungen anhand von Stoffmessungen auftreten.

Schritt	Ausrichtung	Inhalt
A	Erarbeitung eines strukturierten Validierungskonzepts	Untersuchungs- und Versuchsplanung zur eindeutigen Definition von Rahmenbedingungen, Versuchsabläufen und geplanten Variationen  Definition der methodischen Arbeitsschritte sowie Festlegungen zu relevanten Ergebnis- bzw. Vergleichsgrößen, zur Versuchsanzahl und zur statistischen Auswertungen inklusive Vergleichsmöglichkeiten
B	Durchführung der experimentellen Versuche zur Ermittlung der Referenzwerte	Messtechnische Studien zur Stoffemission und -ausbreitung unter Verwendung der durch das Validierungskonzept festgelegten Rahmenbedingungen
C	Durchführung von Vergleichsrechnungen	Anwendung des Berechnungsverfahrens unter gleichen Rahmenbedingungen der messtechnischen Untersuchungen zur Ermittlung der Vergleichsergebnisse  Integration der aufgestellten Variationen und Überprüfung der Wiederholbarkeit der Berechnungen durch mehrfache Durchführung der Berechnungsgänge
D	Durchführung von Sensitivitätsuntersuchungen <sup>12</sup>	Ermittlung des Einflusses von variablen (z.B. in der Praxis lediglich abschätzbaren) Rahmenbedingungen auf die Berechnungsergebnisse anhand ausgewählter Varianten Abschätzung der Einschränkung der praktischen Anwendbarkeit durch unbekannte bzw. "unsichere" Eingangsparameter
E	Ergebnisvergleich und statistische Auswertung	Feststellung von Abweichungen und Fehlern zwischen Experimental- und Berechnungsergebnissen  Quantifizierung und statistische Interpretation der Ergebnisgenauigkeit
F	Bewertung der praxisorientierten Einsatzmöglichkeiten des neuen Gesamtverfahrens	Bewertung der praxisorientierten Einsatzmöglichkeiten des neuen Gesamtverfahrens

Tab. 1: Methodische Schrittfolge der Validierungsuntersuchungen

konzentrationen ermittelt werden. Darauf aufbauend soll eine nicht kontrollierte Stofffreisetzung (bspw. durch freie Verdunstung oder Verdampfung aus einer Flüssigkeitslache) mit anschließender Ausbreitung erfolgen, so dass die Untersuchungen um die Betrachtung der Emissionsmodelle und der Verknüpfung zwischen den Modulen zur Ermittlung der Stofffreisetzung und -ausbreitung erweitert werden. Auf Grundlage der so ermittelten Referenzwerte sollen gleichermaßen aufeinanderfolgende Berechnungen durchgeführt werden, um die Ergebnisse zur alleinigen Stoffausbreitung bzw. zur verknüpften Emission und Ausbreitung vergleichen zu können. Durch die schrittweise Vorgehensweise erfolgt auch die Analyse des Einflusses der Genauigkeit der Emis-

sionsmodelle auf Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung. Da die modulare Informationsermittlung die Grundlage aller weiteren Arbeitsschritte des Gesamtverfahrens bildet, wird das angepasste Arbeitssystem zur Erfassung der notwendigen Eingangsgrößen ebenfalls einbezogen. Gleichzeitig kann das Modul zur Bewertung der Arbeitsbedingungen auf Funktionalität untersucht werden, sofern Aufenthaltsort und -dauern von Beschäftigten angenommen werden.

Um Ergebnisse von Messungen und Berechnungen vergleichen sowie Störgrößen und -einflüsse auf die Eingangswerte ausschließen zu können, finden die Versuche unter kontrollierten Rahmenbedingungen in einem Laborraum der BGW statt. Entsprechend der Festlegungen des zu erar-

beitenden Validierungskonzepts werden Variationen erfolgen, die bspw. die Verwendung unterschiedlicher Versuchsstoffe und Emissionsbedingungen, die Lüftungsverhältnisse oder die Orte der Konzentrationsermittlung umfassen. Es muss zudem der thermische Einfluss des Personenaufenthalts auf die Stoffausbreitung berücksichtigt werden, wozu ein entsprechender Modellkörper entworfen wird. Abschließend ist geplant, die Untersuchungen durch ein tatsächliches Praxisbeispiel unter "unbekannten", nicht im Vorfeld geplanten Rahmenbedingungen zu ergänzen. Dies dient der Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens sowie der Feststellung von Einflüssen durch zusätzliche Unbekannte bzw. nur abschätzbare Rahmenbedingungen. Ebenso zielen die geplanten Sensitivitätsuntersuchungen ausgewählter Berechnungsvarianten auf die Feststellung des Einflusses geschätzter Eingangsparameter ab.

