



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

## Lektion 7

# Ungezündete Wasserstofffreisetzungen im Freien und ihre Eindämmung

## STUFE IV

### Experte

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an **Experten** und höher.

Dieses Thema ist auch auf den Stufen I-III verfügbar.

Diese Vorlesung ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann, Gruppenkommandant(-führer), Einsatzleiter und Experte.

Bitte beachten Sie die Einleitung zur Vorlesung bezüglich der Kompetenzen und Lernerwartungen

Hinweis: Diese Materialien sind Eigentum des HyResponder-Konsortiums und sollten entsprechend gewürdigt werden. Die Ergebnisse von HyResponse wurden als Grundlage verwendet.



### Haftungsausschluss

Trotz der Sorgfalt, die bei der Erstellung dieses Dokuments aufgewendet wurde, gilt der folgende Haftungsausschluss: Die Informationen in diesem Dokument werden so bereitgestellt, wie sie sind, und es wird keine Garantie oder Gewährleistung gegeben, dass die Informationen für einen bestimmten Zweck geeignet sind. Der Nutzer verwendet die Informationen auf eigenes Risiko und eigene Haftung.

Das Dokument gibt ausschließlich die Meinung der Autoren wieder. Das Gemeinsame Unternehmen FCH und die Europäische Union haften nicht für die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen.

### Danksagung

Das Projekt wurde vom Gemeinsamen Unternehmen "Fuel Cells and Hydrogen 2" (JU) im Rahmen der Finanzhilfevereinbarung Nr. 875089 finanziert. Das Gemeinsame Unternehmen wird durch das Forschungs- und Innovationsprogramm "Horizon 2020" der Europäischen Union sowie durch das Vereinigte Königreich, Frankreich, Österreich, Belgien, Spanien, Deutschland, Italien, die Tschechische Republik, die Schweiz und Norwegen unterstützt.

## Zusammenfassung

Unerwünschte Wasserstofffreisetzungen führen zu einer Vermischung des entweichenden Gases mit Luft, wodurch die Ausgangsbedingungen für Brand- und Explosionsgefahren geschaffen werden. Bei den ungewollten Freisetzungen handelt es sich um das Entweichen von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff, der unter hohem Druck in FCH-Systemen und Infrastrukturen gespeichert ist. Unbeabsichtigte Freisetzungen von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff fallen in zwei Hauptkategorien: Permeationslecks und Hochdruckstrahlen. Eine der wichtigsten Fragen für die Einsatzkräfte ist, ob eine Freisetzung von gasförmigem Wasserstoff zur Bildung eines zündfähigen Gemischs mit Luft führt. Durch die Anwendung des Ähnlichkeitsgesetzes und der Theorie des unterexpandierten Freistrahls können die Einsatzkräfte die Größe der entflammbaren Wasserstoffwolke bewerten und die Abnahme der Wasserstoffkonzentration entlang der Strahlachse berechnen. Darüber hinaus lernen die Responder, wie sie die Ausblaszeit berechnen und die Druckdynamik in einem Lagertank mit bekanntem Fassungsvermögen beurteilen können. Schließlich werden in dieser Lektion Mittel zur Verringerung der Gefahrendistanz vom Ort der Freisetzung sowie Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung/Erkennung von Freisetzungen von nicht gezündetem Wasserstoff vorgestellt.

## Schlüsselwörter

Ungezündete Freisetzung, Ähnlichkeitsgesetz, Theorie des unterexpandierten Strahls, Wasserstoffwolke, Zerfall der Wasserstoffkonzentration, Blowdown, Gefahrenabstand, Minderungsmaßnahmen, Nachweis

## Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter .....	3
<b>1. Zielgruppe.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Beschreibung der Rolle: Experte .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Kompetenzniveau: Experte .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 Vorbildung: Experte .....</b>	<b>5</b>
2. Einleitung und Ziele .....	6
3. Nützliche Definitionen.....	7
4. Lecks bei komprimiertem Wasserstoff.....	7
4.1 Expandierte und unterexpandierte Düsen .....	10
4.2 Unterschall-, Schall- und Überschalldüsen .....	11
4.3 Impuls- und auftriebsgesteuerte Düsen .....	12
5. Zerfall der Wasserstoffkonzentration in impuls gesteuerten Strahlen .....	13
6. Verringerung des Gefahrenabstands bei einer Wasserstofffreisetzung.....	22
6.1 Wann wird ein Strahl schwimmfähig? .....	22
6.2 Was ist ein sicherer PRD-Durchmesser? .....	24
7. Abblasen eines Druckwasserstoffspeichers .....	25
8. Verhinderung von Wasserstofflecks.....	30
9. Minderungsmaßnahmen für nicht gezündete Freisetzungen.....	32
10. Aufspüren von Wasserstofflecks .....	33
11. e-Labor-Tools für relevante Phänomene .....	38
11.1 Modell der Strahlparameter .....	38
11.2 Ähnlichkeitsgesetz für den Konzentrationsabfall und den Gefahrenabstand.....	40
11.3 Berechnung des Auftriebs .....	41
Danksagung.....	43
Referenzen.....	43



## 1. Zielgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Ebene der Experten und darüber hinaus. Es gibt auch Lektionen für die Stufen I, II und III: Feuerwehrmann, Gruppenkommandant(-führer) und Einsatzleiter.

Die Rollenbeschreibung, das Kompetenzniveau und die Lernerwartungen, die auf der Ebene der Fachbeamten vorausgesetzt werden, werden im Folgenden beschrieben.

### 1.1 Beschreibung der Rolle: Experte

Experten unterstützen den Einsatzleiter mit Ratschlägen und durch die Leitung und Beaufsichtigung von technischen Einsätzen, die die Notwendigkeit von Wissen, Fähigkeiten oder Ausrüstung in Bezug auf ein bestimmtes Risiko oder eine bestimmte Einsatzfähigkeit erfordern. Typische Vorfälle betreffen gefährliche Stoffe, Transportfahrzeuge, klimatische Ereignisse, strukturelle und andere bauliche Mängel sowie die Logistik von Notfallmaßnahmen.

### 1.2 Kompetenzniveau: Experte

Ein wissenschaftliches, technisches und empirisches Fundament im Fachgebiet mit der durch Erfahrung erweiterten Fähigkeit, diese Informationen und Kenntnisse in einer interpretierten und nützlichen Weise anzuwenden, um den Einsatzleiter und andere Ersthelfer unter der Leitung des Spezialisten in die Lage zu versetzen, wirksam und sicher auf die Notfallsituation zu reagieren.

### 1.3 Vorbildung: Experte

EQR 5 Umfassendes, spezialisiertes, faktisches und theoretisches Wissen in einem Einsatzbereich und ein Bewusstsein für die Grenzen dieses Wissens. Ein umfassendes Spektrum an kognitiven und praktischen Fähigkeiten, die erforderlich sind, um kreative Lösungen für abstrakte Probleme zu entwickeln. Ausübung von Management- und Aufsichtsfunktionen in der Einsatzsituation mit unvorhersehbaren Veränderungen; Überprüfung und Anpassung der eigenen Maßnahmen und anderer.

## 2. Einleitung und Ziele

Eine unerwünschte Freisetzung von Wasserstoff kann entweder durch einen Geräteausfall oder durch einen Verlust der Dichtheit eines FCH-Systems verursacht werden. Die Folgen dieses Ereignisses können unterschiedlich sein, je nach den Merkmalen der Freisetzung und dem Ort der Leckagequelle, d. h. im Freien oder in geschlossenen Räumen. Wenn die Freisetzung zunächst nicht gezündet wird, besteht immer noch die Möglichkeit, dass sie sich nach einer gewissen Verzögerung entzündet, wenn eine Zündquelle im Weg der Freisetzung vorhanden ist. Wenn Wasserstoff in Innenräumen freigesetzt wird, sind die Folgen schwerwiegender als bei Freisetzungen im Freien, da sich in einem geschlossenen Raum eine explosive Atmosphäre bilden kann. Alle diese Folgen können Menschen, Gebäude und die Umwelt betreffen. Kleinere Zwischenfälle können eskalieren und zu katastrophalen Folgen führen.

Diese Lektion befasst sich hauptsächlich mit der Freisetzung von Wasserstoff ohne Zündquelle in einer offenen Umgebung. Die Klassifizierung von Leckagen von Druckwasserstoff wird in dieser Lektion ebenso vorgestellt wie einige nützliche Begriffe. Die Einsatzkräfte werden in das Ähnlichkeitsgesetz und die Theorie des unterexpandierten Freistrahls eingeführt, die es ihnen ermöglichen, den Zerfall der Wasserstoffkonzentration zu bewerten und den Gefahrenabstand von der Freisetzungsstelle bis zur unteren Zündgrenze oder einer anderen Konzentration von Interesse zu bestimmen. Die Mittel zur Verringerung des Gefahrenabstands von einer Wasserstofffreisetzungsquelle werden in dieser Lektion ausführlich erläutert. Außerdem werden Präventions- und Minderungs-/Erkennungsmaßnahmen für die Freisetzung von nicht entzündetem Wasserstoff aus Druckwasserstoffspeichern erörtert.

