

# **Explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre von Wasserstoff-Anlagen**

## **Abschlussarbeit**

von  
Torben Möller

Abschlussarbeit zur Ausbildung zum Fachmanager Explosionsschutz

Ausbildungsstätte: Dyrba Explosionsschutz Bildung und Beratung  
Sankt-Rochus-Allee 25  
76669 Bad Schönborn

Kurs: 04/2021

Autor: Dipl.-Ing. (FH) Torben Möller  
Ingenieurbüro Hannweber GmbH  
Bertolt-Brecht-Allee 24  
01309 Dresden

Datum: 3. Januar 2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Zielstellung</b>	<b>1</b>
<b>2 Einführung</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen der Zoneneinteilung .....	3
2.2 Funktion und Aufbau von Entspannungssystemen.....	4
<b>3 Verfahren zur Ermittlung der Ausdehnung von Ex-Bereichen</b>	<b>6</b>
3.1 Bestimmung nach DVGW-Merkblatt G 442.....	6
3.2 Abschätzung der Zone nach DIN EN 60079-10-1.....	7
3.3 Stationäres Strömungsmodell für Entspannungssysteme.....	10
3.4 Dispersion von Gasen in der Atmosphäre .....	12
<b>4 Vergleich der Verfahren anhand von Berechnungsbeispielen</b>	<b>14</b>
4.1 Lieferleistung eines Erdgasverdichters.....	14
4.2 Entspannungssystem mit vertikaler Freisetzungsrictung.....	16
4.3 Horizontale Freisetzung über Grund.....	19
4.4 Vergleich der Freisetzung von Wasserstoff und Erdgas.....	20
<b>5 Fazit und Ausblick</b>	<b>22</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>25</b>

# Symbolverzeichnis

## Formelzeichen

Symbol	Bedeutung
$A$	Fläche normal zur Strömung
$c$	Volumenkonzentration
$c_p$	isobare spez. Wärmekapazität
$d$	Durchmesser (Leitung oder Ausbläser)
$H$	Höhe des explosionsgefährdeten Bereichs
$h$	Abstand der Mündung des Ausbläsert bis Unterkante Ex-Bereich
$k$	Sicherheitsfaktor zur unteren Explosionsgrenze
$L$	Länge der Leitung
$\dot{m}$	Massenstrom bzw. Freisetzungsrare
$p$	Druck
$p_e$	statischer und dynamischer Druck am Ausgang des Entspannungssystems
$R, r$	Radius, Koordinate über dem Radius
$R_i$	spezifische Gaskonstante
$s$	Koordinate für den Abstand zur Freisetzungsquelle
$T$	Temperatur
$UEG$	untere Explosionsgrenze
$w$	Strömungsgeschwindigkeit
$\zeta$	Widerstandsbeiwert
$\kappa$	Isentropenexponent
$\mu$	Ausflusszahl
$\pi$	Druckverhältnis
$\rho$	Gasdichte
$\varphi$	Geschwindigkeitsbeiwert
$\psi$	Kontraktionszahl
$\Psi$	Ausflussfunktion

## Indizes

Symbol	Bedeutung
0	Bereich vor der Drosselstelle (Reservoir)
1	Bereich vor dem Ausbläser
2	Bereich nach der Drosselstelle
$a$	Austritt
$B$	Drosselstelle (z. B. Blende)
$krit$	kritischer Wert
$max$	maximaler Wert
$s$	isentropie Zustandsänderung
$u$	Umgebung (Atmosphäre)



# 1 Einleitung und Zielstellung

Explosionen können zu erheblichen Personen- und Sachschäden führen und sogar die Existenz eines Unternehmens gefährden. Nicht nur im Bereich der Energietechnik, der chemischen Industrie oder des Bergbaus müssen Explosionsgefahren betrachtet werden, sondern auch in weiten Bereichen der verarbeitenden Industrie.

Das Ziel des Explosionsschutzes ist primär die Bildung explosionsfähiger Gemische innerhalb und in der Umgebung von Anlagen oder Anlagenteilen zu vermeiden. Dieses Schutzziel kann durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden, wie z. B. der Einsatz nicht brennbarer Stoffe (Substitution), durch eine auf Dauer technisch dichte Bauweise, durch natürliche Lüftungsmaßnahmen, oder durch organisatorische Maßnahmen (z. B. Beseitigung von Staubablagerungen). Wenn diese Maßnahmen nicht ausreichen, muss geprüft werden, ob durch weitere technische Maßnahmen, die überwacht und geprüft werden müssen, die Bildung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre sicher verhindert werden kann. Beispiele hierfür sind technische Lüftungsmaßnahmen (Absaugung oder Raumlüftung) oder die Inertisierung des Gemisches z. B. mit Stickstoff oder Kohlendioxid.

Leitungen zur Atmosphäre setzen bestimmungsgemäß brennbare Gase wie Erdgas oder Wasserstoff frei, um im Inneren der Anlagen den Druck konstant zu halten oder um den Prozessdruck (bestimmungsgemäß oder im Fehlerfall) abzubauen. Das Ziel des Explosionsschutzes erweitert sich hierbei auf die Vermeidung von wirksamen Zündquellen. Die Einteilung explosionsfähiger Bereiche in Zonen ist dabei ein etabliertes Konzept zur Ableitung des Umfangs der zu ergreifenden Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung in Abhängigkeit von der Häufigkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre.

Werden Zündquellen entsprechend der Zoneneinteilung sicher vermieden, sind keine weiteren konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen erforderlich. Für die Einteilung in Zonen für Abblase-, Entspannungs-, oder Atmungsleitungen können Hinweise aus dem DVGW-Regelwerk, dem Regelwerk der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), den Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS), den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) oder einschlägigen Veröffentlichungen als Erkenntnisquelle dienen. Für explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Erdgasanlagen wird in der EX-RL Beispielsammlung (DGUV Regel 113-001) [7] auf das DVGW G 442 Merkblatt [5] verwiesen. Dieses DVGW-Merkblatt beinhaltet Informationen zur Ermittlung der Geometrie und räumlichen Ausdehnung von Bereichen, in denen gefährliche explosionsfähige Atmosphäre an Austrittsöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre auftreten kann.

Für explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre von Wasserstoff-Anlagen existieren keine vergleichbaren Berechnungsvorschriften. Eine Einzelfallbetrachtung, z. B. mittels numerischen- oder labortechnischen Untersuchungen ist zeitaufwendig und somit kostenintensiv. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Abschätzung

der Zonenausdehnung an Ausblaseöffnungen für Wasserstoff-Anlagen. Verschiedene Methoden sollen dazu ermittelt und mit der Methoden nach dem DVGW G 442 Merkblatt für die Anwendung mit Erdgas verglichen werden. Aus diesen Erkenntnissen sollen möglichst einfache Berechnungsmethoden für die Anwendung mit Wasserstoff abgeleitet werden.

# 2 Einführung

## 2.1 Grundlagen der Zoneneinteilung

Die Richtlinie 1999/92/EG (auch bekannt als ATEX 118a und später ATEX 137) [10] definiert die Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können. Diese Europäische Richtlinie wurde 2002 im Rahmen der Betriebssicherheitsverordnung in deutsches Recht umgesetzt. Die Anforderungen zum betrieblichen Explosionsschutz werden sowohl durch die Gefahrstoffverordnung, als auch durch die Betriebssicherheitsverordnung geregelt. Dabei ist der grundlegende Explosionsschutz in der Gefahrstoffverordnung verankert, während die Prüfungen durch die Betriebssicherheitsverordnung geregelt werden.

Der Arbeitgeber hat auf Grundlage einer Gefährdungsbeurteilung Maßnahmen zu ergreifen, um die Sicherheit der Beschäftigten zu gewährleisten. Gefährdungen durch gefährliche explosionsfähige Gemische müssen dabei gesondert in einem Explosionsschutzdokument dokumentiert werden. Zu den Schwerpunkten der Gefährdungsbeurteilung bei Explosionsgefahr zählen die fünf Stufen nach Dyrba [6], welche auch iterativ angewendet werden können:

1. Ermittlung der Explosionsfähigkeit
2. Zoneneinteilung
3. Ermittlung wirksamer Zündquellen
4. Abschätzung der Auswirkung einer Explosion
5. Festlegung konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen

Eine Explosionsgefahr besteht, wenn brennbare Gase, Flüssigkeiten oder Stäube hergestellt, gelagert oder verarbeitet werden und dabei Gase, Dämpfe, Nebel oder Stäube im Gemisch mit Luft auftreten. Zu einer Explosion kommt es, wenn gleichzeitig neben dem brennbaren Stoff auch (Luft-)Sauerstoff, eine entsprechende Gemischbildung, sowie eine wirksame Zündquelle vorliegen. Bestimmte explosionsfähige Gemische können auch explosionsartig reagieren ohne das Vorhandensein von Sauerstoff (z. B. Chlorknallgas). Nur unter atmosphärischen Bedingungen (0,8 bis 1,1 bar und -20 bis 60 °C) liegt eine explosionsfähige Atmosphäre vor, ansonsten handelt es sich um ein explosionsfähiges Gemisch.

Kann das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre oder Gemische nicht sicher verhindert werden, müssen Schutzmaßnahmen ergriffen werden, um eine Entzündung zu verhindern. Die Grundlage zur Festlegung des Umfangs dieser Schutzmaßnahmen bildet die Zoneneinteilung. Ziel des Verfahrens zur Einteilung der Umgebung oder des Inneren von Anlagen oder Anlagenteilen, ist die Reduzierung des Umfangs der zu ergreifenden Maßnahmen. Explosionsgefährdete Bereiche (Ex-Bereiche) werden nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens

gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre (g. e. A.) wie folgt in Zonen eingeteilt (s. [6]):

- **Zone 0:** Ständiges Vorhandensein, über lange Zeiträume oder häufig,
- **Zone 1:** Tritt bei Normalbetrieb gelegentlich auf,
- **Zone 2:** Normalerweise nicht vorhanden oder aber nur kurzzeitig.

Aus dieser Einteilung ergibt sich der Umfang der zu ergreifenden Maßnahmen. In Anhang II der Richtlinie 1999/92/EG werden dazu Kriterien angegeben für die Auswahl von Geräten und Schutzsystemen auf Grundlage der Zoneneinteilung. Grundsätzlich sollte das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre, z. B. mittels technischer und organisatorischer Maßnahmen vermieden werden. Wo dies nicht möglich ist, sollte die Ausdehnung der verbleibenden Ex-Bereiche zumindest möglichst klein sein. Die Einteilung des Ex-Bereichs in eine Zone, sowie dessen räumliche Ausdehnung sind bei Wasserstoff-Anlagen notwendig, um Maßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen zu treffen und somit ein gefahrloses Ableiten des brennbaren Gases über Leitungen zur Atmosphäre zu ermöglichen.