Die Auswertung der Messungen und Berechnungen erfolgt als Vergleich der gewonnenen Ergebnisse. Dabei können einerseits die ermittelten Stoffkonzentrationen, andererseits aber auch Prognosen der Berechnungsmodelle zu anderen Arbeitsbedingungen (bspw. Entwicklung der Umgebungstemperatur oder auftretende Luftströmungen) herangezogen werden. Aus der Untersuchung der erfassten Ergebnisse soll weiterhin ein Sicherheitsniveau ermittelt werden, welches für Berechnungen des Gesamtverfahrens gültig ist. Auf Basis der Aussagen zur Ergebnisgenauigkeit können abschließend mögliche Einsatzfelder abgeleitet werden, deren Detail- und Genauigkeitserfordernisse mit dem erzielten Sicherheitsniveau korrelieren.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick zum Gesamtverfahren

Im Zuge eines Forschungsvorhabens wurde ein Gesamtverfahren konzipiert, das die Beurteilung von Tätigkeiten mit Gefahr-

<sup>12</sup> Gezielte Variation einzelner Parameter zur Feststellung der Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis, wobei keine einzelfallbezogenen Referenzen aus Messungen bestehen

stoffen unter Verwendung von Berechnungsmodellen ermöglicht. Wesentlicher Bestandteil des modularen Aufbaus ist das Brandschutzingenieurmodell FDS zur Ermittlung der Stoffausbreitung. Damit ein praktischer Einsatz erfolgen kann, muss die Anwendbarkeit jedoch durch wissenschaftliche Untersuchungen belegt sowie mit Bedingungen und Grenzen konkretisiert sein.

Bislang ist das Gesamtverfahren theoretisch abgeleitet worden, so dass der Anwendbarkeitsnachweis sowie die Ermittlung der Ergebnisgenauigkeit – ebenso wie i.d.R. bei bisherigen Arbeitsschutzmodellen – ausstehen. Als Abschluss des Forschungsvorhabens bedarf es somit der Bewertung des praktischen Nutzens.

Im Zuge eines Projekts, das zeitnah in Kooperation zwischen der Bergischen Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit und der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege, Fachbereich Gefahrstoffe umgesetzt wird, wird die Validierung des neuen Gesamtverfahrens ergänzt. Dabei sollen insbesondere die Thesen der generellen Übertragbarkeit des Brandschutzingenieurmodells FDS auf Arbeitsschutzbetrachtungen, der Annahme einer hohen Genauigkeit der Berechnungsergebnisse sowie der Begründung von Einsatzfeldern erörtert werden. Im Anschluss ist vorgesehen, der Praxis das Gesamtverfahren als Experten-Tool zugänglich zu machen und Anwendungsrahmen bzw. -grenzen in Form eines Forschungsberichts darzustellen. Dennoch wird eine Anwendung ohne Kenntnisse des Verfahrens sowie der grundlegenden physikalischen Hintergründe nicht möglich sein.

Neben den geplanten Untersuchungen kann eine Ergänzung des Gesamtverfahrens sowie eine Erweiterung des bis dahin nachgewiesenen Anwendungsrahmens bspw. durch weitere Forschungsvorhaben erfolgen. Somit besteht das Potential, ein Experten-Tool aufzubauen, dessen Einsatz auf breiter Basis möglich erscheint und durch präventive Untersuchung von Arbeitsbedingungen eine praxisnahe Ausweisung des betrieblichen Sicherheits-

niveaus bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen ohne Messerfordernis darstellt.

#### Literatur

- [1] Eickmann, U.: Methoden der Ermittlung und Bewertung chemischer Expositionen an Arbeitsplätzen. Landsberg/Lech: Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2008
- [2] Keil, C.B.: Mathematical Models for Estimating Occupational Exposure to Chemicals. Fairfax, USA: American Industrial Hygiene Association (AIHA), 2000
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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

- [7] 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
- [8] Oberkampf, W.L., Trucano, T.G.: Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. Albuquerque, USA: Sandia National

#### Autoren

M.Sc. Florian Pillar



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



REVEN® Luftreiniger · Tel.: +49 (0) 7042 - 373 - 0

**Rauchen kann tödlich sein.**

**Ölnebel auch!**

Wir helfen:  
[www.reven.de/nebeltod](http://www.reven.de/nebeltod)