Am Ende dieser Lektion werden die Teilnehmer in der Lage sein:

- Klassifizierung nicht gezündeter Wasserstofffreisetzungen (Lecks/Strahlen) und Unterscheidung zwischen Permeationslecks, Unterschall-, Überschall- und Überschallstrahlen, expandierten und unterexpandierten Strahlen sowie impuls- und auftriebsgesteuerten Strahlen;
- Bewertung des Abklingens der Wasserstoffkonzentration in den impuls gesteuerten Strahlen anhand eines entsprechenden Nomogramms;
- Berechnen Sie die Entfernung, in der der Wasserstoffstrahl schwimmfähig wird;
- Berechnung der Größe des entflammaren Wasserstoffbereichs, d. h. Bestimmung des am weitesten von der Leckquelle entfernten Punkts, an dem ein Strahl gezündet werden kann;



- Ermittlung einer sicheren Größe einer thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtung (TPRD), um die Bildung einer entflammaren Wasserstoffschicht unter einer Decke im Raum zu vermeiden;
- Berechnen Sie die Abblaszeit für Druckwasserstofftanks mit unterschiedlichem Fassungsvermögen;
- Erkennen der Mittel zur Verringerung der Gefahrendistanz vom Ort der Freisetzung;
- Nennen Sie die wichtigsten Techniken zur Verhinderung von Wasserstoffaustritten;
- Erkennen von Maßnahmen zur Eindämmung der Folgen von Wasserstofflecks;
- Nennen Sie die Nachweismöglichkeiten von Wasserstofffreisetzungen.

### 3. Nützliche Definitionen

Das *Abblasen* ist ein Prozess, bei dem der Speicherdruck während eines Lecks mit der Zeit abnimmt.

*Expandierter Strahl* ist ein Strahl mit einem Druck am Düsenaustritt, der dem atmosphärischen Druck entspricht.

Die *Mach-Zahl* ( $M$  oder  $Ma$ ) ist eine dimensionslose Zahl, die dem Verhältnis zwischen der lokalen Strömungsgeschwindigkeit und der lokalen Schallgeschwindigkeit entspricht.

*Permeation* ist die Bewegung von Atomen, Molekülen oder Ionen in oder durch eine poröse oder durchlässige Substanz.

Die *Gefahrendistanz* ist die Entfernung von der (Gefahren-)Quelle zu einem (durch physikalische oder numerische Modellierung oder durch eine Vorschrift) bestimmten physikalischen Effektwert (normalerweise thermisch oder Druck), der zu einem Schadenszustand (von "kein Schaden" bis "maximaler Schaden") für Menschen, Ausrüstung oder Umwelt führen kann (gemäß dem Entwurf der ISO TC197-Definition).

Ein *unterexpandierter Strahl* ist ein Strahl mit einem Druck am Düsenaustritt, der über dem atmosphärischen Druck liegt.

### 4. Lecks bei komprimiertem Wasserstoff

Wie bereits aus früheren Lektionen bekannt ist, sind FC-Fahrzeuge mit bordeigenen Wasserstoffspeichern ausgestattet, die unter einem Druck von bis zu 70 MPa stehen, und die Betankungsinfrastruktur arbeitet mit einem Druck von bis zu 100 MPa [1]. Aufgrund der geringen Größe seines Moleküls ist Wasserstoff anfällig für Leckagen. Überwiegend entstehen Wasserstofffreisetzungen/Leckagen aus Ventilen und Anschlüssen [2], die sowohl in Innenräumen als auch im Freien auftreten können. Die Freisetzungen können ungezündet (d. h. nicht reagierend) oder gezündet (d. h. reagierend) sein. Obwohl der Bruch einer Leitung oder eines Behälters in voller Länge ein seltenes Ereignis ist, sollte er als ein glaubwürdiges Worst-



Case-Szenario betrachtet werden. Es sollten besondere Anstrengungen unternommen werden, um die unerwünschte Freisetzung von Wasserstoff zu verhindern. Eine Freisetzung von Wasserstoff entweder durch eine PRD oder durch einen Rohrbruch führt zu einem Hochdruckstrahl.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Arten von Leckagen und die Geräte oder Bauteile, die Wasserstoffleckagen verursachen [3].

Tabelle 1. Von der EIGA (2007) entwickelte Leckquellen und Szenarien [3]

Ausrüstung/Komponente	Art des Lecks
Verrohrung	Nadellöcher, Rohrbruch
Flansche	Dichtungsversagen, thermische Bewegung, Materialkriechen
Verschweißte Verbindung	Riss in der Schweißnaht
Lötverbindung	Lötriss, Lötsschmelze
Zentralanschluss	Thermische Bewegung, Leckage
Schraubverbindung	Undichtigkeit, Versagen der Dichtungsmasse, Kriechen, Materialbruch
Schlauchanschluss	Dichtungsleck, Materialbruch, menschliches Versagen
Ventile	Spindel undicht, Dichtung undicht, Motorhaube/Gehäuse durch Schlag geöffnet
Schläuche	Perforation geteilt
Instrumente	Bruch des Elements
Druckminderer, Druckbegrenzungsventile, ect.	Membranbruch, Leckage der Dichtung, stromabwärts gerichteter Bruch (Überdruck)
Elektromagnetische Ventile	Dichtung undicht
Pumpen	Perforation, Dichtungsleck
Druckbehälter	Perforation, Bruch, Permeationsleck

Die typischen Durchflussraten von Wasserstofffreisetzungen variieren erheblich und reichen von  $10^{-5}$  g/s bei Permeationslecks bis zu  $10^5$  g/s bei Lecks in Wasserstoffleitungen. Gemäß der europäischen Verordnung für die Typgenehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen (2010) ist die *sichere Permeationsrate* für FC-Fahrzeuge bei 15 und 20 °C auf 6 und 8 ml/h pro Liter Speicherkapazität begrenzt [4]. Das bedeutet, dass die Permeationsrate für einen Wasserstoffspeicher mit 170 l Fassungsvermögen  $2,53 \times 10^{-5}$  g/s betragen wird. Die Durchflussrate bei einem Leck in einem gebrochenen Rohr (bei einem 150 kW FC) beträgt etwa 3 g/s. Eine Freisetzung aus einer Industrierohrleitung (Durchmesser 30 cm) bei  $p = 2,5$  MPa wird eine Durchflussrate von 100 kg/s haben. Eine Freisetzung über eine PRD (mit einem



Durchmesser von 5,08 mm) aus einem Lagertank bei 35 MPa erzeugt derzeit eine Durchflussrate von 390 g/s.

Eine permeationsbedingte Freisetzung von Wasserstoff unterscheidet sich von Fahnen und Strahlen: Wasserstoff wird langsam und in sehr kleinen Mengen gleichmäßig entlang der Oberfläche eines Lagertanks freigesetzt. Die Geschwindigkeit der Wasserstoffpermeation durch ein bestimmtes Material hängt von mehreren Parametern ab, z. B. von der Temperatur, dem Innendruck und der Membrandicke. Je höher der Speicherdruck ist, desto höher ist die Permeationsrate (siehe Lektion 3 "Wasserstoffspeicherung"). Drei Hauptphänomene bestimmen die Ausbreitung des permeierten Wasserstoffs: Auftrieb, Diffusion und natürliche Ventilation. Permeierter Wasserstoff verteilt sich homogen in einer garagenartigen Umschließung [5]. Die maximal zulässige Permeationsrate bei 20 °C beträgt für einen Pkw 8 ml/Std./L und für einen FC-Bus 5 ml/Std./L in einer Garagenkabine [6]. Die bei HySAFER der Universität Ulster durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass bei dieser Permeationsrate die Wasserstoffausbreitung in einer typischen Garage kein Problem darstellt [5].

Eine ungeplante Freisetzung von unter hohem Druck gespeichertem Wasserstoff kann einen stark *unterexpandierten* (Druck am Düsenaustritt liegt über dem Atmosphärendruck) turbulenten Strahl erzeugen, der sich anders verhält als die *expandierten* Strahlen (Druck am Düsenaustritt entspricht dem Atmosphärendruck), die in der Vergangenheit eingehend untersucht wurden. Die schematische Darstellung einer Wasserstofffreisetzung aus einem Hochdruckspeicher ist in Abbildung 1 zu sehen. Die meisten Leckagen aus Wasserstoffspeichern und -ausrüstungen erfolgen zumindest zu Beginn in Form eines unterexpandierten Strahls [1].