## 2.2 Funktion und Aufbau von Entspannungssystemen

Freigesetzte Gasmengen an Gasanlagen werden durch Atmungsleitungen, Abblaseleitungen oder Entspannungsleitungen an die Atmosphäre abgeleitet. Triebkraft des Ausströmvorgangs ist der erhöhte Druck im Inneren der Anlage (Reservoirdruck) gegenüber der Umgebung. Es kommt zu einer Gasfreisetzung bei Abbau des Innendrucks, bei der sicherheitsgerichteten Begrenzung gegen unzulässigen Überdruck, oder im Fehlerfall bei der Regelung des Gasdrucks. Entsprechend der Funktionsweise können Leitungen zur Atmosphäre in folgende Gruppen eingeteilt werden:

1. Abblaseleitungen dienen der automatischen Gasfreisetzung durch Sicherheitseinrichtungen, wie z. B. Sicherheitsabblaseventile (SBV). Zum Schutz der Bauteile vor einem unzulässigen Innendruck wird Gas bei einem definierten oberen Grenzwert abgeblasen (Ansprechdruck).
2. Regelgeräte oder Sicherheitseinrichtungen (Gas-Druckregelgeräte GDR, Sicherheitsabsperrentile SAV, Druckmessgeräte) werden über Atmungsleitungen mit der Atmosphäre verbunden. Sie dienen dem Druckausgleich bei atmosphärischen Druckänderungen und bei bestimmungsgemäßer Stellungsänderung der Vergleichermembran. Die Atmungsleitungen werden bei Störungen gasführend. [9]
3. Entspannungsleitungen zur manuellen Gasfreisetzung.

Abblase- und Entspannungsleitungen dürfen nicht mit Atmungsleitungen zusammengeführt werden [9]. Den prinzipiellen Aufbau eines Entspannungssystems zeigt Abbildung 1. Vor dem Ventil liegt der Innendruck an, der Reservoirdruck  $p_0$ . In Strömungsrichtung folgt nach dem Ventil die Leitung zur Atmosphäre mit dem Druck am Ausgang  $p_e$ . Bei der überkritischen Strömung wird der Druck erst nach der Ausblaseöffnung vollständig abgebaut, da die



Strömungsgeschwindigkeit auf die Schallgeschwindigkeit begrenzt ist. Bei der unterkritischen Strömung entspricht der Druck am Ausgang dem Umgebungsdruck ( $p_e = p_u$ ), bei der überkritischen Strömung ist der Druck  $p_e$  immer größer als der Atmosphärendruck.

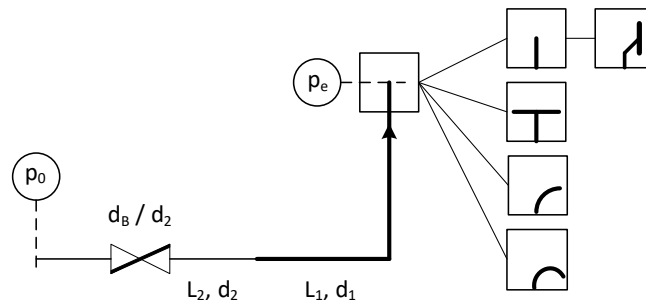


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Entspannungssystems mit Ventil und ggf. weiteren Drosselstellen, den Leitungsabschnitten mit unterschiedlichem Querschnitt, sowie dem Ausbläser am Ende der Leitung. Die Ausbläserarten unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Richtung der Freisetzung.

Zwischen dem Ventil und dem Ausbläser befindet sich die Leitung zur Atmosphäre. Dabei kann die Leitung über der gesamten Länge einen konstanten Querschnitt aufweisen, oder sich nach dem Abschnitt der Länge  $l_2$  vom Durchmesser  $d_2$  auf den Durchmesser  $d_1$  erweitern (z. B. aufgrund einer Sammelleitung). Für den Ausbläser muss hinsichtlich der Zoneneinteilung die Strömungsrichtung und die Anzahl der Ausblaseöffnungen berücksichtigt werden. Das DVGW-Merkblatt G 442 [5] unterscheidet hierbei in drei Typen von Ausbläsern:

- Typ A: Vertikal aufwärts gerichtete Ausbläser (z. B. „Lambda-Ausbläser“),
- Typ B: Horizontales Ausblasen über ein T-Stück mit identischen Durchmessern („T-Ausbläser“),
- Typ C: Horizontales Ausblasen über nur eine Austrittsöffnung („Einseitiger Ausbläser“).

Neben den genannten Typen sind prinzipiell weitere Varianten möglich, z. B. flexible Schlauchverbindungen oder diagonal gerichtete Ausbläser.

Nach dem Ausbläser tritt das Gas als Strahl aus, wobei sich der Strahl zum Abbau des Druckes (auf Umgebungsdruck) erweitert. Der Ex-Bereich nach dem Ausbläser ist definiert über die untere Explosionsgrenze des brennbaren Mediums ( $UEG$ ). Außerhalb des Ex-Bereichs wird 50 % der  $UEG$  unterschritten (Ausdehnung bis zur  $UEG/2$ -Konzentrationskontur). Die Geometrie des Ex-Bereichs kann dabei z. B. sphärisch oder zylinderförmig ausgeführt sein. Einflussgrößen auf die Geometrie haben, neben der Austrittsgeschwindigkeit und der Druckdifferenz zur Umgebung, die Vermischung und Ablenkung des Strahls durch vorhandene Hindernisse sowie auftretende Windverhältnisse.

# 3 Verfahren zur Ermittlung der Ausdehnung von Ex-Bereichen

## 3.1 Bestimmung nach DVGW-Merkblatt G 442

Das vom Projektkreis Explosionsschutz in der Gasversorgung erstellte DVGW-Merkblatt G 442 [5] beinhaltet Informationen zur Ermittlung der Geometrie und räumlichen Ausdehnung von Bereichen, in denen eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre an Austrittsöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre auftreten kann. Ziel ist die Bestimmung der Ausdehnung des explosionsgefährdeten Bereiches.

Mit dem Verfahren können die Höhe und der Radius der Ex-Bereiche für einfache Entspannungssysteme anhand von Tabellen und Diagrammen 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 Ex-Bereiches gestellt werden, kann das Verfahren nach [5] nicht angewendet werden und die Ausdehnung der Ex-Bereiche muss auf eine andere Weise ermittelt werden.

Das DVGW-Merkblatt gilt für Anlagen, die mit Gasen der 2. Gasfamilie (Erdgas bzw. Naturgas hauptsächlich aus Methan bestehend) betrieben werden, wie:

- Gas-Druckregel- und-Messanlagen (GDRM),
- Brenngasverdichter,
- Erdgastankstellen.

Das Verfahren zur Ermittlung der Ex-Bereiche ist weiterhin 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 (s. Ausbläser Typen A bis C n. Kap. 2.2). Weiterhin sind die Ergebnisse der Berechnungsmethode nur dann zutreffend, wenn innerhalb des ermittelten Ex-Bereiches keine Beeinflussungen, z. B. durch Gebäude oder Außenwände, vorliegen.

Bei der Anwendung des Verfahrens müssen zunächst die Geometrie des Entspannungssystems, der Ausbläser Typ und der Reservoirdruck  $p_0$  bekannt sein. Im ersten Schritt wird, anhand des Ausbläser Typs und den dimensionslosen Kennzahlen für die Geometrie, der Ausgangsdruck  $p_e$  ermittelt (hier: Summe aus statischem und dynamischem Druck):

$$\frac{p_e}{p_0} = f\left(\frac{d_B}{d_2}, \frac{d_1}{d_2}, \frac{L_1}{d_1}, \frac{L_2}{d_2}\right) \quad (1)$$

Die Hilfsfunktion  $f$  wird im Wesentlichen aus Tabellenwerten erhalten. Das Verhältnis  $\frac{d_B}{d_2}$  repräsentiert die Drosselstelle mit dem Strömungswiderstand aufgrund der entsprechenden Querschnittsverengung. Dabei können jedoch keine Drosselstellen mit beliebigem Widerstand berücksichtigt werden. Es besteht die Möglichkeit Blenden mit Durchmesser-Verhältnissen von 0,2 oder 0,5 zu wählen, oder keine Drosselstelle zu berücksichtigen (z. B. für einen Kugelhahn). Eine Blende mit einem Durchmesser-Verhältnis von 0,5 besitzt nach [5] einen etwas geringeren Widerstand als ein marktübliches Sicherheitsabblaseventil (SBV), eine Blende mit dem Durchmesser-Verhältnis 0,2 besitzt den gleichen Widerstand wie die in „EO 12“-Atmungsleitungen häufig eingesetzte Drossel mit einem Durchmesser von 2 mm.

Die Geometrie der Zonen ist für alle drei Ausbläser-Typen jeweils als gerader Zylinder mit vertikal laufender Mittelachse definiert. Mit dem ermittelten Ausgangsdruck nach Gl. (1) und dem Durchmesser des Ausbläsertyps wird die Höhe, der Radius und ggf. die Lage des Zylinders aus verschiedenen Diagrammen ermittelt. Die Lage der vertikalen Achse des zylindrischen Ex-Bereichs liegt bei allen Typen auf der Achse der vertikal verlaufenden Leitung.

Bei der Herleitung des Verfahrens wurde für die vertikal nach oben gerichtete Freisetzung (Typ A) angenommen, dass der Austrittsquerschnitt der Ausbläser in einer Höhe von 3 m liegt. Das Verfahren ist gültig für Austrittshöhen zwischen 1,5 und 15 m. Für die Höhe des Zylinders wurde die ungehinderte vertikale Ausdehnung der Gassäule bis zur UEG/2-Konzentrationskontur bei vernachlässigbarem Seitenwind berücksichtigt. Für den Radius des Zylinders wurde weiterhin die maximale radiale Auslenkung der Gassäule bei Windgeschwindigkeiten bis 15 m/s berücksichtigt, wobei hohe Windgeschwindigkeiten nach [5] auch zu einer besseren Durchmischung geführt haben und dadurch die größte Ausdehnung nicht zwangsläufig mit der höchsten Windgeschwindigkeit korreliert.

Bei den horizontalen Ausbläsern (Typen B und C) wurden Austrittshöhen von 3, 5 und 10 m separat betrachtet, um die zusätzlichen Effekte zu erfassen, die durch den Kontakt des Strahls mit dem Boden auftreten. Zwischen den Ergebnissen für die genannten Höhen darf linear interpoliert werden. Bei Freisetzungen in Höhen zwischen 10 m und 15 m sollen die Ergebnisse für 10 m verwendet werden, bei einer Austrittshöhe zwischen 1,5 m und 3 m gelten die für 3 m bestimmten Werte. Für die horizontalen Ausbläser wurden ebenfalls die Einflüsse der zunehmenden Windgeschwindigkeit mit berücksichtigt (Verteilung und Durchmischung). Hier ergeben sich die größten Abmessungen des Ex-Bereichs bei Windstille.

