

Sachgebiet Explosionsschutz

Stand: 23.04.2024

Die Gefährdungen durch die Freisetzung von Gasen und Dämpfen infolge der Ableitung über Ausbläser aus Sicherheitsventilen, Prozess-Berstscheiben, Entlüftungs- und Entspannungsleitungen sind in einer Gefährdungsbeurteilung zu bewerten. Freisetzungen aus Druckanlagen können nach TRBS 2141 beurteilt werden.

In dieser Fachbereich AKTUELL werden verschiedene Methoden mit ihren benötigten Eingangsdaten und Anwendungsgrenzen zur Beurteilung der Gefahren an Ausbläsern für brennbare Gase vorgestellt, um den Anwendern und Prüfern von solchen Anlagen eine Hilfestellung bei der Bewertung und Beurteilung möglicher Gefahren an den prozessbedingten Stoffauslässen ins Freie zu geben.

Auch manuelle Freisetzungen sind zu berücksichtigen. Die Ermittlung von Gefahrenbereichen (TRGS 407 Nr. 2 Abs. 11) aufgrund toxischer Wirkung von Gasen wird in dieser Veröffentlichung nicht behandelt, ist jedoch in der allgemeinen Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen.

Inhaltsverzeichnis

1	Gefährdungen und Schutzmaßnahmen	2
2	Grundlagen zur Ermittlung der Gefahrenbereiche	2
3	Modelle zur Ermittlung von Gefahrenbereichen.....	3
4	Umsetzung der Modelle in Programmen und Verfahren.....	5
4.1	PHAST	5
4.2	ProNuSs.....	5
4.3	DVGW G 442	6
4.4	CFD (FDS, Fluent, Open Foam)	6
4.5	FLACS.....	7
4.6	DIN EN IEC 60079-10-1	7
5	Vorgehensweise unabhängig vom Programm/Modell	8
6	Qualifikationsprofil	10
7	Fazit.....	10

1 Gefährdungen und Schutzmaßnahmen

Bei Anlagen kann es notwendig sein, brennbare Gase in die Umgebung zu entlasten. Zur Vermeidung von Brand- und Explosionsgefahren sind die Gase gefahrlos abzuführen.

Im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung sind die Explosionsgefährdungen von fachkundigen Personen nach § 6 (11) Gefahrstoffverordnung zu bewerten und geeignete Schutzmaßnahmen festzulegen. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist in der TRGS 720 und TRGS 721 beschrieben.

Bei möglichen Freisetzungen ist das vertikale Abblasen nach oben zu bevorzugen. Gleichzeitig ist die Leitung zur Atmosphäre vor Witterungseinflüssen, wie beispielsweise Schneefall oder Regen, zu schützen. Beispiele für zwei Ausbläser-Geometrien sind nachfolgend beispielhaft dargestellt.

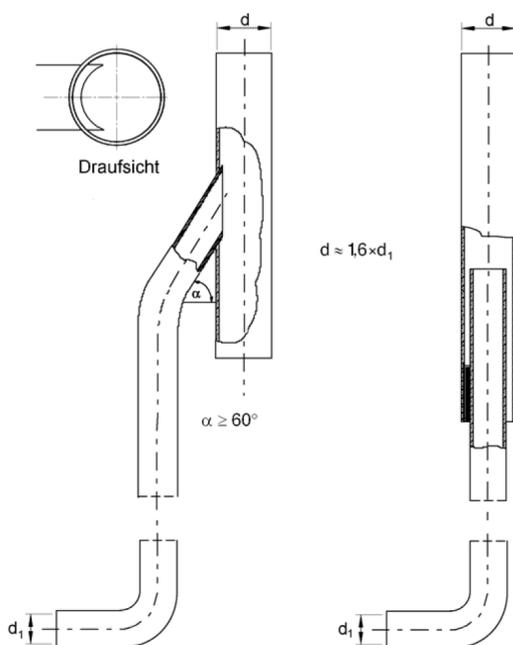


Abbildung 1 Beispiel für eine Ausbläser-Geometrie (aus DVGW G 442 [1])

Explosionsschutzmaßnahmen sind während der Planung in einem Explosionsschutzkonzept festzulegen. In Bereichen, in denen eine Vermeidung der Entstehung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre nicht sicher gewährleistet werden kann, können Zonen in Abhängigkeit der Häufigkeit und Dauer des Auftretens der explosionsfähigen Atmosphäre definiert werden. Um die notwendigen Schutzmaßnahmen festzulegen, sind hierzu bei der Projektierung und/oder Bewertung von Leitungen zur Atmosphäre Gefahrenbereiche zu ermitteln.