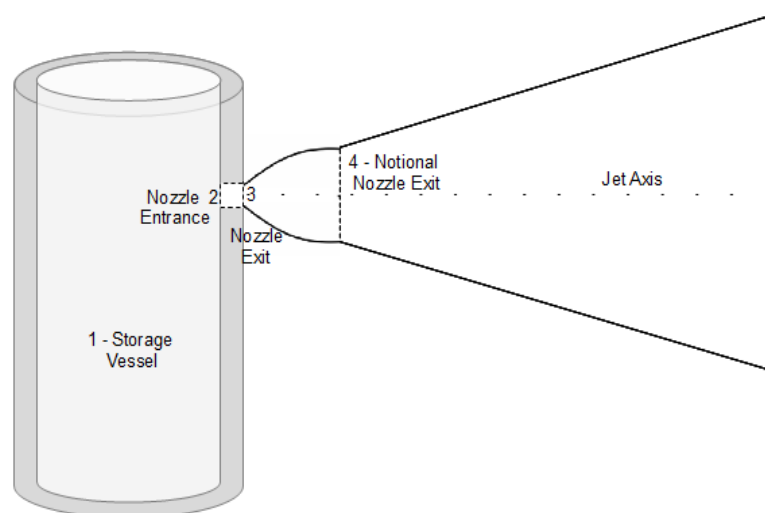


Abbildung 1. Ein Schema der Wasserstofffreisetzung aus einem Hochdruck-Wasserstoffspeicher.

#### 4.1 Expandierte und unterexpandierte Düsen

Wasserstoffdüsen können expandiert oder unterexpandiert sein. Ein expandierter *Strahl* ist ein Strahl, bei dem der Druck am Düsenausgang dem atmosphärischen Druck entspricht. Bei einem *unterexpandierten Strahl* ist der Druck am Düsenaustritt noch nicht vollständig auf den atmosphärischen Druck gesunken. Bei hohen Drücken bleibt die Geschwindigkeit am Düsenaustritt lokal schallartig, aber der Austrittsdruck steigt über den Umgebungsdruck. Infolgedessen findet die Expansion bis auf Umgebungsbedingungen außerhalb der Düse statt [1]. Das kritische Verhältnis zwischen Speicher- und Umgebungsdruck für den Aufbau einer schallharten (gedrosselten) Strömung eines kompressiblen Gases liegt bei etwa 1,9 bei STP (Normalbedingungen). Liegt das Druckverhältnis unter 1,9, wird der Gasstrom in einer Düse expandiert (Unterschall). Liegt das Verhältnis über 1,9, so werden die Freisetzungen als unterexpandierte (schallgedämpfte oder gedrosselte) Strömung betrachtet.

Bei einem unterexpandierten Strahl tritt die Strömungsexpansion in der Nähe des Düsenaustritts auf und ist durch eine komplexe Schockstruktur gekennzeichnet, die gut dokumentiert und an anderer Stelle veröffentlicht ist [7]. Das Schema für eine unterexpandierte Schockstruktur ist in Abbildung 2a dargestellt. In diesem Diagramm ist eine Verteilung der *Machzahl* ( $M$  oder  $Ma$ ) zu sehen, die eine dimensionslose Zahl ist, die dem Verhältnis zwischen der lokalen Strömungsgeschwindigkeit und der lokalen Schallgeschwindigkeit entspricht. Die *Mach-Scheibe* ist ein starker Stoß, der senkrecht zur Strömungsrichtung des unterexpandierten Strahls steht. Eine numerisch simulierte Anfangsphase der Freisetzung von unterexpandiertem Wasserstoff ist in Abbildung 2b dargestellt, und zwar für das Druckverhältnis in einem Lagertank und der Atmosphäre 160.

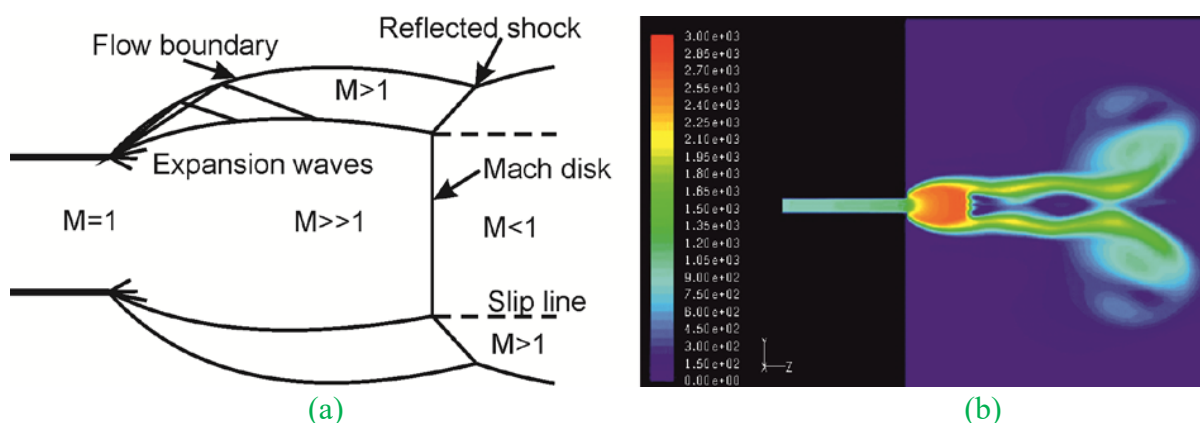


Abbildung 2. (a) Schematische Darstellung der Struktur eines unterexpandierten Strahls [8]; (b) ein Anfangsstadium der Freisetzung eines unterexpandierten Strahls bei 16,1 MPa durch einen Kanal von 0,25 mm mit einem Massendurchsatz von 0,46 g/s [1].

Wie in Abbildung 2a zu sehen ist, wird die lokale Schallgeschwindigkeit am Düsenausgang mit der Machzahl  $M = 1$  erreicht. Dann erfährt das ausströmende Gas eine rasche Expansion



und beschleunigt schnell auf hohe Machzahlen ( $\gg 1$ , bis zu  $M = 8$  für 70 MPa Speicherdruck), begleitet von der Abnahme von Druck und Dichte. An der Austrittskante der Düse bildet sich eine Reihe von Expansionswellen. Diese Expansionswellen werden als Kompressionswellen von der freien Oberfläche an der Strömungsgrenze des Strahls reflektiert, verschmelzen und bilden einen Trommelschock und eine Mach-Scheibe. Sich wiederholende Tonnenschocks und Mach-Scheiben-Strukturen stromabwärts der ersten Mach-Scheibe treten intermittierend bei Druckverhältnissen unter 20 auf. Bei typischen Wasserstoffspeicherdrücken ist zu Beginn des *Blowdowns* (d. h. eines Prozesses, bei dem der Speicherdruck während eines Lecks mit der Zeit abnimmt) eine kurze Struktur mit nur einer Machscheibe zu erwarten. Wenn das Gas mit sehr hoher Mach-Zahl die Mach-Scheibe durchquert, nimmt seine Geschwindigkeit schlagartig auf Unterschallgeschwindigkeit ab und Druck (bis zum Atmosphärendruck) und Dichte steigen an. Die sich ergebende Strömungsstruktur nach der Mach-Scheibe besteht aus einem Unterschallkern ( $M < 1$ ), der von einer Überschallhülle ( $M > 1$ ) umgeben ist, wobei eine Scherschicht, die so genannte Gleitlinie, diese beiden Bereiche trennt.

#### 4.2 Unterschall-, Schall- und Überschalldüsen

Die Machzahl des Strahls, die gleich der Strahlgeschwindigkeit ( $U$ ) geteilt durch die Schallgeschwindigkeit des in die Umgebungsluft austretenden Gases ( $C$ ) ist, ist ein wichtiger Parameter zur Bestimmung seines Verhaltens. Bei Düsen mit *Unterschallströmung* ist  $U < C$ ,  $M < 1$ ; der Druck an der Austrittsebene ist gerade gleich (oder sehr nahe) dem atmosphärischen Druck. Wie bereits erwähnt, bilden viele Lecks aus Hochdruckspeichern einen *unterexpandierten* Strahl mit Schallströmung am Strahlaustritt (wenn  $U = C$ , und  $M = 1$ ). Überschallstrahlen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Geschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit ist ( $U > C$ ).