## 3.2 Abschätzung der Zone nach DIN EN 60079-10-1

Ist die Gasfreisetzung prozessbedingt begrenzt, kann das Verfahren für einfache Entspannungssysteme entsprechend dem DVGW-Merkblatt G 442 [5] nicht angewendet werden. Dies ist z. B. bei Verdichteranlagen der Fall. Die dem Verdichter nachgeschalteten Abblaseleitungen können maximal die Lieferleistung der Anlage freisetzen. Die Kapazität des angeschlossenen Entspannungssystems ist in der Regel wesentlich größer, als die mögliche Lieferleistung des vorgeschalteten Verdichters. Ex-Bereiche an Ausblaseöffnungen für Erdgastankstellen, die sich unter diesen Randbedingungen ergeben, müssen daher separat

ermittelt werden. Hierzu wird in [5] ein weiteres Verfahren angegeben. Aus dem Massenstrom des Verdichters und dem Leitungsquerschnitt kann die Ausdehnung des Ex-Bereichs für Erdgastankstellen aus Diagrammen ermittelt werden.

Ist die Art und Menge der Freisetzung bekannt, kann die Ausdehnung des Ex-Bereichs nach DIN EN 60079-10-1 [3] auf ähnliche Weise ermittelt werden. Der explosionsgefährdete Abstand kann dazu in Abhängigkeit der Freisetzungseigenschaft und der Gasfreisetzung (ungehinderte Strahlfreisetzung, diffusive Freisetzung mit verringertem Impuls, schwere Gase oder Dämpfe) aus einem Diagramm ermittelt werden, s. Abb. 2.

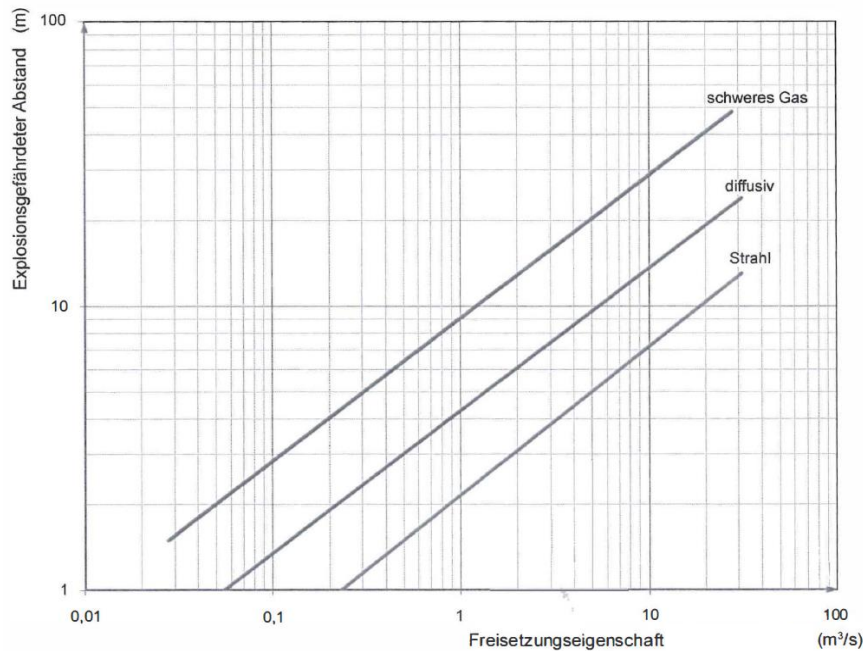


Abbildung 2: Abschätzung des explosionsgefährdeten Abstands nach DIN EN 60079-10-1 (Bild D.1) in Abhängigkeit der Art der Freisetzung und der Freisetzungseigenschaft. [3]

Das Diagramm für den explosionsgefährdeten Abstand basiert nach [3] auf ausgewählten numerischen Strömungssimulationen (CFD). Die Ergebnisse wurden für die Verwendung in der DIN EN 60079-10-1 angepasst. Für eine geringere Ausdehnung der Zone kann Abb. 2 nicht verwendet werden.

Die Freisetzungseigenschaft ist abhängig vom freigesetzten Massenstrom (Freisetzungsrate), sowie von der Dichte und der unteren Explosionsgrenze des verwendeten Gases bzw. Dampfes. Hierbei wird die Verteilung und die Ausdehnung der Zone bis zur  $UEG/2$ -Konzentrationskontur für unterschiedliche Medien berücksichtigt:

$$\text{Freisetzungseigenschaft} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot k \cdot UEG} \quad (2)$$

Der Faktor  $k \approx 0,5 \dots 1$  ist ein der  $UEG$  zugeordneter Sicherheitsfaktor. Ein niedriger Wert entspricht einer größeren Unsicherheit, insbesondere bei Gemischen mit unterschiedlicher Zusammensetzung. Für reine Stoffe wie Wasserstoff oder Methan, oder für bekannte Gemische

wie Erdgas, besteht keine Unsicherheit ( $k = 1$ ). Die UEG von Wasserstoff, Methan und von verschiedenen Erdgas-Mischungen (Hauptbestandteil Methan) ist in Tabelle 1 aufgeführt. Neben den Stoffeigenschaften ist die Berechnung der Freisetzungseigenschaft von der Freisetzungsrate, und damit wieder von der Ausführung des Entspannungssystems abhängig.

Tabelle 1: Untere Explosionsgrenze verschiedener Stoffe. Stoffdaten für Methan und Wasserstoff nach [2]. Für Erdgas ist der Volumenanteil an Methan in der Mischung in Klammern mit angegeben. Zusammensetzung und weitere Stoffwerte für Erdgas, s. Ruhrgas AG, Essen 2003 [4].

Stoff	UEG	Stoff	UEG
Wasserstoff	4,0 Vol-%	Erdgas-H (87,6 %, Mischgas)	4,2 Vol-%
Methan/Erdgas-H (99 %, Sibirien)	4,4 Vol-%	Erdgas-L (83,8 %, Niederlande)	4,7 Vol-%

Für die mit dieser Methode ermittelte Hauptausdehnung in Abhängigkeit der Freisetzungseigenschaft muss abschließend die Form des Ex-Bereichs festgelegt werden. Dabei kann der Ex-Bereich, der durch die Freisetzung erzeugt wird, aus einer Kombination von verschiedenen Formen erhalten werden, s. Abb. 3. Für den Bereich um Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre bietet sich eine zylindrische oder auch sphärische Geometrie an. Zum einen muss die Strahlfreisetzung in Richtung des Ausblasens berücksichtigt werden, zum anderen die Windgeschwindigkeit aus unterschiedlichen Richtungen.

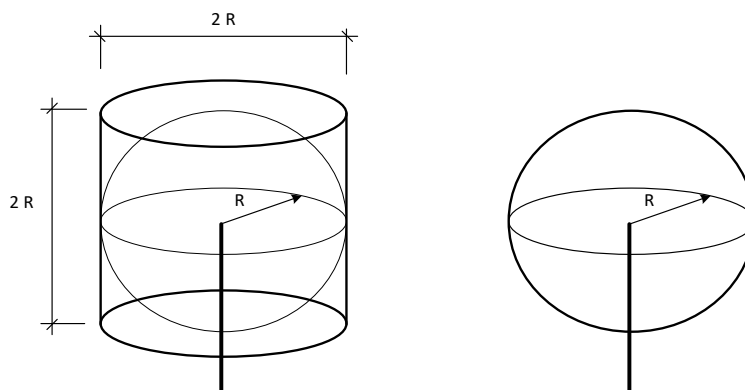


Abbildung 3: Mögliche Formen für explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre in Abhängigkeit der Hauptausdehnung (hier: Radius).

Neben der Hauptausdehnung des explosionsgefährdeten Bereichs, welche unter Abschätzung des explosionsgefährdeten Abstands nach Abb.2 bestimmt wird, können zusätzliche Ausdehnungen zur Berücksichtigung des Verhaltens der Freisetzungsquelle festgelegt werden. Die Anwendung von vereinfachten Methoden oder Unsicherheiten über die Art der Verteilung des Gases erfordern dabei immer eine konservativere (und damit größere) Zonenausdehnung.

### 3.3 Stationäres Strömungsmodell für Entspannungssysteme

Das Ausströmen aus einem Behälter durch eine dazu relativ kleine Öffnung ist prinzipiell immer ein instationärer Vorgang, da sich mit fortlaufender Zeit der Behälterdruck und damit die treibende Druckdifferenz ändern. Ein Berechnungsmodell für Freisetzungsraten müsste somit den transienten Verlauf des durch die Öffnung hervorgerufenen Druckentlastungsvorgangs als Randbedingung beinhalten. Diese Vorgehensweise ist jedoch aufwändig, da zusätzlich die Kenntnis des instationären Druckverlaufs im Behälter erforderlich ist.

Zu den Ergebnissen der Gasfreisetzung gibt das DVGW-Merkblatt [5] eine Anmerkung für kurzzeitige Ausströmvorgänge. Danach unterscheidet sich die Größe der Ex-Bereiche aufgrund einer kurzzeitigen Gasfreisetzung, z. B. für einige Sekunden über Sicherheitsabblaseventile, nur wenig von der bei stationärem Ausblasen. Bei der Bestimmung der Freisetzungsrates wird daher im Hinblick auf die freigesetzte Menge von einer konservativen Annahme eines während der gesamten Ausströmzeit konstanten Behälterinnendrucks vor der Ausströmöffnung ausgegangen. Der so berechnete Massenstrom ist dann immer größer als der tatsächlich auftretende, da der Druck im Behälter durch das ausströmende Gas stetig abnimmt. Berechnungsmodelle für die Freisetzungsrates in Abhängigkeit des instationären Druckverlaufs für unter Druck stehende Behälter finden sich z. B. in [8] oder [13].