2 Grundlagen zur Ermittlung der Gefahrenbereiche

Zur Ermittlung des Gefahrenbereiches ist zunächst auf Grundlage der Stoffeigenschaften, der Betriebsbedingungen und der technischen Randbedingungen (engster Strömungsdurchmesser, Ausflussziffer, Länge der Abblaseleitung, Druckverlust in der Abblaseleitung, Kennlinie des Sicherheitsventils usw.) der freigesetzte Massenstrom zu berechnen. Im nächsten Schritt sind die Freisetzungsbedingungen zu bestimmen, die sich aus Ort, Richtung und Höhe der Austrittsöffnung,

dem Aggregatzustand und der Temperatur der Stoffe, dem Impuls der Austrittsströmung (Richtung, Geschwindigkeit) und der Umgebungssituation (Windrichtung und -geschwindigkeit) ergeben.

Die Konzentrationsverteilung in der Umgebung des Freisetzungsortes ist nach Abschnitt 6.2.1 der TRBS 2141 mittels anerkannter Modelle zur Freistrahls- und atmosphärischen Ausbreitung zu berechnen. Die Abmessungen eines möglichen explosionsgefährdeten Bereiches ergeben sich durch den Vergleich der berechneten Konzentrationsverteilung mit der unteren Explosionsgrenze.

Auf der Grundlage des Berechnungsergebnisses ist zu beurteilen, ob es sich um ein gefährliches explosionsfähiges Gemisch im Sinne der TRGS 720 handelt, so dass besondere Schutzmaßnahmen für die Aufrechterhaltung der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten oder anderer Personen erforderlich werden.

Kann eine Zündung des freigesetzten Gases mit einer der Zoneneinteilung entsprechenden Wahrscheinlichkeit nicht ausgeschlossen werden, ist dieser Umstand ebenfalls in der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von den Stoffeigenschaften und der zusammenhängenden Masse des explosionsfähigen Gemisches kann eine verzögerte Zündung des Freistrahls oder der Gaswolke zu einer Explosion mit relevanter Druckwirkung in der Umgebung des Freisetzungsortes führen. Unter entsprechenden Freisetzungsbedingungen kann sich eine stabil brennende Freistrahlf Flamme bilden, deren Bestrahlungsstärke ebenfalls eine Gefährdung in der Umgebung ergeben kann.

Speziell bei Wasserstoff unter höherem Druck ist bekannt, dass es bei einer Freisetzung zur spontanen Zündung mit der Bildung einer Freistrahlf Flamme kommen kann [2], [3]. Bei einer verzögerten Zündung von Wasserstoff-Freistrahlen wurden bei experimentellen Untersuchungen relevante Explosionsüberdrücke gemessen [4]. Zur Untersuchung dieser Phänomene läuft derzeit ein Projekt der DVGW e. V., um Regeln zur Dimensionierung von Gefährdungsbereichen an H₂-Freisetzungstellen weitere experimentelle Daten für die Freisetzung aus Lambda-Ausbläsern zur Verfügung zu stellen [5].

3 Modelle zur Ermittlung von Gefahrenbereichen

Eine Zusammenstellung von Ansätzen zur Berechnung des freigesetzten Massenstroms kann dem Statuspapier der ProcessNet [6] entnommen werden. Bei einer Freisetzung von Gasen aus einem Ausbläser kommt es bei einem ausreichend großen Massenstrom zu einem impulsbehafteten Austritt als Freistrahls. Für die Berechnung des Freistrahls werden unterschiedlich komplexe Modellierungen eingesetzt:

1. Empirische Modelle
2. Integralmodelle
3. CFD-Modelle

Empirische Modelle sind im Statuspapier der ProcessNet beschrieben. Diese Modelle basieren auf dimensionsanalytischen Betrachtungen und erfordern im Allgemeinen eine Anpassung an experimentelle Daten. Die Berechnung der Konzentration auf der Freistrahlmittellinie und gegebenenfalls des örtlichen Verlaufs der Freistrahlmittellinie kann mit einem Tabellenkalkulationsprogramm relativ einfach durchgeführt werden. Die Modelle sind für spezielle

Situationen (schweres/leichtes Gas, Austrittsgeschwindigkeit und -richtung, Windgeschwindigkeit usw.) entwickelt worden und sollten auch in diesem Bereich angewendet werden.