Bei hohen Drücken bleibt die Austrittsgeschwindigkeit lokal schallartig, aber der Austrittsdruck steigt über den Umgebungsdruck, so dass außerhalb der Düse eine Expansion bis auf Umgebungsbedingungen stattfindet. Für Wasserstoff beträgt das kritische Druckverhältnis für eine schallartige (gedrosselte) Strömung eines kompressiblen Gases 1,89 bei STP (Normalbedingungen) ( $\gamma = 1,405$ ) und 1,89 bei NTP ( $\gamma = 1,39$ ) gemäß der theoretischen Gleichung für gedrosselte Strömungsbedingungen:

$$\frac{P_R}{P_N} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (1)$$

wobei  $P_R$  und  $P_N$  der Druck im Reservoir bzw. am Düsenausgang und  $\gamma$  das Verhältnis der spezifischen Wärme ist. Die Gleichung (1) kann zur Schätzung des Drucks am Leck (Düsenaustritt)  $P$  verwendet werden, wenn der Speicherdruck im Reservoir  $P_R$  bekannt ist [1].

Ishii et al. [8] berichteten, dass Strahlen eines zweiatomigen Gases ( $\gamma = 7/5$ ), die aus einem offenen Ende des Reagenzglases austreten, dazu neigen, Unterschallstrahlen zu sein, wenn das Verhältnis der Drücke in den Hoch- und Niederdruckkammern (der einzige Parameter, der die

Stärke des Strahls steuert) zwischen 1 und 4,1 liegt; Unterschallstrahlen für Druckverhältnisse im Bereich von 4,1 bis 41,2; und Überschallstrahlen für Druckverhältnisse über 41,2. Das Druckverhältnis von 4,1 liegt oberhalb des kritischen Verhältnisses von 1,9 für die Schallströmung (gedrosselt). Es besteht jedoch kein Widerspruch: Jedes der beiden Druckverhältnisse (Hochdruckkammer zum Rohrausgang und Rohrausgang zur Niederdruckkammer) kann  $p_{R/PN} = 2,05$  betragen, was nahe am theoretischen kritischen Druckverhältnis von 1,9 für Schallströmung liegt. Der Unterschied könnte auf Verluste zwischen Hoch- und Niederdruckkammern zurückzuführen sein.

### 4.3 Impuls- und auftriebsgesteuerte Düsen

Alle Strahlen lassen sich je nach der Wirkung des Auftriebs in drei Typen unterteilen. Diese Strahltypen sind in Abbildung 3 für einen horizontal ausgerichteten Strahl schematisch dargestellt. Vollständig *impulsgesteuerte Strahlen* werden durch den Auftrieb nicht beeinflusst, während vollständig *auftriebsgesteuerte Strahlen* schnell von der horizontalen in die vertikale Strömungsrichtung umgelenkt werden. Der dritte Typ ist ein *Übergangsstrahl*, der einen impulsgesteuerten Teil in der Nähe des Düsenaustritts und einen auftriebsgesteuerten Teil der Strömung weiter stromabwärts aufweist, wenn die Strahlgeschwindigkeit abnimmt und der Strahldurchmesser zunimmt. Es ist wichtig, den Zeitpunkt zu kennen, an dem dieser Übergang stattfindet, da er sich auf die Gefahrendistanz im Besonderen und auf die Strategie und Taktik der ersten Reaktion im Allgemeinen auswirkt [1].

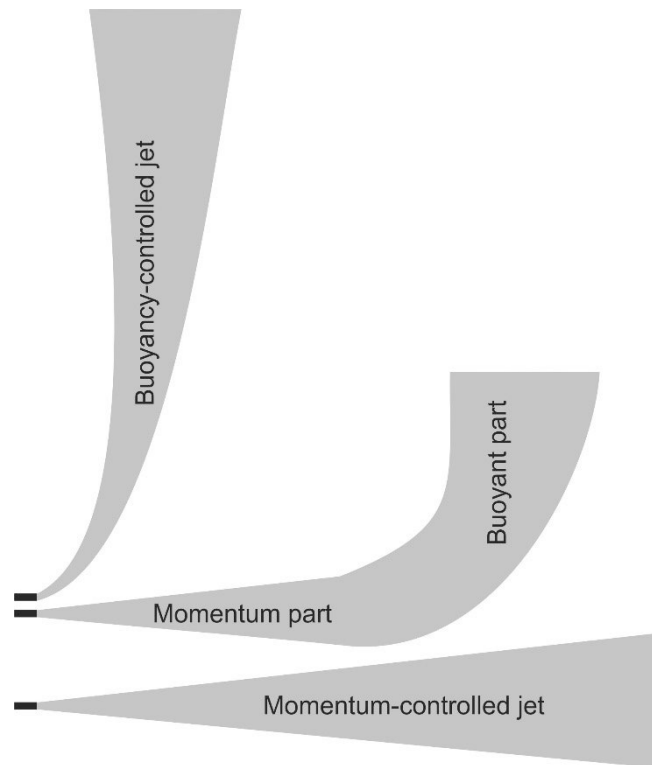


Abbildung 3. Schematische Darstellung der impulsgesteuerten, übergangsweisen und auftriebsgesteuerten Strahlen [1].

## 5. Zerfall der Wasserstoffkonzentration in impulsgesteuerten Strahlen

Die Wasserstoffkonzentration in einem Strahl fällt von 100 % an der Düse (d. h. an einer Leckstelle) zu den niedrigeren Werten entlang der Strahlachse und von der Achse zur Peripherie hin ab. Für einige Berechnungen ist es bequemer, einen unterexpandierten Strahl aus einer tatsächlichen Düse durch einen expandierten Strahl aus einer so genannten *effektiven* oder *fiktiven Düse* zu ersetzen. Es gibt mehrere Theorien über fiktive Düsen. Das am häufigsten zitierte Modell ist das von Birch et al. [9] im Jahr 1984 vorgeschlagene. Die erstgenannten Modelle basieren jedoch auf der Zustandsgleichung eines idealen Gases und sind daher nicht auf Speicherdrücke über 10-20 MPa anwendbar, wenn das nicht-ideale Verhalten eines Gases berücksichtigt werden muss. Die erste Theorie des *unterexpandierten Strahls*, die das nicht-ideale Verhalten von hochkomprimiertem Wasserstoff berücksichtigt, wurde von Schefer et al. [10] im Jahr 2007 veröffentlicht. Die Berechnungen des fiktiven Düsendurchmessers von Schefer et al. [10] ähneln denen von Birch et al. [9], jedoch wird die Abel-Noble-Gleichung angewandt und die Annahme von Birch et al. über die Schallgeschwindigkeit an der fiktiven Düse wird gelockert [9,10]. Infolgedessen sagt die Theorie von Schefer et al. [10] gleichmäßige Überschallgeschwindigkeiten am fiktiven Düsenausgang bei hohen Speicherdrücken voraus.

Molkov et al. [11] entwickelten eine unterexpandierte Theorie, die eine Alternative zu der von Schefer et al. [10] vorgeschlagenen Theorie darstellt. Diese Theorie basiert auf den Massen- und Energieerhaltungsgleichungen und nicht auf den Massen- und Impulserhaltungsgleichungen. Ähnlich wie Birch et al. [9] basiert das von Molkov et al. [11] entwickelte Modell auf der Annahme einer gleichmäßigen Schallströmung durch die fiktive Düse. Das für die Theorie des *unterexpandierten Strahls* verwendete Berechnungsschema ist in Abbildung 4 dargestellt.

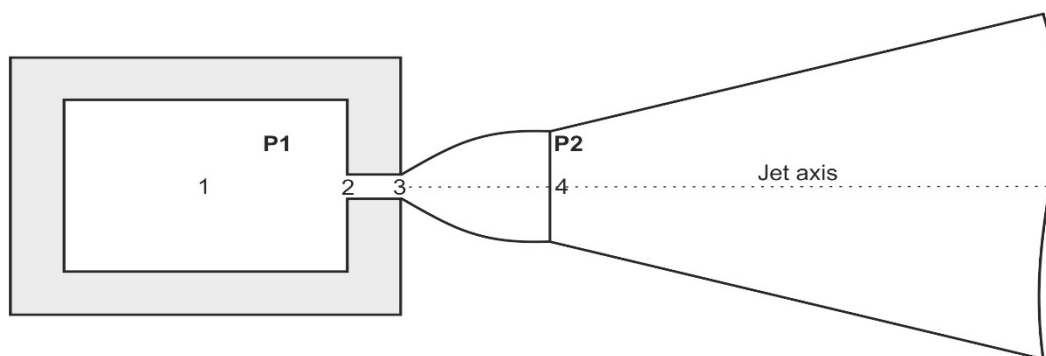


Abbildung 4. Das Schema eines unterexpandierten Strahls: 1 - Hochdruckbehälter; 2 - Düseneintritt; 3 - Düsenaustritt (= fiktiver Düseneintritt); 4 - fiktiver Düsenaustritt (3-4: kein Entrainment); P1 - Speicherdruck; P2 - Atmosphärendruck (nach der Strahlexpansion) [1].