Für den (quasi-)stationären Fall steht das Gas mit der Dichte  $\rho_0$  innerhalb des Systems unter konstantem Druck  $p_0$ . Durch Öffnen eines Ventils strömt das Gas durch die freie Anströmfläche  $A_n$  des Rohrleitungssystems und das Entspannungssystem setzt folgenden Massenstrom frei: [1]

$$\dot{m} = \mu A_a \Psi_s \sqrt{2 p_0 \rho_0} \quad (3)$$

Die Ausflusszahl  $\mu \leq 1$  beschreibt das Verhältnis zwischen der theoretischen Freisetzungsrates und der tatsächlich ausströmenden Gasmenge aufgrund von Druckverlusten (Geschwindigkeitsbeiwert), Strahleinschnürung (Kontraktionszahl) und Dichteänderung [1]. Wird die Ausflusszahl formal dem Ausströmoeffizienten nach [3] gleichgesetzt (hier als Merkmal der Freisetzungsoffnung), entspricht Gl. (3) den Berechnungsgleichungen (B.3) und (B.4) zur Abschätzung der Freisetzung von Gasen aus einem Behälter. Für die Bestimmung der Freisetzungsrates unterscheidet man zwischen der unterkritischen und der überkritischen Strömung, beschrieben durch die Ausflussfunktion:

$$\begin{aligned} \Psi_s &= \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left( \pi^{\frac{2}{\kappa}} - \pi^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)} & \text{für: } \pi > \pi_{krit} &= \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \\ \Psi_{s,max} &= \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}} & \text{für: } \pi = \frac{p_u}{p_0} \leq \pi_{krit} \end{aligned} \quad (4)$$

Die isentrope Ausflussfunktion  $\Psi_s$  steigt mit abnehmendem Druckverhältnis  $\pi$ , was nach Gl. (3) zu einer Erhöhung der freigesetzten Gasmenge führt. Bei Unterschreiten des kritischen Druckverhältnisses wird der Maximalwert der Ausflussfunktion in Abhängigkeit nur vom Isentropenexponenten  $\kappa$  erhalten. Der ausströmende Massenstrom bleibt unabhängig von der

Größe des Innendrucks  $p_0$ . Bei der kritischen Ausströmung ( $\pi = \pi_{krit}$ ) und der überkritischen Ausströmung ( $\pi < \pi_{krit}$ ) wird im Querschnitt am Austritt genau die Schallgeschwindigkeit erreicht. Im Gegensatz zur unterkritischen Strömung wird nicht der Umgebungsdruck aufgeprägt, sondern der Strahlendruck am Austritt ist größer als der Umgebungsdruck. Aufgrund des lokalen Druckgradienten kommt es zu Quergeschwindigkeitskomponenten senkrecht zur Ausströmachse und damit zu einem Aufplatzen des Strahls.

Bei der Abschätzung der Freisetzungsrates über den Ausströmungskoeffizienten nach [3] werden die Temperatur, der Druck, sowie die Geschwindigkeit am Austritt nicht berücksichtigt. Zudem geht die Drosselung der Strömungsgeschwindigkeit, welche einen erheblichen Einfluss auf die freigesetzte Gasmenge hat, nicht in die Berechnung ein. Die Ausflusszahl  $\mu$  ist ebenfalls von der Geometrie der Ausflussöffnung abhängig, beschrieben durch die Kontraktionszahl  $\psi$  aufgrund der Strahleinschnürung (Werte für verschiedene Ausflussöffnungen können aus Tafelwerken entnommen werden, z. B. in [1]). Weiterhin ist die Ausflusszahl abhängig von dem Geschwindigkeitsbeiwert  $\varphi$  aufgrund von Strömungsdruckverlusten und dem Dichteverhältnis zwischen dem isentropen und dem tatsächlichen (reibungsbefaheten) Ausströmvorgang:

$$\mu = \psi \frac{\rho_a}{\rho_{a,s}} \varphi = \psi \frac{p_a T_{a,s}}{p_{a,s} T_a} \sqrt{1 - \zeta} \quad (5)$$

Der Widerstandsbeiwert  $\zeta$  gibt den Druckabfall an, bezogen auf den Staudruck am Austritt bei reibungsfreier Strömung. Der Wert kann für verschiedene Einbauelemente (wie Blenden oder Ventile) der Literatur oder Herstellerangaben entnommen werden. Für die Berechnung des Druckabfalls bei der Gasströmung durch die Leitungen zur Atmosphäre muss zusätzlich die Dichteänderung längs der Rohrleitung mit berücksichtigt werden.

Tabelle 2: Berechnung der Zustandsgrößen am Austritt des Entspannungssystems für die kritische bzw. überkritische Strömung, s. [1].

Zustandsgröße	Reibungsfreie Expansion	Reibungsbehaftete Expansion
Druck	$p_{a,s} = p_0 \pi_{krit}$	$p_a = p_{a,s}$
Geschwindigkeit	$w_{a,s} = \sqrt{\kappa R_i T_{a,s}}$	$w_a = \varphi w_{a,s}$
Temperatur	$T_{a,s} = T_0 \frac{2}{\kappa + 1}$	$T_a = T_0 - \frac{w_a^2}{2 c_p}$
Dichte	$\rho_{a,s} = \rho_0 \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{1/\kappa - 1}$	$\rho_a = \frac{p_a}{R_i T_a}$

Die Berechnungsgleichungen für die Zustandsgrößen am Austritt des Entspannungssystems finden sich z. B. in [1]. Zusätzlich sind die wichtigsten Berechnungsgleichungen für die überkritische Strömung in Tabelle 2 zusammengefasst. Weitere Berechnungsgleichungen, auch für die polytrope Zustandsänderung oder dem Strömungsdruckverlust in Rohrleitungen bei kompressiblen Medien, finden sich in [1] oder [4].

### 3.4 Dispersion von Gasen in der Atmosphäre

In der Atmosphäre freigesetzte Gefahrstoffe werden durch den Wind mitgeführt und verdünnt. Verschiedene analytische Modelle erlauben eine Vorhersage des Transport- und Verdünnungsprozesses für verschiedene Freisetzungsszenarien und -bedingungen. Als Ergebnis wird die Konzentration (als Funktion der Zeit) in der Umgebung der Freisetzung erhalten. Somit ist auch die Bestimmung der Abmessung des Ex-Bereichs bis zur  $UEG/2$ -Konzentrationskontur möglich. Ziel der jüngsten wissenschaftlichen Arbeiten war nach [13] nicht die weitere Verbesserung der Theorie, sondern vor allem die Sammlung von experimentellen Daten zur Bestimmung der empirischen Konstanten im Formalismus. Den Input dieser Modelle liefern die Ergebnisse der Freisetzung für Entspannungssysteme (Freisetzungsquelle), wie in Kapitel 3.3 beschrieben.

Die passive Verteilung eines Gases in der Luft, sowie die Freisetzung mit sehr geringem Anfangsimpuls (z. B. über Schornsteine mittels freier Konvektion) kann beschrieben werden über das Gaußsche Fahnenmodell, s. [13]. Dieses Modell ist u. a. Grundlage der VDI Richtlinie 3783 Blatt 1 [12] zur Abschätzung der Ausbreitung störfallbedingter Freisetzungen und war Vorgänger das Lagrangeschen Ausbreitungsmodells der neuen TA Luft [11].

Gase, die mit hoher Geschwindigkeit freigesetzt werden, verursachen eine Strahlfreisetzung (s. Abb. 4). Solange die Geschwindigkeit innerhalb des Strahls im Vergleich zu den Geschwindigkeiten in der Umgebungsluft hoch ist, wird die Ausdehnung und Durchmischung des Strahls im Wesentlichen nur durch die Eigenschaften des Strahls selbst beeinflusst. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Strahl und der (als ruhig angenommenen) Umgebungsluft erzeugt feine Turbulenzen, die eine seitliche Ausbreitung des Strahls bewirken. Die Geschwindigkeit im Strahl nimmt ab (etwa umgekehrt proportional zum Abstand des Auslösepunkts). Schließlich wird die Geschwindigkeit so weit reduziert, dass eine passive Verteilung einsetzt.

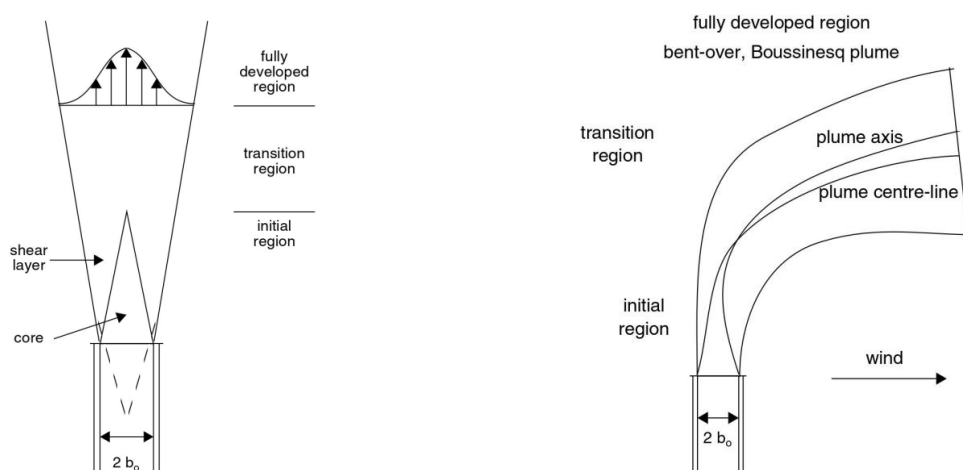


Abbildung 4: Mögliche Formen der Freisetzung von Gasen. Linke Grafik: Turbulente Strahlfreisetzung in ruhiger Luft, rechte Grafik: Abgasfahne in einer Querströmung. Darstellung nach [13].



Bei der Modellauswahl nach [13] wird zunächst wieder in schwere und leichtere (aufsteigende oder schwebende) Gase unterschieden. Für die Strahlfreisetzung muss weiterhin der auftretende Querstrom durch Wind berücksichtigt werden. Das Freistrahlmmodell kann nach [13] verwendet werden, wenn sichergestellt ist, dass der Seitenwind (bei vertikalem Austritt) die Abgasfahne nicht umbiegt (die Strahlgeschwindigkeit sollte die Umgebungsgeschwindigkeit um den Faktor 10 übersteigen). Die Richtung der Freisetzung ist vernachlässigbar, da die Trägheitskräfte gegenüber den Auftriebskräften dominieren.

Die Entfernung  $s = 12,5d$  von der Mündung bis zum Bereich der etablierten Strömung lässt sich aus dem Ort ableiten, an dem die Strahlprofile in seitlicher Richtung gaußförmig werden. Hier gilt näherungsweise für die Geschwindigkeit und die Konzentration, s. [13]:

$$w(s, r) = w_a \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_a}} 3,1 \frac{d}{s} \exp\left(-94 \left(\frac{r}{s}\right)^2\right) \quad (6)$$

$$c(s, r) = c_a \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_a}} 2,5 \frac{d}{s} \exp\left(-57 \left(\frac{r}{s}\right)^2\right) \quad (7)$$

Das Modell ist nicht gültig in der Nähe der Freisetzungsquelle. Zudem kann das relativ einfache Berechnungsmodell nur angewendet werden für Geschwindigkeiten deutlich unterhalb der Schallgeschwindigkeit (weniger als ein Drittel). Weitere Freisetzungsmodelle werden in [13] angegeben.