Integralmodelle basieren auf der Vereinfachung prozessbeschreibender, partieller Differenzialgleichungen für die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie. Durch Symmetrieanahmen und weitere Vereinfachungen wird ein System gewöhnlicher Differenzialgleichungen abgeleitet und dieses numerisch, mit relativ geringem Rechenaufwand, gelöst. Die Integralmodelle sind flexibel einsetzbar. Es können Berechnungen für unterschiedliche Stoffe, Windgeschwindigkeiten und Freisetzungsbedingungen durchgeführt werden. Anwendungsgrenzen sind ein Mindestwert für den Austrittsimpuls und eine Freisetzung entgegen der Windrichtung.

CFD-Modelle (CFD "Computational Fluid Dynamics", deutsch: "Numerische Strömungsmechanik") basieren ebenfalls auf den Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Die partiellen Differenzialgleichungen werden mit Bezug auf entsprechende Anfangs- und Randbedingungen als strömungsdynamisches Problem numerisch gelöst. Im Vergleich zu empirischen und analytischen Verfahren gilt es bei der CFD-Simulation ungleich mehr Parameter und Einflussgrößen zu beschreiben.

Häufig kommt bei einer CFD-Simulation das Finite-Volumen-Verfahren zur Anwendung, welches ein numerisches Verfahren zur Diskretisierung von Erhaltungsgleichungen darstellt. Hierfür muss ein Berechnungsgitter mit endlich vielen Gitterelementen modelliert werden, für welches die Elementform und -größe festzulegen sind. Für jedes Element gilt dann der Erhaltungssatz, so dass sich eine Änderung einer Größe in einem Element, wie beispielsweise einer Stoffkonzentration, auf die angrenzenden Elemente auswirkt. Für jeden Zeitschritt der Berechnung werden die gesuchten Größen wie Geschwindigkeit und Konzentration im Rechengebiet durch Lösung eines entsprechend großen Gleichungssystems berechnet. Hierbei bestimmen neben dem gewählten Turbulenzmodell auch die Qualität des Rechengitters, die Zeitschrittweite und die Vorgabe des Konvergenzkriteriums der Differenzialgleichungen das Berechnungsergebnis.

Insbesondere bei komplexen Fragenstellungen, die sich mit empirischen oder analytischen Verfahren nicht adäquat lösen lassen, kann über eine CFD-Simulation eine Lösung gefunden werden. Komplexe Fragestellungen im Zusammenhang mit der Freisetzung von Gefahrstoffen können beispielsweise die Bewertung des Einflusses einer komplizierten Bebauungssituation im Bereich der Freisetzungsstelle oder der Einfluss einer besonderen Ausbläsergeometrie auf die Stoffausbreitung sein.

Bereits die zuvor diskutierten Einflussparameter, welche nicht abschließend sind, machen ersichtlich, dass die Auswahl und Anwendung einer CFD-Simulationssoftware sowie die Interpretation der damit erzielten Ergebnisse ein beträchtliches Wissen voraussetzen. Zudem ist der Aufwand für die Bewertung einer Stofffreisetzung über einen Auslass mittels CFD-Simulation ungleich höher im Vergleich zu empirischen und analytischen Ansätzen, so dass die CFD-Simulation nur im Einzelfall zur Lösung der oben genannten komplexen Fragestellungen zum Einsatz kommt.

Für alle drei Modell-Klassen gilt, dass die Modelle für den gewünschten Anwendungsbereich mit möglichst ähnlichen experimentellen Untersuchungen überprüft werden müssen, um als valide zu gelten.

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf impulsdominierte Gasfreisetzungen als Freistrahlen. Ist dies z. B. aufgrund großer Austrittsdurchmesser oder geringer Massenströme nicht der Fall, so

bildet sich am Austritt des Ausblägers eine Gaswolke, die durch die Windströmung weiter transportiert wird. Hierbei kann der Einfluss einer Gebäudeumströmung relevant sein. Ein Gauß-Modell wird für die Berechnung der Konzentrationsverteilung ab einer Entfernung von 100 m zur Quelle empfohlen (siehe z. B. VDI 3782 Blatt 1). Hingegen sind Lagrangesche Partikelmodelle und CFD-Modelle für die Betrachtung eines geringeren Abstandes zur Quelle geeignet. Mit diesen Modellen kann gegebenenfalls auch der Gebäudeeinfluss auf die Strömung berücksichtigt werden.

4 Umsetzung der Modelle in Programmen und Verfahren

Im Folgenden werden Programme und Verfahren zur Ermittlung von Gefahrenbereichen beschrieben. Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellt keine Empfehlung dar.

4.1 PHAST

PHAST ist ein kommerziell erhältliches Programmpaket der Det Norske Veritas, ein vergleichbares Produkt ist auch EFFECTS der TNO (NL). In diesem Programmpaket sind Ansätze und Modelle /LIT [7] zur Berechnung von Störfallszenarien gesammelt. Diese wurden gegen Literaturdaten abgeglichen und werden regelmäßig an neuere Erkenntnisse angepasst. Das Freisetzungsmodule erlaubt die Berechnung der Freisetzung bei unter- und überkritischem Ausströmen mit der Berechnung von Freistrahlen oder Ausbreitungsrechnungen.