Es wird angenommen, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Speicherbehälter (1) gleich Null ist. Die Strömungsparameter am Eingang des Leckagekanals, dem Düseneingang, werden als



(2) und am eigentlichen Düsenaustritt - als (3) bezeichnet. Für Schall- und Überschallströmungen sind die Parameter am Düsenaustritt (3) diejenigen für eine gedrosselte Strömung, und daher ist die Düsenaustrittsgeschwindigkeit gleich der lokalen Schallgeschwindigkeit (Machzahl  $M = 1$ ). Die fiktive Düse liegt zwischen dem tatsächlichen Düsenaustritt (3) und dem fiktiven Düsenaustritt (4). Am fiktiven Düsenaustritt (4) entsprechen die Strahlparameter einem vollständig expandierten Strahl mit einem Druck, der dem Umgebungsdruck entspricht, und einer gleichmäßigen Strömungsgeschwindigkeit, die der lokalen Schallgeschwindigkeit entspricht. In einigen Fällen können die wesentlichen Neben- und Reibungsverluste im Strömungsweg (2) - (3) nicht vernachlässigt werden, z. B. im Falle eines sehr engen Risses [1].

Wie bereits erörtert, ist die Verbrennung im Allgemeinen das Hauptproblem bei der Betrachtung der Schadenskriterien. Eine ungeplante Freisetzung von Wasserstoff aus Hochdruckgeräten und Infrastrukturen wird einen stark *unterexpandierten Strahl* bilden. Dies könnte zur Bildung einer großen *entflammaren Wasserstoff-Luft-Hülle* führen. Die Größe der entflammaren Hülle ist der deterministische Gefahrenabstand von der Freisetzungsquelle. Im Falle einer anschließenden Zündung können Menschen, Gebäude, Geräte und die Umwelt in einen Brand verwickelt werden. Das Vorhandensein einer Zündquelle innerhalb der Hülle könnte schwere *Stichflammen*, *Deflagration* und möglicherweise einen *Übergang von Deflagration zu Detonation* auslösen. Es ist zu beachten, dass die thermischen Effekte von Stichflammen und die Druckeffekte einer Deflagration oder Detonation die durch die Größe der brennbaren Hülle bestimmte Gefahrendistanz überlagern können [1]. Daher ist die Kenntnis der Gesetze im Zusammenhang mit der Wasserstoffausbreitung und der Bildung einer brennbaren Wolke, einschließlich des *axialen Konzentrationsabfalls* für beliebige Strahlen mit verschiedenen Parametern, für die Entscheidungsfindung der Einsatzkräfte von wesentlicher Bedeutung.

Erreicht die brennbare Atmosphäre in Hochhäusern einen Lufteinlass, können die Folgen für die Bewohner und die Gebäudestruktur katastrophal sein. Daher ist es wichtig, den am weitesten vom Leck entfernten Punkt zu bestimmen, an dem ein Strahl gezündet werden kann. Im Allgemeinen wird dies durch eine Wasserstoffkonzentration von 4 Vol.-%, d. h. durch die untere LFL (untere Zündgrenze oder unter Explosionsgrenze - UEG) definiert. Obwohl die Wahl der Wasserstoffkonzentration umstritten ist, kommt es auch dann zu einem direkten Flammenkontakt infolge einer Stichflamme, wenn sich eine Person innerhalb der 4-Vol.-%-Wasserstoffatmosphäre befindet, wenn eine Wasserstoffzündung auftritt. Die Größe der entflammaren Atmosphäre, d. h. der Abstand zur LFL von 4 Vol.-%, nimmt proportional zum Durchmesser zu [1].

Das im Folgenden erläuterte *Ähnlichkeitsgesetz* wird für die Vorhersage des *axialen Konzentrationsabfalls* eines austretenden Gases für Unterschall-, Überschall- und Überschallstrahlen verwendet. Es wird gezeigt, dass das Ähnlichkeitsgesetz in einem weiten

Bereich von Bedingungen von expandierten bis zu stark *unterexpandierten Strahlen* gültig ist. Es kann für die Berechnung von *Gefahrenabständen* verwendet werden, die durch die Größe der brennbaren Atmosphäre bestimmt werden. Das nicht-ideale Verhalten von Wasserstoff bei hohen Drücken und die Unterexpansion der Strömung in einem Düsenausgang werden berücksichtigt. In früheren Veröffentlichungen von Molkov und seinen Kollegen [11, 14] wurden diese Abstände als Trenn- oder Gefahrenabstände bezeichnet, deren Definitionen von Dokument zu Dokument variierten. Im Folgenden werden einige Beispiele für die Definitionen gegeben:

*"ein Mindestabstand, der bestimmte Ziele (z. B. Menschen, Bauwerke oder Ausrüstungen) von den Folgen möglicher Unfälle im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Wasserstoffanlage trennt"* [12].

*"ein Mindestabstand zwischen einer Gefahrenquelle und einem Objekt (Mensch, Ausrüstung oder Umwelt), der die Auswirkungen eines wahrscheinlich vorhersehbaren Zwischenfalls abschwächt und verhindert, dass ein kleiner Zwischenfall zu einem größeren Zwischenfall eskaliert"* [3].

Die folgenden Faktoren beeinflussen die Gefahrenabstände:

- die Art der Gefahr,
- die Betriebsbedingungen und die Auslegung der analysierten Ausrüstung/Anlage,
- die Art des Ziels/Objekts (Menschen, Strukturen, Ausrüstung),
- der Umgebung zwischen dieser und der Gefahrenquelle. Auf diese Weise kann das Schadenspotenzial für Menschen oder Bauwerke bewertet und mit den Schadenkriterien verglichen werden.

Um zu definieren, wo sich das brennbare Wasserstoff-Luft-Gemisch bildet, ist es wichtig zu wissen, wie die Konzentration von 100 Vol.-% an der Düse bis zur LFL, d.h. auf 4 Vol. Die ursprüngliche Form des Ähnlichkeitsgesetzes (Gleichung 2) für den axialen Konzentrationsabfall in den expandierten Rundstrahlen wurde von Chen und Rodi [13] im Jahr 1980 vorgeschlagen:

$$C_{ax}^m = 5.4 \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_S}} \frac{D}{x} \quad (2)$$

wobei der axiale Massenanteil des Wasserstoffs im Strahl im Abstand  $x$  von der Düse,  $\rho_S$  die Dichte des umgebenden Gases, d. h. der Luft (1,205 kg/m<sup>3</sup> am NTP),  $D$  der tatsächliche Düsendurchmesser am Ausgang,  $\rho_N$  die Wasserstoffdichte am Düsenausgang (der einzige unbekannte Parameter) ist  $C_{ax}^m$ .

Die "unbekannte" Dichte  $\rho_N$  kann mit Hilfe der *Theorie des unterexpandierten Strahls* berechnet werden, die am HySAFER-Zentrum der Universität Ulster entwickelt und validiert



wurde. Der Abstand zur LFL ist proportional zum Leckdurchmesser. Daher muss die Auslegung von FCH-Systemen den technischen Anforderungen an den Massendurchfluss genügen und gleichzeitig die Anforderung berücksichtigen, den Innendurchmesser der Rohrleitungen zu minimieren, um die potenzielle Gefahrenentfernung zu verringern, wie aus Gleichung (2) hervorgeht. Man sollte bedenken, dass auch  $\rho_N$  die Größe der brennbaren Atmosphäre von 4 Vol.-% (d. h. der Massenanteil  $C_m$  von 0,00288) eine Rolle spielt - je größer der Betriebsdruck einer FCH-Anwendung, desto größer die fiktive Düsendichte  $\rho_N$  und folglich die größere Gefahrendistanz.