# 4 Vergleich der Verfahren anhand von Berechnungsbeispielen

## 4.1 Lieferleistung eines Erdgasverdichters

Bei der Bestimmung der Zonenausdehnung von Anlagen zur Erdgasverdichtung wird davon ausgegangen, dass über das Sicherheitsventil nur der Volumen- bzw. der Massenstrom abgeblasen werden kann, der vom Kompressor nachgeliefert wird. Das DVGW-Merkblatt G 442 gibt dazu die Höhe und den Radius eines zylindrischen Bereichs an, für eine vertikale Freisetzungsrichtung (Typ A) mit bis zu 360 kg/h. Der Druck am Austritt beträgt nach [5] maximal 1,5 bar, was nach Gl. 4 einer unterkritischen Strömung entspricht.

Für den Vergleich mit der Methode nach DIN EN 60079-10-1 setzen beide Verfahren Erdgas in definierter Menge frei (Mischgas H,  $\rho = 0,82 \text{ kg/m}^3$ ,  $UEG = 4,2 \%$ , s. [4]). Als Freisetzungsraten werden 50, 200 und 350 kg/h gewählt. Die Ergebnisse für die Ausdehnung der Ex-Bereiche nach beiden Methoden sind in Tabelle 3 zusammengefasst und in Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 3: Ausdehnung der zylindrischen Ex-Bereiche (Radius Grundfläche und Mantelhöhe) in Abhängig der Freisetzungsrates bzw. Lieferleistung eines Erdgasverdichters, ermittelt nach DVGW-Merkblatt G 442 [5] und DIN EN 60079-10-1 [3].

Freisetzungsrates		50 kg/h	200 kg/h	350 kg/h
Freisetzungseigenschaft		0,4 m <sup>3</sup> /s	1,6 m <sup>3</sup> /s	2,8 m <sup>3</sup> /s
Radius nach	EO 28 ( $d = 0,024 \text{ m}$ )	1,8 m	1,7 m	1,6 m
DVGW-Merkblatt	DN 50 ( $d = 0,0545 \text{ m}$ )	2,8 m	3,0 m	3,1 m
Radius nach	Strahlfreisetzung	2 m	3 m	4 m
DIN 60079-10-1	Diffuse Freisetzung	3 m	6 m	8 m
Höhe nach	EO 28 ( $d = 0,024 \text{ m}$ )	6,7 m	8,2 m	9,9 m
DVGW-Merkblatt	DN 50 ( $d = 0,0545 \text{ m}$ )	5,9 m	7,3 m	8,9 m
Höhe ( $H = 2 R$ ),	Strahlfreisetzung	4 m	6 m	8 m
DIN 60071-10-1	Diffuse Freisetzung	6 m	12 m	16 m

Die Untersuchungen nach DVGW-Merkblatt G 442 wurden für drei unterschiedliche Rohrendurchmesser durchgeführt, wobei die Ergebnisse des größten und kleinsten Ausbläserdurchmessers zum Vergleich in Abbildung 5 dargestellt sind. Bei gleichbleibender Freisetzungsrates führt ein kleinerer Durchmesser nach der Kontinuitätsgleichung

$$w_a = \frac{\dot{m}}{\rho_a A_a} = \frac{4 \dot{m}}{\rho_a \pi d^2} \quad (8)$$

zu einer höheren Austrittsgeschwindigkeit des Gases. Durch den stärkeren Impuls wird der

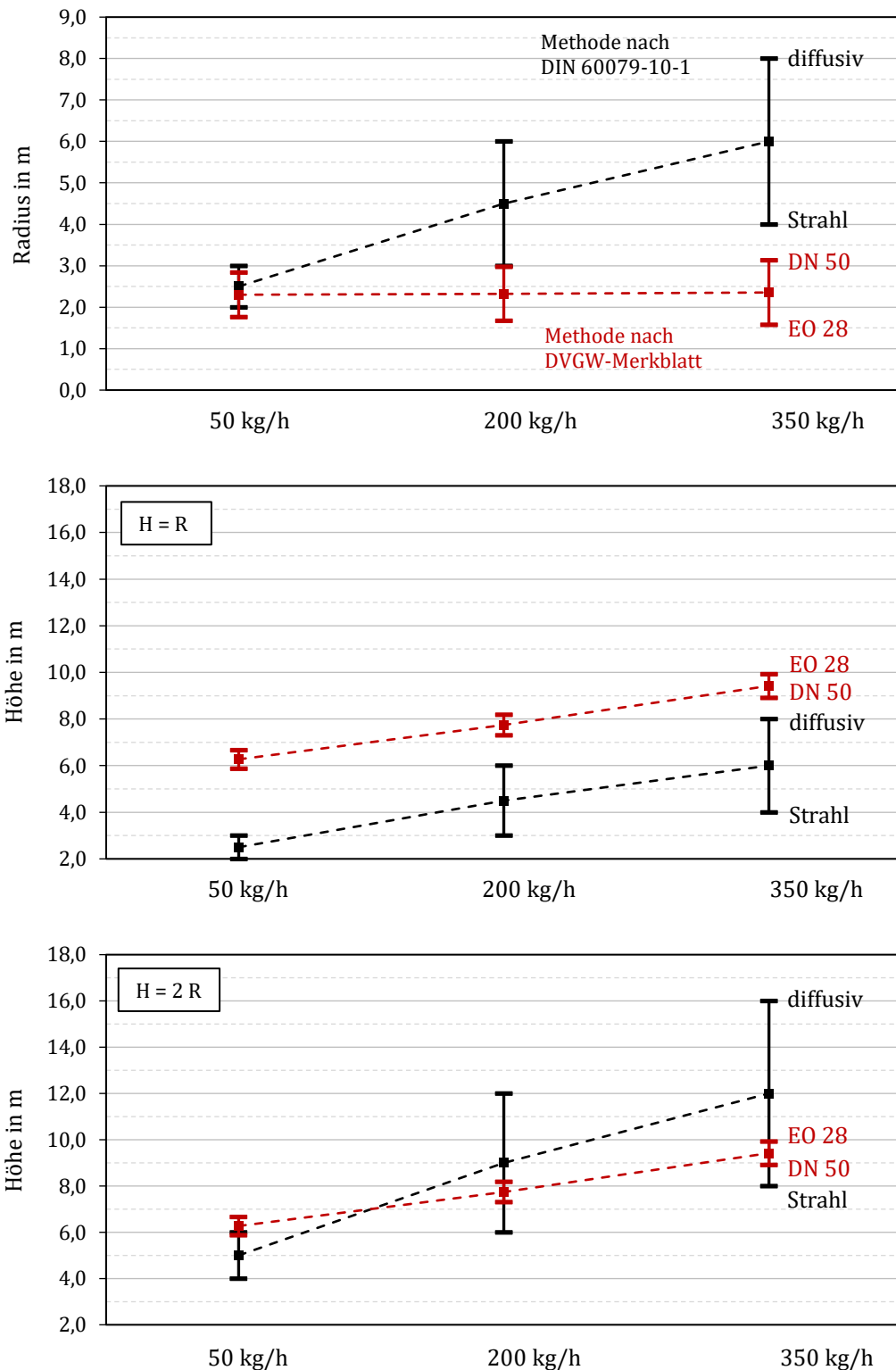


Abbildung 5: Ausdehnung des zylindrischen Ex-Bereichs an Typ A Ausbläser in Abhängig der Lieferleistung eines Erdgasverdichters, ermittelt nach DIN EN 60079-10-1 [3] (schwarze Markierungen: Strahlfreisetzung, diffusive Freisetzung, oder daraus berechneter Mittelwert) und nach DVGW-Merkblatt G 442 [5] (rote Markierungen für Leitung EO 28, DN 50 und Mittelwert). Obere Grafik: Radius  $R$  der Grundfläche des Zylinders, mittlere und untere Grafik: Höhe  $H$  des Zylindermantels, berechnet mit  $H = R$  und  $H = 2R$ .

freigesetzte Strahl länger und damit auch die Höhe des zylindrischen Ex-Bereichs größer. Der Einfluss des Seitenwinds auf den zylindrischen Ex-Bereichs reduziert sich. Diesen Trend zeigen auch die Ergebnisse nach DVGW-Merkblatt. Die kleinere Ausblaseöffnung mit entsprechend höherer Austrittsgeschwindigkeit führt zu einem kleineren radialen Abstand und zu einer größeren Mantelhöhe.

Bei der Ermittlung der Ausdehnung des explosionsgefährdeten Bereichs wird nach DIN EN 60079-10-1 nicht nach unterschiedlichen Größen der Ausblaseöffnung unterschieden. Stattdessen kann eine Freisetzung mit hoher Geschwindigkeit als Strahl berücksichtigt werden, eine Ausströmung mit geringerem Impuls wird als diffusive Freisetzung gekennzeichnet (s. Abbildung 2). Die ungehinderte Strahlfreisetzung mit hohem Impuls führt aber stets zu einem niedrigeren Wert für den Radius und der Zylinderhöhe. Ab wann eine Strahlfreisetzung vorliegt ist zudem nicht quantifiziert, so dass je nach Anwendungsfall die konservativere Annahme einer diffusiven Freisetzung getroffen werden muss.

Die Ergebnisse für die Höhe des Ex-Bereichs nach Abb. 5 zeigen, dass die ermittelten Werte nach DIN fast immer unter den ermittelten Werten nach DVGW-Merkblatt liegen. Dies ist zunächst von der vertikalen Lage des Ex-Bereichs abhängig. Die Höhe des Ex-Bereichs in Abhängigkeit der Hauptausdehnung entspricht  $H = 2R$ , s. Abb. 3. Ist die Freisetzungsquelle in der Mitte des Zylinders angeordnet, dehnt sich die Zone unterhalb und oberhalb des Ausblägers um  $H = R$  aus. Nach DVGW-Merkblatt beginnt der Ex-Bereich jedoch kurz unterhalb der Mündung der Ausblaseöffnung, für den vertikalen Ausbläser unabhängig vom Ausgangsdruck  $p_e$  im Abstand  $10d$  (mit dem Durchmesser  $d$  des Ausblägers). Bei einer mittig angeordneten Freisetzungsquelle innerhalb des zylindrischen Ex-Bereichs wird der Abstand unterhalb der Mündung nach DIN somit tendenziell überdimensioniert ( $H = R > 1$  m). Der notwendige Sicherheitsabstand oberhalb der Mündung wird mit  $H = R$  nach Abbildung 5 (mittlere Grafik) deutlich unterschätzt.