PHAST verfügt über eine breite Stoffdatenbank (DIPPR) und kann daher für eine Vielzahl von Gasen eingesetzt werden, insbesondere auch Wasserstoff, Methan und Propan/Butan als gängige Brenngase. PHAST kann die Wetterlage, Windgeschwindigkeit (ab 1 m/s) und -richtung sowie die Richtung der Freisetzung berücksichtigen. Besondere örtliche Gegebenheiten (Strömungshindernisse) oder besondere Düsenformen können allerdings nicht berücksichtigt werden.

PHAST ermöglicht auch die Ermittlung der Auswirkungen einer Explosion oder eines Folgebrandes (Strahlungswärme des brennenden Freistrahls).

4.2 ProNuSs

Das Programmpaket ProNuSs (ProNuSs Engineering GmbH) ist zur Durchführung von Auswirkungsbetrachtungen für die Freisetzung von Gefahrstoffen entwickelt worden. Ausgehend von einer Stoffdatenbank können entsprechend den Stoff- und Freisetzungsbedingungen die freigesetzten Massenströme berechnet werden. Zur Bestimmung der Gefahrenbereiche stehen für die darauf aufbauende Berechnung der Gasausbreitung, eines Brands oder einer Explosion jeweils mehrere Modelle zur Verfügung.

Bei der Freisetzung eines Gases aus einem Ausbläser mit einem ausreichenden Austrittsimpuls bildet sich ein Freistrahls aus. Für die Berechnung des explosionsgefährdeten Bereiches oder bei toxischen Gasen der Überhöhung stehen zwei Integral-Modelle (modifiziertes Schatzmann-Modell, PLURIS) und empirische Modelle (z. B. modifiziertes Chen/Rodi-Modell) zur Verfügung. Das Freistrahlsmodell nach Schatzmann ist am flexibelsten einsetzbar und für schwere, dichteneutrale und leichte Gase, inklusive Wasserstoff, validiert worden. Eine Voraussetzung dieses Modells ist, dass der Austrittsimpuls für die Bildung des Freistrahls ausreichend groß ist. Ist dies nicht der Fall können das Fahnenmodell PLURIS oder das empirische Modell von Chen/Rodi, das hinsichtlich der Eignung für Wasserstoff modifiziert

worden ist, eingesetzt werden [8]. Unter der Voraussetzung, dass der Austrittsimpuls vernachlässigbar ist, kann die sich unter Windeinfluss bildende Gaswolke mit dem Lagrangeschen Partikelmodell AustalHaz, auch unter Berücksichtigung einer Gebäudeumströmung, berechnet werden. Das Lagrangesche Partikelmodell ist im Gegensatz zum Gauß-Modell (VDI 3783 Blatt 1) geeignet, die Konzentrationsverteilung auch im Nahbereich der Quelle zu berechnen.

Die bei einer verzögerten Zündung eines Wasserstoff-Freistrahls zu erwartenden Explosionsüberdrücke können mit einem auf Grundlage des Multi-Energy-Modells entwickelten Ansatzes abgeschätzt werden. Für die Berechnung der Bestrahlungsstärke in der Umgebung einer Freistrahlf Flamme steht ein Modell zur Verfügung. Als brennbare Gase können sowohl Reinstoffe, inklusive Wasserstoff, als auch Gasgemische verwendet werden.

4.3 DVGW G 442

Mit dem Verfahren nach DVGW-Merkblatt G 442 [1] können Höhe und Radius zylinderförmiger explosionsgefährdeter Bereiche für einfache Entspannungssysteme anhand von Tabellen und Diagrammen (oder zugehöriger Software e.BEx) bestimmt werden. Es wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens auf Basis validierter numerischer Modelle entwickelt. Für hiervon abweichende Entspannungssysteme sowie in Fällen, in denen eine hohe Anforderung an die Genauigkeit der zu ermittelnden Grenzen des explosionsgefährdeten Bereiches gestellt werden, kann das Verfahren nicht angewendet werden.

Das DVGW-Merkblatt gilt nur für Anlagen, die mit Gasen der 2. Gasfamilie (Erdgas bzw. Naturgas hauptsächlich aus Methan bestehend) betrieben werden, wie Gas-Druckregel und Messanlagen (GDRM), Brenngasverdichter oder Erdgastankstellen. Wasserstoff kann als Zusatzgas in Gasnetze der 2. Gasfamilie eingespeist werden. Die in DVGW 260, Anhang D, genannten Restriktionen sind dabei zu berücksichtigen. Das Rechenverfahren des DVGW G442 kann bis zu einem Wasserstoffgehalt von 10 Mol-% mit ausreichender Genauigkeit verwendet werden [9].