Aus dem Ähnlichkeitsgesetz(2) kann gefolgert werden, dass für Wasserstoffstrahlen, die aus einem gegebenen Speicherdruck (d. h. fester Wert von  $\rho_N$ ) in eine stehende Luft freigesetzt werden, das Verhältnis zwischen dem Abstand zu einer festen Konzentration,  $x = L$ , ausgedrückt als Massenanteil, und dem Düsendurchmesser,  $D$ , eine Konstante ist, d. h.  $L/D = \text{const}$ . Dies bedeutet, dass der Gefahrenabstand proportional zum Leckdurchmesser ist. Bitte beachten Sie, dass der Massenanteil ( $C_m$ ) aus Gleichung (3) auf der Grundlage des Volumenanteils (Mol) ( $C_v$ ) berechnet werden kann:

$$1/C_m = 1 + (1/C_v - 1)M_s/M_N \quad (3)$$

wobei  $M_s$  und  $M_N$  die Molekularmassen des umgebenden Gases (28,84 g/mol wird für Luft angenommen) bzw. des Düsengases (Wasserstoff) sind. Zum Beispiel entspricht der Massenanteil von 0,0282 dem Volumenanteil von 0,295 (29,5 Vol. % Wasserstoff in Luft, d. h. einem stöchiometrischen Gemisch); der Massenanteil von 0,044365 entspricht dem Volumenanteil von 0,401 (40,1 Vol. %, d.h. einem Gemisch mit maximaler Brenngeschwindigkeit), 0,013037 - 0,16 (16 Vol. %), 0,008498 - 0,11 (11 Vol. %), 0,005994 - 0,08 (8 Vol. %), 0,00288 - 0,04 (4 Vol. % - LFL), 0,00141 - 0,02 (2 Vol. %), 0,0007 - 0,01 (1 Vol. %).

Im Falle voll expandierter, runder Strahlen ergibt das Ähnlichkeitsgesetz(2) folgende Verhältnisse eines Abstands zu einer bestimmten axialen Wasserstoffkonzentration (in Vol.-%),  $L$ , zur charakteristischen Düsengröße,  $D$  (für atmosphärischen Düsendruck und expandierte Unterschallstrahlen, mit Dichteverhältnis  $\rho_S/\rho_N = 14,38$ :  $(L/D)_{30\%} = 49,1$ ;  $(L/D)_{4\%} = 491$ ;  $(L/D)_{2\%} = 1003$ ;  $(L/D)_{1\%} = 2019$ . Der Abstand zur LFL von Wasserstoff in Luft (4 Vol.-%) in den impuls-gesteuerten expandierten Düsen entspricht beispielsweise 491 Düsendurchmessern. Bitte beachten Sie, dass die Korrelation (2) von Chen und Rodi [13] durch Konzentrationsmessungen in vertikalen Strahlen nur bis zum Verhältnis  $L/D = 50$  validiert wurde. Ihre Anwendbarkeit oberhalb dieses Bereichs sollte bestätigt werden [1].

Wendet man das Ähnlichkeitsgesetz, von Chen und Rodi [13] in seiner ursprünglichen Form (2) auf die expandierten Strahlen an, so wäre die Berechnung der Gefährdungsabstände für ungezündete Wasserstoff-Rundstrahlen einfach: unter Verwendung von Gleichung (2) mit der Wasserstoffdichte am Düsenausgang  $\rho_N = 0,0838 \text{ kg/m}^3$  (NTP). Für die *unterexpandierten*



Strahlen gibt es jedoch einen unbekannt Parameter, nämlich die Dichte des Gases am eigentlichen Düsenaustritt,  $\rho_N$ . Diese Dichte kann mit den Theorien zur Unterexpansion berechnet werden, entweder ohne Verluste [11] oder mit Verlusten [14].

Das Ähnlichkeitsgesetz für das Abklingen der Wasserstoffkonzentration entlang der Achse der impuls gesteuerten Strahlen sowie die experimentellen Daten für unterexpandierte Wasserstofffreisetzungen sind in Abbildung 5 dargestellt.

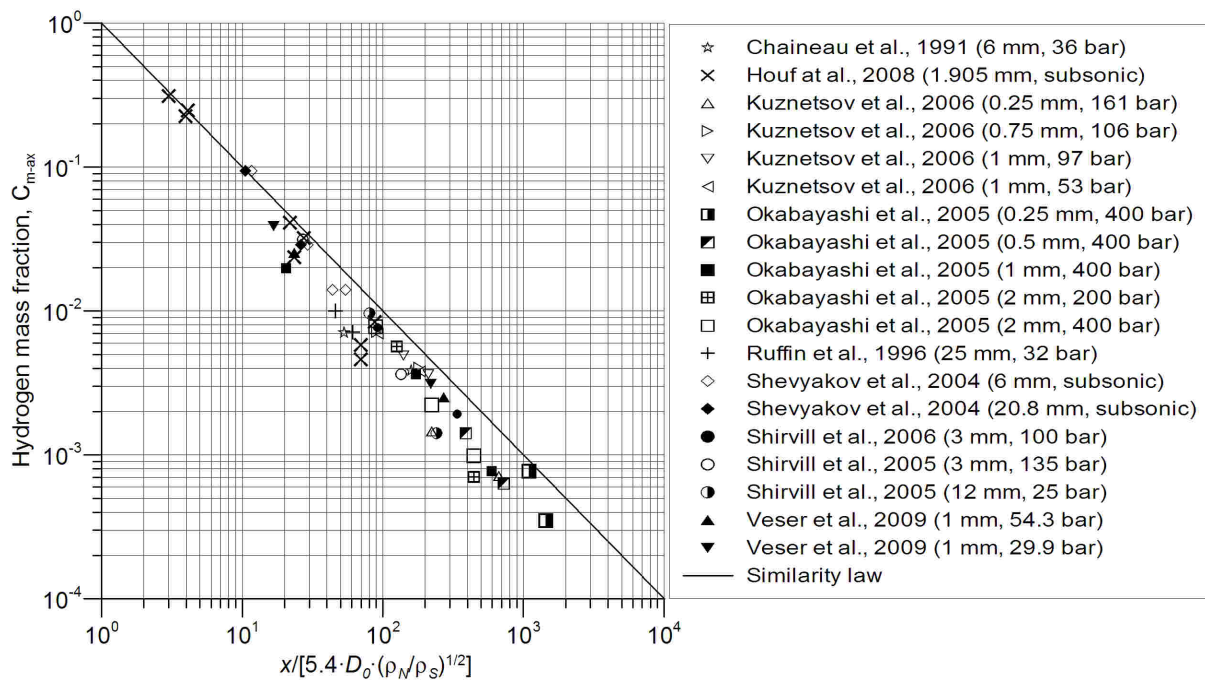


Abbildung 5. Das Ähnlichkeitsgesetz (gerade, durchgezogene Linie) und die experimentellen Daten (Symbole) über den axialen Konzentrationsabfall in den impuls gesteuerten expandierten und unterexpandierten Wasserstoffstrahlen [1].

Die experimentellen Daten über den axialen Konzentrationsabfall von reinem Wasserstoff in impuls gesteuerten Unterschall-, Schall- und Überschallstrahlen, die aus Behältern unterschiedlichen Volumens mit einem Druck von bis zu 40 MPa und durch Düsen mit Durchmessern von 0,25 bis 100 mm austreten, sind in [2] beschrieben. Die Wasserstoffkonzentration in der Luft lag in einem Bereich zwischen 1 und 86,6 Vol. Das Ähnlichkeitsgesetz wurde für die Verhältnisse  $x/D$  im Bereich von 4 bis 28.580 validiert. Es wurden laminare und turbulente, expandierte und unterexpandierte impuls gesteuerte Strahlen verwendet, um den universellen Charakter der Ähnlichkeitstheorie zu bestätigen [2]. Es ist zu beachten, dass das Ähnlichkeitsgesetz in Bezug auf die experimentellen Datenpunkte konservativ ist, was auf den Einfluss von Reibung und geringen Verlusten in den Experimenten zurückzuführen ist.

Wie bereits erwähnt, beträgt der Massenanteil von Wasserstoff, der der LFL (4 Vol.-%) entspricht, 0,00288. Setzt man diesen Wert zusammen mit der Luftdichte von 1,205 kg/m<sup>3</sup> (Normalbedingungen) ein, so vereinfacht sich Gleichung (2) zu folgender Formel:

$$x_{4\%} = 1708 \cdot \sqrt{\rho_N} \cdot D \quad (4)$$

die zur Bewertung der Größe der entzündbaren Atmosphäre bis zu 4 Vol.-% Wasserstoff (Gefahrenabstand für die Freisetzung von nicht entzündetem Wasserstoff) verwendet werden kann.

Das Ausmaß der nicht gezündeten Wasserstofffreisetzung kann mit zwei Methoden berechnet werden:

1. Das Nomogramm für das Abklingen der Wasserstoffkonzentration.
2. e-Laboratorium (<https://hyresponder.eu/e-platform/e-laboratory/>).

Das *Nomogramm* für die grafische Auswertung des Abfalls der Wasserstoffkonzentration unter Verwendung des Ähnlichkeitsgesetzes und der Theorie des unterexpandierten Strahls ohne Verluste ist in Abbildung 6 dargestellt. Das Nomogramm besteht aus vier Hauptgrafiken mit den Titeln: "Volumen- zu Massenanteil", "Ähnlichkeitsgesetz", "Wahl des Leckdurchmessers" und "Wahl der Dichte am Düsenaustritt" sowie einer zusätzlichen Grafik "Berechnung der Dichte am Düsenaustritt anhand von Speicherdruck und -temperatur" (basierend auf Berechnungen nach der Theorie des unterexpandierten Strahls ohne Verluste).