Für die diffusive Freisetzung nach DIN wird eine gute Übereinstimmung für die Höhe mit  $H = 2R$  bei kleinen Freisetzungsraten erhalten (Abb. 5, untere Grafik). Mit zunehmender Freisetzungsrate wird die Höhe, gegenüber den Werten nach DVGW-Merkblatt, deutlich übertroffen (60 bzw. 80 % größer bei 350 kg/h Lieferleistung).

Für den Radius zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung für die Freisetzungsrate mit 50 kg/h. Mit zunehmender Gasfreisetzung steigt auch hier der mit der Methode nach DIN ermittelte Wert stark an. Diesem Trend folgen die ermittelten Ergebnisse nach DVGW-Merkblatt G 442 nicht. Für den Fall mit 350 kg/h wird der Radius nach DIN EN 60079-10-1 (je nach Leitung und Freisetzungsart) um bis zu 400 % größer dimensioniert.

## 4.2 Entspannungssystem mit vertikaler Freisetzungsrichtung

Bestimmt werden soll die Ausdehnung des Ex-Bereichs um die Ausblaseöffnung eines einfachen Entspannungssystems für Erdgas mit vertikaler Freisetzungsrichtung (Ausbläser typ A). Es besteht aus einer Leitung mit 10 m Länge, ohne Drosselstelle, oder Erweiterung des Leitungsquerschnittes. Auftretende Strömungsdruckverluste aufgrund von Umlenkungen

werden, wie auch nach DVGW-Merkblatt [5], vernachlässigt. Die Leitung mit einem Innendurchmesser von 50 mm mündet vertikal ins Freie. Die Strömung erfährt keine Umlenkungen aufgrund von Hindernissen. Die für die Auslegung nach DVGW-Merkblatt notwendigen Kennwerte und Kennzahlen dieses Systems sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Beispiel für ein einfaches Entspannungssystem mit einer Leitung ohne Drosselstelle oder Erweiterung. Die Leitung mündet vertikal ins Freie ohne weiteren Ausbläser (einfache Leitung). Kennwerte und Kennzahlen entsprechend DVGW-Merkblatt G 442 [5].

Leitungslänge in m	$L_2 = 10$	Drosselstelle	$\frac{d_B}{d_2} = 1$
Durchmesser in mm	$d_2 = 50$	Erweiterung	$\frac{d_1}{d_2} = 1$
Ausbläsertyp	A	Kennzahl Leitung 2	$\frac{L_2}{d_2} = 200$
Kennung	A1	Kennzahl Leitung 1	$\frac{L_1}{d_1} = 0$

Für den Untersuchungsbereich des Innendrucks von 2 ... 100 bar liegt eine überkritische Strömung vor. Die Höhe der ermittelten zylindrischen Ex-Bereiche beginnt 0,5 m ( $10d$ ) unterhalb der Ausblaseöffnung. Bei einem Reservoirdruck von  $p_0 = 2$  bar wird mit der Methode nach DVGW-Merkblatt eine Zylinderhöhe von  $H = 16,6$  m und ein Radius der Grundfläche von  $R = 3,1$  m erhalten. Die Größe des Ex-Bereichs steigt nach Abbildung 6 mit zunehmendem Innendruck. Bis zum Erreichen des Maximaldrucks von 100 bar steigt der Radius kontinuierlich bis auf 8,1 m an. Die Höhe des Ex-Bereichs vergrößert sich nach [5] bis auf ca. 60 m.

Mit höherer Druckdifferenz zur Atmosphäre steigt auch die Freisetzungsrates nach Gl. 3. Wird vereinfacht ein konstanter Isentropenexponent nach Gl. (4) zugrunde gelegt ( $\kappa = 1,3$  für Methan als Näherung für Erdgas), ändert sich die freigesetzte Gasmenge aufgrund der zunehmenden Gasdichte. Die Freisetzungseigenschaft erhöht sich über das Dichteverhältnis zwischen Reservoir und Umgebung. Die mit der Methode nach DIN 60079-10-1 [3] ermittelte Zonenausdehnung in Abhängigkeit der berechneten Freisetzungseigenschaft nach Gl. (2) ist ebenfalls in Abbildung 6 dargestellt.

Für den Radius wird mit der Methode nach DIN stets ein größerer Wert als nach DVGW-Merkblatt erhalten. Zudem steigt der Radius mit zunehmendem Reservoirdruck stärker an. Bei 8 bar Innendruck wird der Radius etwa um das Vierfache übertroffen. Insgesamt wird der Radius im betrachteten Bereich mindestens um 90 % überdimensioniert.

Für größere Drücke als 8 bar beträgt die Freisetzungseigenschaft mehr als 30 m<sup>3</sup>/s. Da dieser Bereich im Diagramm zur Abschätzung explosionsgefährdeter Abstände nach DIN EN 60079-10-1 (Abbildung 2) nicht mehr angegeben ist, wurden die entsprechenden Ergebnisse für den Radius, sowie die vom Radius abhängige Mantelhöhe, extrapoliert.

Im Bereich um 5 bar Innendruck zeigt sich mit beiden Verfahren eine gute Übereinstimmung für die ermittelte Höhe. Die größte Abweichung zeigt sich bei maximalem Druck. Hier wird die Höhe der Zone um 51 % größer dimensioniert, jedoch ist man somit auf der sicheren Seite hinsichtlich des Schutzbereiches. Bei 2 bar Innendruck, in der Nähe des kritischen

Druckverhältnisses, ist der Ex-Bereich um 28 % zu klein. Hier müsste der dreifache Radius als Höhe gewählt werden, oder die Ergebnisse einer diffusiven Freisetzung berücksichtigt werden, vgl. Abb. 5 für die unterkritische Strömung.

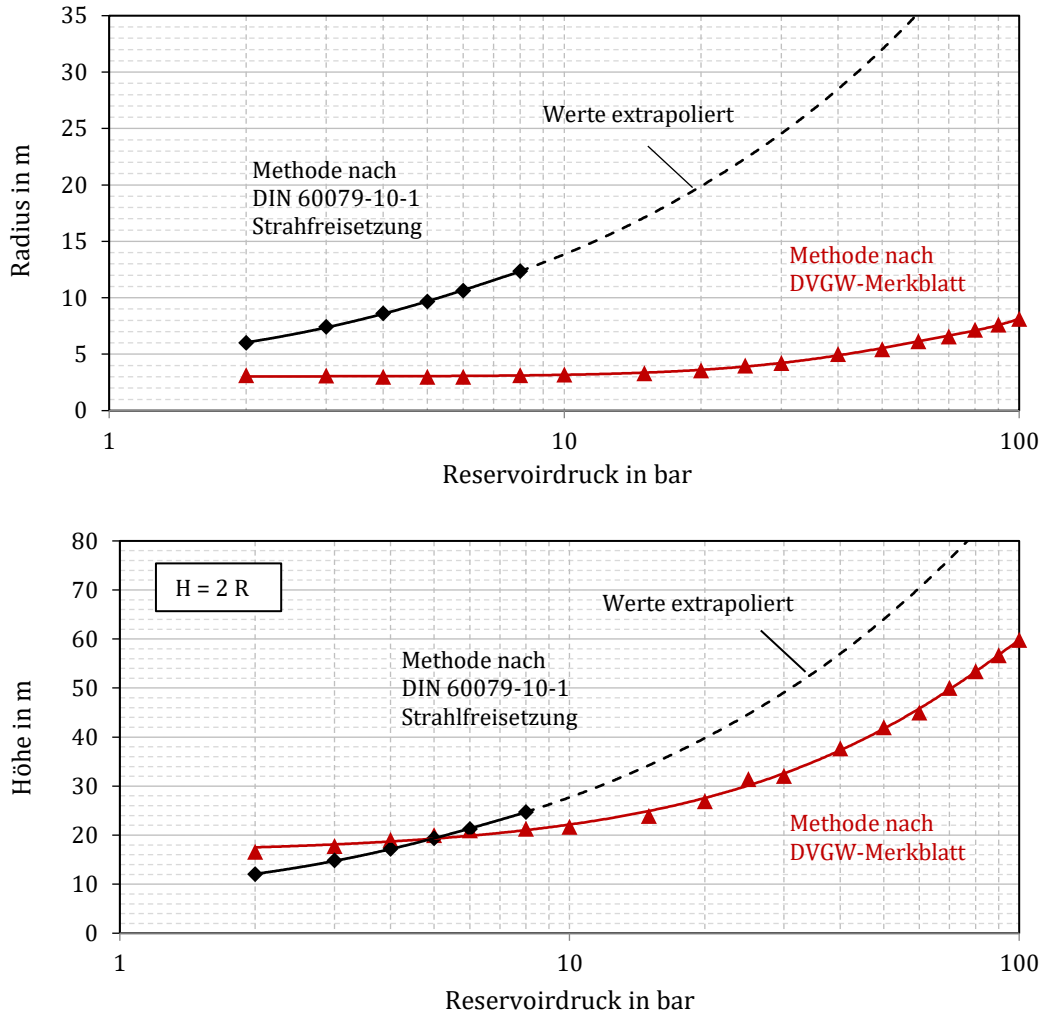


Abbildung 6: Ausdehnung des zylindrischen Ex-Bereichs (Radius der Grundfläche sowie Mantelhöhe) für das Entspannungssystem nach Tab. 4 (vertikale Freisetzungsrichtung), ermittelt nach DIN EN 60079-10-1 [3] (schwarze Markierungen) und DVGW-Merkblatt G 442 [5] (rote Markierungen).

### 4.3 Horizontale Freisetzung über Grund

Das folgende Beispiel untersucht die Ausdehnung des Ex-Bereichs um die Ausblaseöffnung eines einfachen Entspannungssystems für Erdgas mit einer 10 m langen Leitung ohne Drosselstelle oder Erweiterung des Leitungsquerschnittes. Auftretende Strömungsdruckverluste aufgrund von Umlenkungen werden vernachlässigt. Die Leitung hat einen Innendurchmesser von 50 mm und mündet horizontal ins Freie ohne Hindernisse (nur eine Ausblaseöffnung, Typ C). Die Ausblaseöffnung befindet sich 3 m über Grund. Die für die Auslegung nach DVGW-Merkblatt notwendigen Kennwerte und Kennzahlen dieses Systems sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Beispiel für ein einfaches Entspannungssystem mit einer Leitung ohne Drosselstelle oder Erweiterung. Die Leitung mündet vertikal ins Freie ohne weiteren Ausbläser. Kennwerte und Kennzahlen entsprechend DVGW-Merkblatt G 442 [5].