Das Verfahren zur Ermittlung der explosionsgefährdeten Bereiche an Ausblaseöffnungen ist nur anwendbar für zwei Leitungsabschnitte, die sich in Strömungsrichtung erweitern oder einen gleichbleibenden Querschnitt aufweisen (Verengungen können nicht berücksichtigt werden), sowie für vertikale und horizontale Ausbläser (sog. Ausbläser Typen A, B oder C). Weiterhin sind die Ergebnisse der Berechnungsmethode nur dann zutreffend, wenn innerhalb des ermittelten Ex-Bereichs keine Beeinflussungen, z. B. durch Gebäude oder Außenwände, vorliegen.

4.4 CFD (FDS, Fluent, Open Foam)

Bei der Strömungssimulation bzw. CFD-Simulation werden Strömungswege und -verläufe rechnerisch abgebildet und visualisiert. Auch die Durchmischung verschiedener Stoffe (z. B. eines Wasserstoff/Luft-Gemisches) lässt sich mit einer CFD-Simulation berechnen, so dass diese grundsätzlich auch dazu geeignet ist, die Ausbreitung eines gasförmigen Gefahrstoffes in Luft zu beschreiben (siehe Abschnitt 3).

Die verbreitetsten kommerziellen Programmpakete zur numerischen Strömungssimulation sind Fluent und CFX von Ansys sowie Star-CCM+ von Siemens. Freiverfügbar sind die CFD-Software OpenFOAM der OpenCFD Ltd. und der Fire Dynamics Simulator (FDS), welcher zur Beschreibung

von Brandszenarien vom NIST entwickelt wurde, aber auch zur Ausbreitungsberechnung von Gefahrstoffen genutzt werden kann.

4.5 FLACS

FLACS (Flame Acceleration Simulator) ist ein Simulationsprogramm, das ursprünglich für Gasexplosionen am Christian Michelsen Institut in Norwegen entwickelt wurde und heute von der Gexcon AS kommerziell vertrieben wird. Durch eine numerische Auswertung der Erhaltungsgleichungen unter Einbeziehung von Turbulenzmodellen und deren Einfluss auf die Flammenbeschleunigung können Explosionsabläufe in verfahrenstechnischen Anlagen nachvollzogen werden. Diese wurden seit den 80er Jahren mit Experimenten im Klein- bis Realmaßstab abgeglichen.

FLACS verfügt über die Möglichkeit, ausgehend von einer Freisetzung zunächst das Strömungs- und Konzentrationsprofil in einer Anlage zu ermitteln, bevor die Zündung der dann vorliegenden Gaswolke erfolgt, so dass FLACS auch zur Ermittlung der Konzentrationsfelder in der Umgebung von Freisetzungsorten herangezogen werden kann. FLACS enthält kein Modul zur Ermittlung des Quellterms, sondern ist nur zur Beschreibung der Ausbreitung geeignet.

Das Geometriemodul ermöglicht die Implementierung kompletter verfahrenstechnischer Anlagen, auch Witterungs- oder Lüftungsverhältnisse können eingepflegt werden.

Hinsichtlich der Freisetzungs- und Ausbreitungsrechnung ist FLACS damit nichts anders als ein CFD-Modul, allerdings mit bereits angepassten Ein- und Ausgabemöglichkeiten und der zusätzlichen Option der Simulation des Explosionsablaufes. FLACS kann für eine Vielzahl von Brenngasen, inklusive Wasserstoff eingesetzt werden. Ein Vergleich zu experimentellen Daten für Ausbreitung und Explosionsauswirkungen bei Wasserstofffreistrahlen findet sich z. B. in [10].

4.6 DIN EN IEC 60079-10-1

Der Teil 10-1 der DIN EN IEC 60079 [11] befasst sich mit der Einteilung und Ausdehnung von explosionsgefährdeten Bereichen, in denen Gefährdungen durch brennbare Gase, Dämpfe oder Nebel auftreten können. Für verschiedene Formen der Freisetzung kann die Freisetzungsrates anhand von Näherungen berechnet werden. Mit der zugehörigen Bewertung der Lüftung oder Verdünnung erfolgt die Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche in Zonen.