Die Verwendung des Nomogramms für die Berechnung des Abstands von der Düse (z. B. 1 mm Durchmesser) bis zu den 4 Vol.-% Wasserstoff in Luft (blau gestrichelte Linie) entlang der Achse der Freisetzung aus einem Lagertank bei einem Druck von 70 MPa und einer Temperatur von 300 K wird nachstehend gezeigt.

1. Ziehen Sie die vertikale Linie von dem Punkt auf der horizontalen Achse "Volumenanteil des Wasserstoffs", der der interessierenden Konzentration (4 Vol.-% oder 0,04) entspricht, nach unten bis zum Schnittpunkt mit der Linie des Diagramms "Volumen-/Massenanteil" (linke, obere Ecke in Abbildung 6).
2. Zeichnen Sie die horizontale Linie von diesem Schnittpunkt zum Schnittpunkt mit der Linie des Ähnlichkeitsgesetzes in der rechten oberen Ecke des Diagramms "das Ähnlichkeitsgesetz" (Abbildung 6).
3. Ziehen Sie die vertikale Linie vom Schnittpunkt im Diagramm "Ähnlichkeitsgesetz" nach unten bis zum Schnittpunkt mit der Linie, die dem Durchmesser von 1 mm im Diagramm "Wahl des Leckdurchmessers" entspricht (Abbildung 6). Bitte beachten Sie, dass das Diagramm "Wahl des Leckdurchmessers" acht Linien enthält, die den folgenden Leckdurchmessern entsprechen (von oben nach unten): 15 mm, 10 mm, 5 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,1 mm). Diese Zahlen werden auf der rechten Seite des Diagramms angezeigt.
4. Berechnen Sie die Dichte mit Hilfe des zusätzlichen Diagramms "Berechnung der Dichte im Düsenaustritt nach Speicherdruck und Temperatur", das sich am unteren Ende des



Nomogramms befindet, indem Sie den gegebenen Druck (in unserem Beispiel - 70 MPa) auf der Ordinatenachse und eine Linie, die der gewählten Temperatur (300 K) entspricht, verwenden. Dies wird durch zwei dicke graue Pfeile im Diagramm "Berechnung der Dichte am Düsenaustritt durch Druck und Temperatur im Speicher" dargestellt. Die graphisch berechnete Dichte am Düsenaustritt für 70 MPa und 300 K beträgt etwa 23 kg/m<sup>3</sup>.

5. Kehren Sie zum Diagramm "Wahl des Leckdurchmessers" zurück und ziehen Sie die horizontale Linie vom Schnittpunkt auf der Linie "1 mm" bis zum Schnittpunkt mit einer imaginären Linie, die 23 kg/m<sup>3</sup> entspricht (die sich zwischen den beiden Linien 20 kg/m<sup>3</sup> und 50 kg/m<sup>3</sup> befindet, wie im Diagramm dargestellt). Bitte beachten Sie, dass das Diagramm fünf Linien enthält, die den Dichten 1 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup>, 10 kg/m<sup>3</sup>, 20 kg/m<sup>3</sup> und 50 kg/m<sup>3</sup> entsprechen und zwar von oben nach unten. Diese Werte werden auf der linken Seite des Diagramms angezeigt.
6. Ziehen Sie die vertikale Linie vom Schnittpunkt mit der imaginären Linie, die 23 kg/m<sup>3</sup> entspricht, nach unten zum Schnittpunkt mit der Abszissenachse "Abstand zur interessierenden Konzentration" auf dem Diagramm "Wählen Sie die Dichte am Düsenausgang". Der graphisch berechnete Abstand vom Düsenaustritt bis zur Wasserstoffkonzentration von 4 Volumenprozent beträgt also etwa 7,7 m.

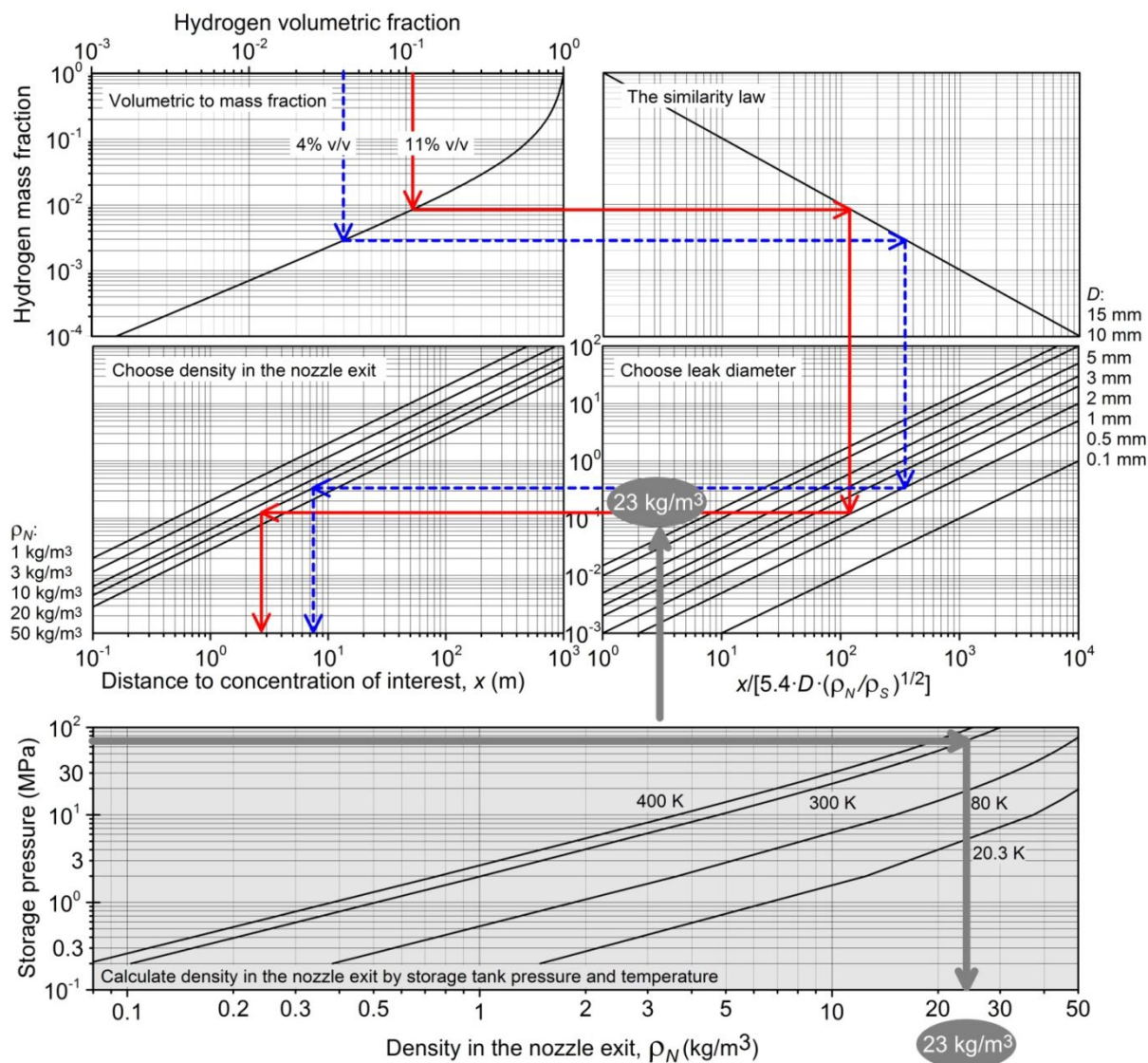


Abbildung 6. Das Nomogramm für die Berechnung des Konzentrationsabfalls in ungezündeten Strahlen [1].

Die Verwendung der Gleichung (2) für das Ähnlichkeitsgesetz mit dem genaueren Wert der Wasserstoffdichte an der Düse, der nach der *Theorie des unterexpandierten Strahls* ( $23,95 \text{ kg/m}^3$ ) und der Luftdichte von  $1,205 \text{ kg/m}^3$  (NTP) berechnet wurde, ergibt einen Abstand von  $8,36 \text{ m}$  für  $4 \text{ Vol.}$ . Der Fehler der grafischen Berechnungen ist akzeptabel und liegt unter  $10 \%$ .