Leitungslänge in m	$L_2 = 10$	Drosselstelle	$\frac{d_B}{d_2} = 1$
Durchmesser in mm	$d_2 = 50$	Erweiterung	$\frac{d_1}{d_2} = 1$
Ausbläsertyp	C	Kennzahl Leitung 2	$\frac{L_2}{d_2} = 200$
Kennung	0	Kennzahl Leitung 1	$\frac{L_1}{d_1} = 0$

Die ermittelten Ergebnisse für Ausdehnung des Ex-Bereichs nach DIN EN 60079-10-1 [3] ändern sich nicht gegenüber den Ergebnissen nach Kap. 4.2 für die vertikale Freisetzung. Nach DIN können keine unterschiedlichen Freisetzungsrichtungen berücksichtigt werden. Durch das ansonsten identische Leitungssystem wird die gleiche Freisetzungsrate und damit die gleiche Freisetzungseigenschaft erhalten, was wiederum zu gleichbleibenden Ergebnissen für den explosionsgefährdeten Abstand entsprechend Abbildung 2 führt.

Im Vergleich zu den Ergebnissen für die horizontale Freisetzung nach DVGW-Merkblatt wird für die Höhe nach DIN stets ein größerer Wert erhalten, s. Abb. 7, untere Grafik. Weiterhin steigt die Höhe mit zunehmendem Reservoirdruck stark an. Bei 8 bar Innendruck ist der ermittelte Wert etwa 8-mal größer. Durch den seitlich gerichteten Impuls werden für die Höhe des Ex-Bereichs nach DVGW-Merkblatt deutlich kleinere Werte erhalten als für den Radius. Durch die Methode nach DIN mit nur einem zu bestimmenden Parameter kommt es bezüglich der Höhe zu einer deutlichen Überdimensionierung. Insgesamt wird die Höhe im Untersuchungsbereich um mindestens 290 % übertroffen.

Der Radius für Innendrucke kleiner 25 bar hingegen wird mit der Methode nach DIN für die ungehinderte Strahlfreisetzung mit hoher Geschwindigkeit deutlich unterdimensioniert. Die Ergebnisse für die diffusive Strahlfreisetzung mit geringer Geschwindigkeit unterschätzen den Radius ebenfalls für Innendrucke kleiner 6 bar. Für alle Bereiche, die außerhalb der angegebenen Drücke liegen (25 bar bzw. 6 bar), wird mit zunehmenden Abstand eine deutliche Differenz in den Ergebnisse zwischen beiden Verfahren erhalten, s. Abb. 7, obere Grafik.

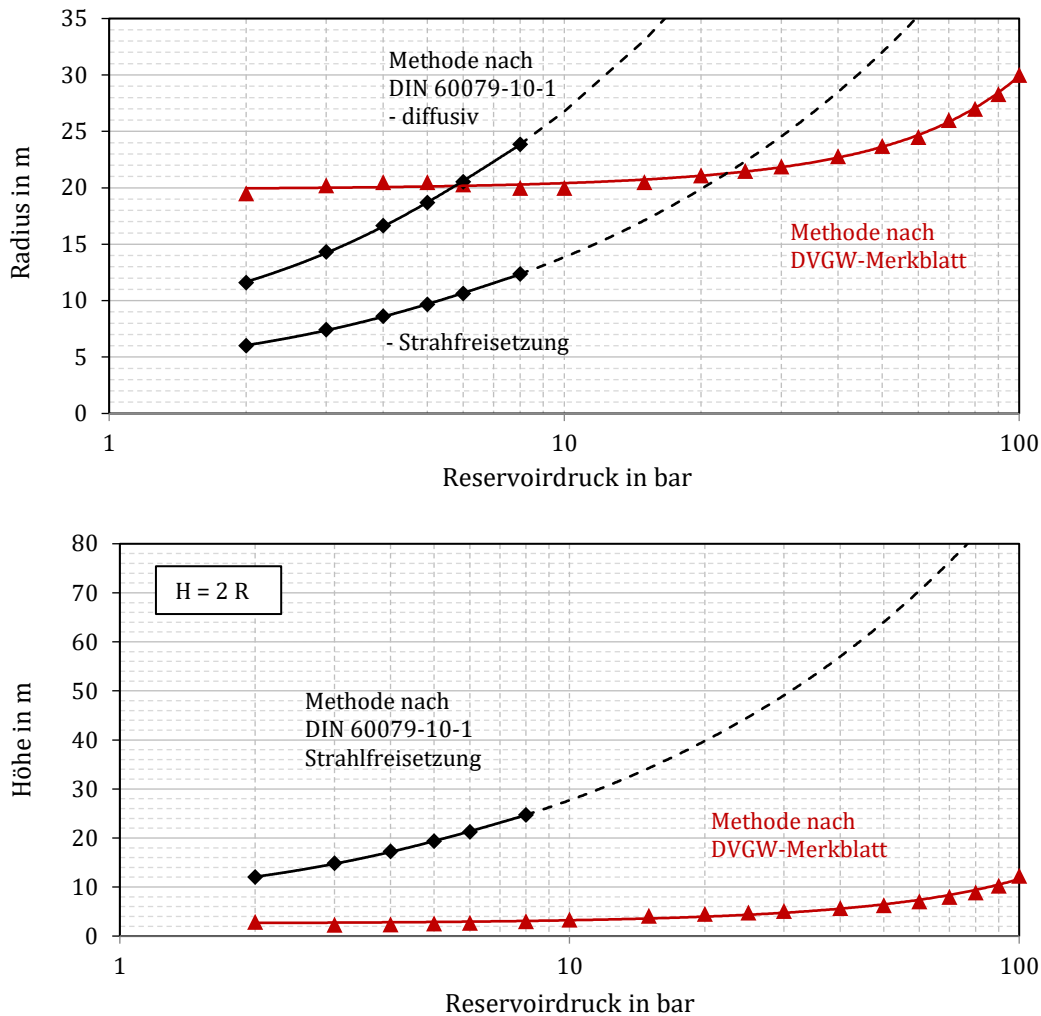


Abbildung 7: Ausdehnung des zylindrischen Ex-Bereichs (Radius der Grundfläche sowie Mantelhöhe) für das Entspannungssystem nach Tab. 5 (horizontale Freisetzungsrichtung), ermittelt nach DIN 60079-10-1 [3] (schwarze Markierungen) und DVGW-Merkblatt G 442 [5] (rote Markierungen).

#### 4.4 Vergleich der Freisetzung von Wasserstoff und Erdgas

Erdgas hat eine relative Dichte zu Luft von 0,55 und Wasserstoff eine relative Dichte von 0,07. Damit sind beide Gase leichter als Luft, wobei Wasserstoff 8-mal leichter ist als Erdgas. Wird Gas aus dem gleichen Entspannungssystem nach Kap. 4.2 und 4.3 freigesetzt, muss für Wasserstoff aufgrund der sehr geringen Dichte ein viel größerer Volumenstrom gefördert werden. Dies führt bei gleicher Druckdifferenz (Reservoir zu Umgebung) zu größeren Strömungsdruckverlusten und damit zu geringeren Freisetzungsraten gegenüber Erdgas, s. Abb. 8.

Die berechnete Freisetzungseigenschaft nach Gl. (2) ist bei Wasserstoff, trotz geringerer Freisetzungsraten größer als bei Erdgas. Damit wird nach DIN auch eine größere Zonen- ausdehnung um die Ausblaseöffnungen von Entspannungssystemen an Wasserstoff-Anlagen erhalten. Die Anwendung des DVGW-Merkblatt G 442 für Wasserstoff ist somit nicht möglich.



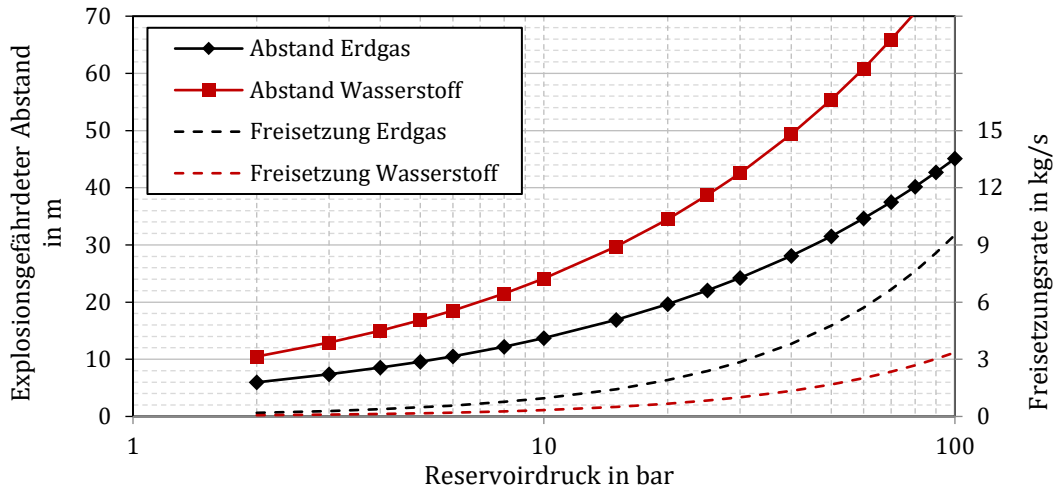


Abbildung 8: Der explosionsgefährdete Abstand nach DVGW-Merkblatt G 442 [5] (Markierungen) und die Freisetzungsraten nach Gl. 3 (gestrichelte Linien) für das Entspannungssystem nach Tab 4 bzw. 5 für Erdgas (jeweils schwarze Linien) und Wasserstoff (jeweils rote Linien).

Dass Wasserstoff durch die sehr geringe Gasdichte eine größere Ausdehnung des Ex-Bereichs erfordert, zeigt auch Abbildung 9 für die UEG/2-Konzentrationskontur nach Gl. (7) für die angegebenen Randbedingungen. Die Ausdehnung der Zone bei Wasserstoff mit gleicher Freisetzung ist etwa 3-mal so groß, nur aufgrund der geringeren Dichte. Das Modell nach Gl. (7) hat jedoch nur eine begrenzte Anwendbarkeit, s. [13].