Sind die Art und Menge der Freisetzung bekannt, kann auch die Ausdehnung des explosionsgefährdeten Bereichs nach DIN EN IEC 60079-10-1 abgeschätzt werden. Der „explosionsgefährdete Abstand“ nach dieser Norm wird dazu in Abhängigkeit der Freisetzungseigenschaft und der Art der Gasfreisetzung (ungehinderte Strahlfreisetzung, diffusive Freisetzung mit verringertem Impuls, schwere Gase oder Dämpfe) aus einem Diagramm ermittelt. Das Diagramm basiert auf ausgewählten numerischen Strömungssimulationen (CFD). Die Ergebnisse wurden für die Verwendung in der DIN EN IEC 60079-10-1 angepasst.

Für die mit dieser Methode ermittelte Hauptausdehnung in Abhängigkeit der Freisetzungseigenschaft muss abschließend die Form des dreidimensionalen explosionsgefährdeten Bereichs festgelegt werden [12]. Dabei kann der explosionsgefährdete Bereich, der durch die Freisetzung erzeugt wird, auch aus einer Kombination von verschiedenen Formen erhalten werden, welche im Anhang dieser

Norm beispielhaft dargestellt sind. Zum einen muss demnach die Strahlfreisetzung in Richtung des Ausblasens berücksichtigt werden, zum anderen die Windgeschwindigkeit aus unterschiedlichen Richtungen.

5 Vorgehensweise unabhängig vom Programm/Modell

Bei der Festlegung von Gefahrenbereichen an Auslässen bietet sich im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung folgende Vorgehensweise an:

1. Ermittlung der maßgeblichen Gefahrstoffe, bei deren Freisetzung vom größten Gefahrenbereich am Auslass auszugehen ist
 - Insbesondere an Auslässen, wo mehr als ein Gefahrstoff zur Atmosphäre freigesetzt werden kann, beispielsweise Abblaseleitung eines Sicherheitsventils in einer Mehrzweckanlage, sind die physikalischen und sicherheitstechnischen Kenngrößen, wie Dichte, Diffusionsverhalten, untere Explosionsgrenze, Mindestzündenergie, Mindestzündtemperatur und Störfallbeurteilungswert, für die Auswahl eines oder der repräsentativen Gefahrstoffe zu betrachten.
 - Ist verfahrenstechnisch die Freisetzung nur eines Gefahrstoffes zu berücksichtigen oder deckt ein Gefahrstoff in einer Mehrzweckanlage aufgrund seiner physikalischen und sicherheitstechnischen Kenngrößen alle anderen Gefahrstoffe ab, so ist der Gefahrenbereich am Auslass nur für diesen einen Gefahrstoff abdeckend zu betrachten.
2. Ermittlung der relevanten Prozess-, Anlagen- und Umgebungsparameter, die einen Einfluss auf den bei der Freisetzung zu berücksichtigenden Gefahrenbereich haben können
 - Neben den stofflichen Eigenschaften sind zur Ermittlung eines Gefahrenbereiches die anlagen- und prozesstechnischen Einflussgrößen zu betrachten, wie Prozesstemperatur, Prozessdruck, Stoffinventar, erwartete Häufigkeit der Freisetzung, zu berücksichtigender Freisetzungsmassenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit (beispielsweise bestimmt durch die Auslegung eines Sicherheitsventils, die Förderleistung einer Pumpe bzw. eines Verdichters, den Druckverlust in der Auslassleitung).
 - Zudem sind die baulichen Gegebenheiten des Auslasses und dessen Umgebung sowie des Standortes zu ermitteln. Hierzu zählen neben den geometrischen Bedingungen, wie beispielsweise Auslasshöhe über Erdgleiche, Nennweite der Auslassmündung, Auslassrichtung (vertikal/horizontal), auch die auf die Stoffausbreitung einflussausübenden baulichen Gegebenheiten, wie Gebäude oder Anlagenteile in der Nähe des Auslasses, welche die Windanströmung des Auslasses und/oder die Ausbreitung des freigesetzten Gefahrstoffes beeinflussen können, sowie standortspezifische Randbedingungen, wie beispielsweise mittlere Windgeschwindigkeit, Bodenrauigkeit und Luftfeuchtigkeit.
3. Festlegung und Berechnung der für die Brand- und Explosionsgefahr maßgeblichen Freisetzungsszenarien
 - Anhand der in Schritt 1 festgelegten repräsentativen Gefahrstoffe und der in Schritt 2 ermittelten Randbedingungen, die die Freisetzung der Gefahrstoffe beschreiben, sind die zu berechnenden Freisetzungsszenarien festzulegen, so dass der Gefahrenbereich abdeckend ermittelt werden kann.

- Ferner ist ein für die festgelegten Freisetzungsszenarien geeignetes Berechnungsmodell auszuwählen und fachkundig anzuwenden. Hierbei ist z. B. anhand der Austrittsgeschwindigkeit (Impuls behaftet ja/nein), Auslassrichtung sowie der Umgebungssituation (Strömungshindernisse im Freistrah, Gebäude/Anlagen in unmittelbarer Nähe) zu bewerten, ob und welches Empirische- oder Integral-Modell geeignet ist, die Freisetzung adäquat zu beschreiben, oder ob die Anwendung komplexerer Modelle, wie beispielsweise CFD, erforderlich ist.

4. Auswertung der berechneten Freisetzungsszenarien

- Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse sind in Abhängigkeit der Gefährdung geeignete Beurteilungsgrenzwerte zugrunde zu legen.
- Zur Festlegung explosionsgefährdeter Bereiche sind beispielsweise berechnete Isokonturen auf Basis der unteren Explosionsgrenze auszuwerten. Um nicht vermeidbare Unsicherheiten aus der Festlegung der Randbedingungen zu berücksichtigen, sollte der explosionsgefährdete Bereich mindestens anhand der Kontur entsprechend einer Konzentration von 50 % der unteren Explosionsgrenze festgelegt werden. Bei einer ungehinderten Abströmung des Gefahrstoffes zur Atmosphäre hat sich dieser Sicherheitszuschlag als ausreichend konservativ bewährt. Die Festlegung der Zonengeometrie sollte auf Basis der Berechnungsergebnisse in Form von leicht verständlichen geometrischen Körpern, wie beispielsweise einer Kugel, einem Zylinder oder einem Kegelstumpf, erfolgen. Eine komplexe Zonengeometrie, wie beispielsweise eine Ellipse, die eine berechnete Freistrahkontur wiedergeben soll, kann in der Praxis zu Missverständnissen führen, da diese innerhalb der Anlage durch das Betriebspersonal in der Regel nicht leicht nachvollzogen werden kann, so dass das Schutzziel der eindeutigen Ausweisung eines explosionsgefährdeten Bereiches mit den dort erforderlichen Schutzmaßnahmen nicht erreicht werden kann.
- Zur Festlegung des Gefahrenbereiches bei der Betrachtung eines möglichen Brandes sind die Beurteilungsgrenzwerte in Abhängigkeit des zu schützenden Gutes (Personen, Gebäude, Anlagenteile) heranzuziehen. Allgemein anerkannt ist ein Grenzwert für die Bestrahlungsstärke von $1,6 \text{ kW/m}^2$ zur Beurteilung einer Personengefährdung sowie 8 kW/m^2 zur Beurteilung einer Gebäudegefährdung. Näheres kann beispielweise dem Statuspapier [6] im Literaturverzeichnis entnommen werden.
- Zur Festlegung des Gefahrenbereiches bei der Betrachtung einer möglichen Explosion sind die Beurteilungsgrenzwerte analog zur Gefährdung durch einen Brand in Abhängigkeit des zu schützenden Gutes heranzuziehen. Allgemein anerkannt ist ein Grenzwert für den Explosionsüberdruck von $0,05 \text{ bar}$ zur Beurteilung einer Personengefährdung infolge von Glasbruch sowie $0,1 \text{ bar}$ zur Beurteilung von strukturellen Gebäudeschäden. Näheres kann beispielweise dem Statuspapier [6] im Literaturverzeichnis entnommen werden.

5. Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung

- Die in den dargelegten Punkten 1 – 4 zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung ermittelten Randbedingungen, gewählten Berechnungsmodelle, erzielten Berechnungsergebnisse und herangezogenen Auswertungsgrundlagen sind im Detail schriftlich zu dokumentieren, so dass die Festlegung der Gefahrenbereiche durch Dritte nachvollziehbar ist.
- Die Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung erfolgt in der Regel im Rahmen des Explosionsschutzdokumentes und kann beispielsweise als Ergebnisbericht im Anhang des Explosionsschutzdokumentes geführt werden.

6 Qualifikationsprofil

Es muss sichergestellt sein, dass eine fachgerechte und fachkundige Anwendung der verwendeten Berechnungsmethoden erfolgt, um die Anforderung der Gefahrstoffverordnung zu erfüllen. Hierzu ist eine entsprechende Ausbildung und Weiterbildung des Anwenders mit dem jeweiligen Softwarepaket erforderlich. Gleichzeitig muss er dazu imstande sein, eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse vornehmen zu können.