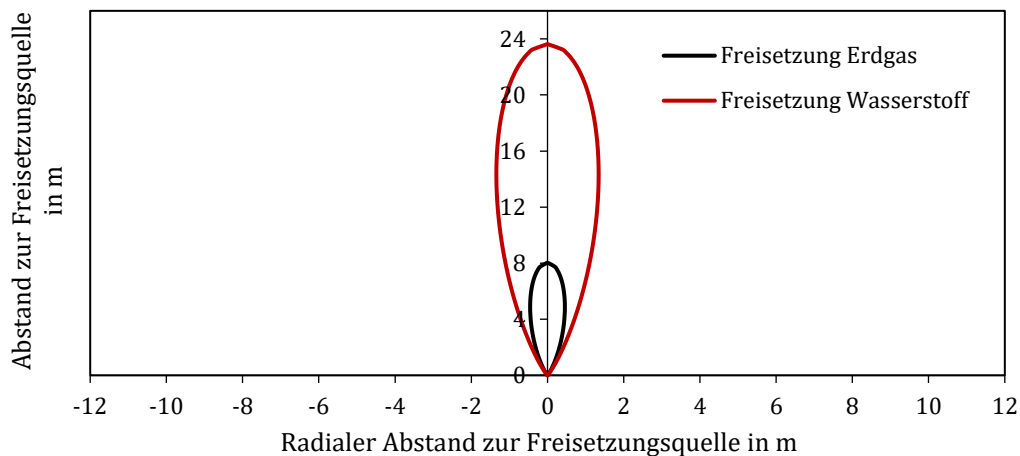


Abbildung 9: Die UEG/2-Konzentrationskontur für Erdgas (schwarze Linie) und Wasserstoff (rote Linie) nach Gl. (7). Verwendete Stoffdaten für Erdgas: UEG = 4,2 %, rel. Dichte zu Luft = 55 %, Wasserstoff: UEG = 4,0 %, rel. Dichte = 7 %. Weiterhin gilt  $c_0 = 1$ ,  $b_0 = 0,025$  m,  $s_0 = s_s = 0$ .

## 5 Fazit und Ausblick

Die Einteilung des Zonentyps für explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre kann, im Vergleich zur Ermittlung der Abmessungen des Ex-Bereichs, vergleichsweise einfach anhand der Funktionsweise erfolgen. Bei Abblaseleitungen mit Sicherheitseinrichtungen (wie Sicherheitsabblaseventile) oder bei Atmungsleitungen (Membranbruch) ist im Normalfall nicht mit einer Gasfreisetzung und der Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre zu rechnen und der Bereich kann in eine Zone 2 eingeteilt werden. Bei Leitungen zur manuellen Gasfreisetzung ist zu unterscheiden, ob eine Freisetzung etwa prozessbedingt gelegentlich notwendig ist (z. B. zum Druckabbau vor dem Anfahren bei Verdichteranlagen), oder ob eine Freisetzung nur notwendig wird für Wartungs- oder Instandhaltungsarbeiten nach mehreren Jahren Betriebszeit. Im letztgenannten Fall ist keine Zoneneinteilung notwendig, jedoch ist für die Dauer des Entspannungsvorgangs ein entsprechender Bereich festzulegen, der frei von Zündquellen sein muss und es darf durch den Vorgang zu keiner Gefährdung der Anlagensicherheit oder Dritter kommen. Entsprechende technische und organisatorische Schutzmaßnahmen sind in der Gefährdungsbeurteilung, die dem Explosionsschutzdokument übergeordnet ist, zu dokumentierenden (z. B. Freischalten von Anlagen und Zutrittsverbot zum Gefahrenbereich).

Die Bestimmung der Ausdehnung des Ex-Bereichs ist von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig. Dazu zählen die Freisetzungsrate, die Ausströmungsgeschwindigkeit, sowie der Druck und die Temperatur am Leitungsaustritt. Diese Größen sind wiederum vom Entspannungssystem abhängig. Hierzu zählen die Geometrie des Leitungssystems, die Art des Ventils und mögliche weitere Drosselstellen, der Ausbläserotyp und die Freisetzungsrichtung, sowie der Druck innerhalb des Systems. Weiteren Einfluss auf die Ausdehnung des Ex-Bereichs haben auftretenden Windverhältnisse und mögliche Hindernisse aufgrund von Gebäuden oder weiteren Anlagenteilen.

Für die Ermittlung der Ausdehnung des Ex-Bereichs für Wasserstoff-Anlagen mit der Methode nach DIN EN 60079-10-1 ist zunächst die Art der räumlichen Ausdehnung zu wählen. Da man als Parameter lediglich den explosionsgefährdeten Abstand bestimmen kann, impliziert dies eine sphärische Geometrie mit dem explosionsgefährdeten Abstand als Radius einer Kugel um die Ausblaseöffnung. Mit der Methode nach DVGW-Merkblatt G 442 für Erdgas-Anlagen wird ein gerader, vertikal stehender Zylinder erhalten, der auch für die Freisetzung von Wasserstoff verwendet werden kann. In diesem Fall entspricht der explosionsgefährdete Abstand dem Radius der Grundfläche und die Höhe des Zylindermantels entspricht dem doppelten Radius (Kugel innerhalb des Zylinders).

Neben der Bestimmung der Grundfläche und der Höhe muss auch die relative Lage des Zylinders zur Ausblaseöffnung bestimmt werden. Liegt die Freisetzungsquelle in der Mitte, wird die Zone entgegen der Freisetzungsrichtung des Gases tendenziell überdimensioniert. Der Ex-

Bereich in Strömungsrichtung hingegen könnte unterschätzt werden. Zudem sind Erdgas und Wasserstoff leichter als Luft und verteilen sich nach der Freisetzung, mit abnehmendem Impuls, aufwärts gerichtet. Bei der vertikal nach oben gerichteten Gasfreisetzung sollte somit der wesentliche Anteil des zylindrischen Ex-Bereichs oberhalb der Ausblaseöffnungen liegen. Dies zeigen auch die Ergebnisse nach DVGW-Merkblatt G 442. Die Mantelhöhe des Zylinders beginnt leicht unterhalb der Freisetzungsöffnung im Abstand des 10-fachen Ausbläserdurchmessers. In erster Näherung kann dieser Abstand auch bei Wasserstoff-Anlagen verwendet werden. Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen Erdgas und Wasserstoff zeigen jedoch, dass bei der Wasserstofffreisetzung durch die geringere Dichte ein größerer explosionsgefährdeter Abstand in alle Richtungen benötigt wird. Aus diesem Grund ist auch die pauschale Anwendung des DVGW-Merkblatts G 442 für Wasserstoff-Anlagen ungeeignet.

Für die grafische Bestimmung des explosionsgefährdeten Abstands nach DIN EN 60079-10-1 muss zunächst die Freisetzungsrates bekannt sein. Hier wurde ein stationäres Strömungsmodell auf Basis einer isentropen Entspannung nach dem Ventil verwendet. Mit dem Modell ist eine analytische Lösung auch für komplexe Entspannungssysteme möglich.

Mit der Anwendung des Strömungsmodells in Kombination mit der Bestimmung des explosionsgefährdeten Abstands nach DIN EN 60079-10-1 kann der Ex-Bereich an Ausblaseöffnungen von Wasserstoff-Anlagen abgeschätzt werden. Die Methode wurde für ein Entspannungssystem für Erdgas mit vertikaler und horizontaler Freisetzungsrichtung angewendet und die Ergebnisse mit der Methode nach DVGW-Merkblatts G 442 verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Methode nach DVGW-Merkblatt eine detailliertere Bestimmung möglich ist. Teilweise wird der Ex-Bereich mit der Methode nach DIN sehr groß. Zudem zeigt sich, dass die Methode nach DIN nur für vertikal aufwärts gerichtete Ausbläser (Ausbläser Typ A) verwendet werden sollte. Bei der horizontalen Freisetzung insbesondere kann der Radius, d. h. der horizontale explosionsgefährdete Abstand, nur unzureichend wiedergegeben werden. Hier wird die Zonenausdehnung teilweise sowohl stark über- als auch unterschätzt.

Bei der vertikalen Freisetzung zeigt sich eine ausreichende Übereinstimmung für die Strahlfreisetzung bei niedrigen und moderaten Drücken (im Bereich um das kritische Druckverhältnis). Bei hohem Innendruck (und entsprechend hoher Freisetzungsrates) wird der Ex-Bereich sowohl hinsichtlich des Radius, als auch der Höhe stark überdimensioniert. Die Ergebnisse für die Mantelhöhe des Zylinders zeigen insgesamt eine bessere Übereinstimmung, jedoch wird die Zonenausdehnung bei niedrigem Druck unterschätzt. Im Bereich unterhalb des kritischen Druckverhältnisses sollte die Höhe zur Sicherheit bis auf den dreifachen Radius angehoben werden.

Als Alternative zu zeit- und kostenintensiven labortechnischen oder numerischen Untersuchungen und als Alternative zu den ungenauen Abschätzungen nach DIN EN 60079-10-1, kann das verwendete Strömungsmodell des Entspannungssystems erweitert werden für die Freisetzung und Verteilung von Wasserstoff in der Atmosphäre. Hier existieren verschiedene teils analytische Dispersions-Modelle in der Literatur. Diese können zukünftig an die Randbedingungen für Leitungen zur Atmosphäre von Wasserstoff-Anlagen angepasst werden

und ermöglichen so die schnelle und genaue Berechnung der *UEG/2*-Konzentrationskontur zur Bestimmung des explosionsgefährdeten Bereichs um die Ausblaseöffnungen.

# Literaturverzeichnis

- [1] Bohl, W.; Elmendorf, W. (2005): Technische Strömungslehre. 13. Auflage. Vogel Buchverlag, Würzburg.
- [2] Brandes, E. & Möller, W. (2008): Sicherheitstechnische Kenngrößen - Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase. 2. Auflage, Fachverlag NW.
- [3] DIN EN 60079-10-1:2016-10 (2015): Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 10-1: Einteilung der Bereiche - Gasexplosionsgefährdete Bereiche.
- [4] Doering, E. et al. (2008): Grundlagen der Technischen Thermodynamik. 6. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [5] DVGW Merkblatt G 442 (2015): Explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre an Gasanlagen. Juli 2015. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- [6] Dyrba, B. (2019): Praxishandbuch Zoneneinteilung, Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen. 3. Auflage. Carl Heymanns Verlag.
- [7] DGUV Regel 113-001 (2021): Explosionsschutz-Regeln (EX-RL), Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung zur Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen. August, 2021.
- [8] Heinrich, H.-J. (1980): Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen. Forschungsbericht 75, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin.
- [9] Naendorf, B. (2014): Gasdruckregelung und Gasdruckregelanlagen. 4. Auflage. Vulkan-Verlag GmbH.
- [10] Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1999 über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können.
- [11] TA Luft:2021-08-18 (2021): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft).
- [12] VDI 3783 Blatt 1:1987-05 (1987): Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre - Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen – Sicherheitsanalyse.
- [13] Weterings, R.A.P.M. et al. (2005): Methods for the calculation of Physical Effects, due to releases of hazardous materials (liquids and gases) - "Yellow Book" CPR 14E. Third edition Second revised print, Committee for the Prevention of Disasters, The Hague.