Folgende Möglichkeiten sind als Beispiele für den Nachweis einer ausreichenden Qualifikation anzusehen:

- Bestätigung über eine längere Arbeit mit der entsprechenden Software (z. B. ein Jahr) unter Anleitung eines erfahrenen Anwenders oder
- dezidierte Ausbildung in der Betätigung der entsprechenden Software (z. B. Schulung beim Hersteller) oder
- Nachweis, dass veröffentlichte Berechnungsergebnisse nachvollzogen werden können.

7 Fazit

Die Ermittlung von explosionsgefährdeten Bereichen mittels verschiedener Modelle und die Anwendung von darauf basierenden kommerziellen Programmen oder veröffentlichten Verfahren erfordert eine detaillierte Fachkenntnis der Modelle, der Programme und Verfahren. Die Ausführungen bieten eine Hilfestellung, welche Modelle, Programme und Verfahren für den zu betrachtenden Anwendungsfall geeignet sein können. Zudem wird der programm-/verfahrensunabhängige Ablauf zur Ermittlung der explosionsgefährdeten Bereiche beschrieben. Mithilfe des Qualifikationsprofils kann ermittelt werden, inwiefern die notwendige Qualifikation intern oder extern vorliegt.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Technischer Hinweis - Merkblatt DVGW G 442 (M), Explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre an Gasanlagen, Juli 2015.
- [2] J. Gummer, S. Hawksworth, HSE RR615 Spontaneous ignition of hydrogen, 2008.
- [3] S. Zhou, Z. Luo, T. Wang, M. He, R. Li, B. Su, „Research progress on the self-ignition of highpressure hydrogen discharge - A review.,“ *International Journal of Hydrogen Energie* 47, 2022.
- [4] S. Jallais, E. Vyazmina, D. Miller, J.K. Thomas, „Hydrogen jet vapor cloud explosion: A Model for predicting blast size and application to risk assessment,“ *Process Safety Progress*, Vol.37, No.3. S. 397- 410, 2018.

- [5] Gefährdungsbereiche an Leitungen zur Atmosphäre von Gasanlagen (DVGW-Innovationsprogramm Wasserstoff (G 202225)).
- [6] Statuspapier „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzen in der Prozessindustrie – Methodenübersicht und industrielle Anwendung“ ProcessNet, 2017.
- [7] Henk W.M. Witlox*, Maria Fernandez, Mike Harper, Adeyemi Oke, Jan Stene, Yongfu Xu, „Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere,“ *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 55, S. 457–470, 2018.
- [8] B. Schalau, S. Schalau, „Wasserstoff-Freisetzen aus Ausbläsern,“ *Technische Sicherheit* 13, 2023.
- [9] V. Schröder, E. Askar, T. Tashqin, A. K. Habib, Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen", Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2539, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2016.
- [10] Daubech, Un-ignited and ignited high pressure hydrogen releases: Concentration-turbulence mapping and overpressure effects, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 36 (2015), 439-446.
- [11] Arbeitsgremium K 235, Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen" DIN EN IEC 60079-10-1 "Explosionsgefährdete Bereiche: Einteilung der Bereiche - Gasexplosionsgefährdete Bereiche, VDE und DIN, Februar 2022.
- [12] T. Möller, Explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre von Wasserstoff-Anlagen, <https://exinfos.de/wp-content/uploads/2022/10/Explosionsgefahrdete-Bereiche-Wasserstoff-Anlagen.pdf>, 2022.

Bildnachweis

Die gezeigten Bilder wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt von:

- Abbildung 1 – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein

Herausgeber

Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Glinkastraße 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
Fax: 030 13001-9876
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de

Sachgebiet Explosionsschutz
im Fachbereich Rohstoffe und chemische Industrie (RCI)
der DGUV www.dguv.de

Die Fachbereiche der DGUV werden von den Unfallkassen, den branchenbezogenen Berufsgenossenschaften sowie dem Spitzenverband DGUV selbst getragen. Für den Fachbereich RCI ist die BG RCI der federführende Unfallversicherungsträger und damit auf Bundesebene erster Ansprechpartner in Sachen Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit für Fragen zu diesem Gebiet.

An der Erarbeitung dieser Fachbereich AKTUELL haben mitgewirkt:

- Ursula Aich
- Rubens Ballenweg
- Dr. Bernd Broeckmann
- Erik Franke
- Dr. Rüdiger Gregel
- Dr. Klaus Hermann
- Jürgen Lehmann
- Dr. Arnas Lucassen
- Jörg Mayer
- Dr. Torben Möller
- Oliver Odenwald
- Manuel Osburg
- Björn Poga
- Matthias Reinecke
- Dr. Bernd Schalau
- Dr. Arnd Schmücker
- Julius Schwager
- Dr. Albert Seemann
- Dr. Ronald Zinke