Aufgabe für die Auszubildenden: Unter Verwendung des Nomogramms in Abbildung 6 soll der Abstand zu  $11 \text{ Vol.-%}$  Wasserstoffkonzentration in Luft bei gleichem Speicherdruck  $70 \text{ MPa}$ , Speichertemperatur  $300 \text{ K}$  und physikalischem Düsendurchmesser  $1 \text{ mm}$  (entspricht einer durchschnittlichen Flammenspitze) ermittelt werden.

Das e-Labor-Tool 'Jet parameters model' bietet eine schnelle und einfache Möglichkeit, die Dichte des Gases in der Düse zu bewerten, indem die folgenden Daten eingegeben werden: Druck im Reservoir, Temperatur im Tank, Öffnungsdurchmesser und Umgebungsdruck.



Das Ähnlichkeitsgesetz für *unterexpandierte Strahlen* und das Nomogramm sind leistungsbasierte Instrumente zur Berechnung von Gefahrenabständen für nicht gezündete Freisetzungen. Sie sind die Alternative zu den vorgeschriebenen Codes. So enthält beispielsweise der International Fire Code (2006) eine Tabelle mit vorgeschriebenen Abständen zwischen einem Wasserstoffsystem und verschiedenen potenziellen Zielen, einschließlich einer Luftzufuhr zu einem Gebäude [15]. Dieser Code enthält jedoch keine Angaben zu den Parametern der Wasserstoffspeicherung (Druck und Temperatur) und zur Größe des Lecks im System. Dieses Regelwerk ist ein Beispiel für einen archaischen, präskriptiven Ansatz, der im Widerspruch zu den modernen Anforderungen an Regelwerke und Normen steht, die leistungsorientiert sein müssen [1].

Die Norm NFPA 55 [16] aus dem Jahr 2010 ging im Vergleich zum präskriptiven International Fire Code [15] aus dem Jahr 2010 noch einen Schritt weiter, indem sie eine Reihe von vier Gleichungen zur Berechnung von Abständen zur axialen Konzentration von 4 Vol.-% Wasserstoff in Luft vorstellte. Molkov [1] wies auf zwei Schwachstellen in dieser Norm hin. Um die Anwendung der Methodik durch Praktiker zu "vereinfachen", wird jede der 4 Gleichungen einem recht breiten Druckbereich zugeordnet. Dies führt zu einer "programmierten" Über- und Untervorhersage des Abstandes in Abhängigkeit vom Speicherdruck. Der gravierendste Nachteil bei der Berechnung des Abstands nach NFPA 55 [16] ist jedoch die Verwendung einer Leckgröße von nur 3 % des Durchflussbereichs der Leitung (diese Wahl basiert auf Leckhäufigkeiten anderer Gase, die der Gasindustrie zur Verfügung stehen) [1]. Das Ähnlichkeitsgesetz besagt nämlich, dass bei gleicher Dichte des Wasserstoffs im Düsenaustritt  $\rho_N$ , d.h. bei gleichem Speicherdruck, die Gefahrendistanz direkt proportional zum Leckdurchmesser ist. So führt die fragwürdige Wahl einer Leckgröße von 3 % der Querschnittsfläche des Rohres in NFPA 55 [16] zu der "vorgeschriebenen" Verringerung des Abstandes um den Kehrwert der Quadratwurzel aus 0,03, d. h. um das 5,77-fache. Es liegt auf der Hand, dass die Folgen eines Volldurchbruchs einer Wasserstoffleitung katastrophal sein könnten, wenn dieser "3 %-Ansatz" weithin angewandt und von den Regulierungsbehörden durchgesetzt wird. Die risikobasierten Ansätze dürfen die wissenschaftlich fundierte technische Auslegung nicht beeinträchtigen. Die Alternativen zu dieser "erzwungenen" Verringerung des Gefahrenabstands sind die sicherheitstechnische Auslegung von Wasserstoffsystemen, z. B. die Verringerung des Drucks in der Leitung, wenn dies möglich ist, und die Verringerung des Leitungsdurchmessers auf die aus technischen Gründen erforderliche Mindestgröße und/oder die Ersetzung einer großen Leitung durch eine Reihe kleinerer Leitungen, die Verwendung von PRD mit verbesserten Sicherheitseigenschaften, usw. [1].

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass das Ähnlichkeitsgesetz zur Berechnung des Gefahrenabstands im Vergleich zu den derzeit verfügbaren Normen und Codes genauer verwendet werden kann. Diese Methode ist wissenschaftlich untermauert und kann Reibung und geringfügige Verluste in einem Leckpfad berücksichtigen, wenn/falls dies erforderlich ist. Nicht zuletzt garantiert die Wasserstoffsicherheitstechnik die Freiheit, das schlimmstmögliche



Szenario eines Bruchs der gesamten Rohrleitung zu berücksichtigen, anstatt den fragwürdigen Ansatz von 3 % der Querschnittsfläche des Rohrs, wie er in einigen Normen und Regelwerken vorgeschlagen wird [1].

## 6. Verringerung des Gefahrenabstands bei einer Wasserstofffreisetzung

Gleichung (4) zeigt, dass die Gefahrendistanz für nicht gezündete Strahlen,  $x$ , proportional zum Durchmesser der Freisetzung,  $D$ , ist und als Quadratwurzel aus dem Speicherdruck (Termdichte  $\rho_N$ ) wächst. Vor diesem Hintergrund kann die wichtigste Sicherheitsanforderung für die Freisetzung von nicht gezündetem Wasserstoff wie folgt formuliert werden: *Reduzierung des Durchmessers der Rohrleitungen (d. h. des Leckdurchmessers für ein glaubwürdiges Worst-Case-Szenario) auf das technologisch vertretbare Minimum*, in Übereinstimmung mit dem ALARP- ("as low as reasonably practicable") oder ALARA-Prinzip ("as low as reasonably achievable"), das häufig bei der Regulierung und dem Management von sicherheitskritischen und sicherheitsrelevanten Systemen verwendet wird. Das Gleiche gilt für den Durchmesser von Druckentlastungsvorrichtungen (PRDs) oder temperaturaktivierten Druckentlastungsvorrichtungen (TPRDs) [2].

### 6.1 Wann wird ein Strahl schwimmfähig?

Je nach Auftriebseffekt können die Strahlen impulsgesteuert, übergangsweise oder auftriebsgesteuert sein, wie in Abbildung 3 dargestellt. Die Gefahrendistanz für die Freisetzung von nicht gezündetem Wasserstoff ist bei einem horizontal ausgerichteten Leck höher als bei einem diagonalen oder vertikalen. In vielen Fällen stellt ein vertikaler, nicht gezündeter Strahl, der im Freien austritt, keine Gefahr für Menschen dar und verursacht keine Schäden an Gebäuden und Strukturen. Für die Einsatzkräfte ist es jedoch wichtig zu wissen, ob ein Leck ursprünglich impuls- oder auftriebsgesteuert ist oder bei welcher Wasserstoffkonzentration das Strömungsregime für denselben Strahl von Impuls zu Auftrieb wechselt (z. B. bei vertikal nach unten gerichteten Lecks).

Die im Folgenden vorgestellte Technik, die eine Unterscheidung zwischen impuls- und auftriebsgesteuerter Strömung in expandierten und unterexpandierten Düsen ermöglicht, basiert auf der Arbeit von Shevyakov et al. [17, 18], die nur mit expandierten Düsen durchgeführt wurde. Abbildung 7 zeigt in logarithmischen Koordinaten die Abhängigkeit des Verhältnisses von Abstand zu Düsendurchmesser  $x/D$  (Ordinate) für eine bestimmte volumetrische Konzentration von Wasserstoff in Luft von der *Froude-Zahl*  $Fr$  (Abszisse) in ihrer klassischen Form:

$$Fr = U^2/gD \quad (5)$$

wobei  $U$  die Geschwindigkeit am Düsenaustritt (fiktiver Düsenaustritt für unterexpandierte Strahlen), m/s,  $g$  die Erdbeschleunigung (die Standardbeschleunigung der Schwerkraft auf der

Erde beträgt  $9,80665 \text{ m/s}^2$ ),  $D$  der Düsendurchmesser (fiktiver Düsenaustrittsdurchmesser für unterexpandierte Strahlen),  $m$  ist.

Für unterexpandierte Strahlen in Abbildung 7 wurden die in (5) zu verwendenden Parameter - der fiktive Düsenaustrittsdurchmesser  $D$  und die Geschwindigkeit am fiktiven Düsenaustritt  $U$  - nach der *Theorie für unterexpandierte Strahlen* [11] berechnet. Sowohl erweiterte als auch unterexpandierte Strahlen gehorchen der gleichen funktionalen Abhängigkeit mit einer für technische Anwendungen akzeptablen Genauigkeit von 20 %.

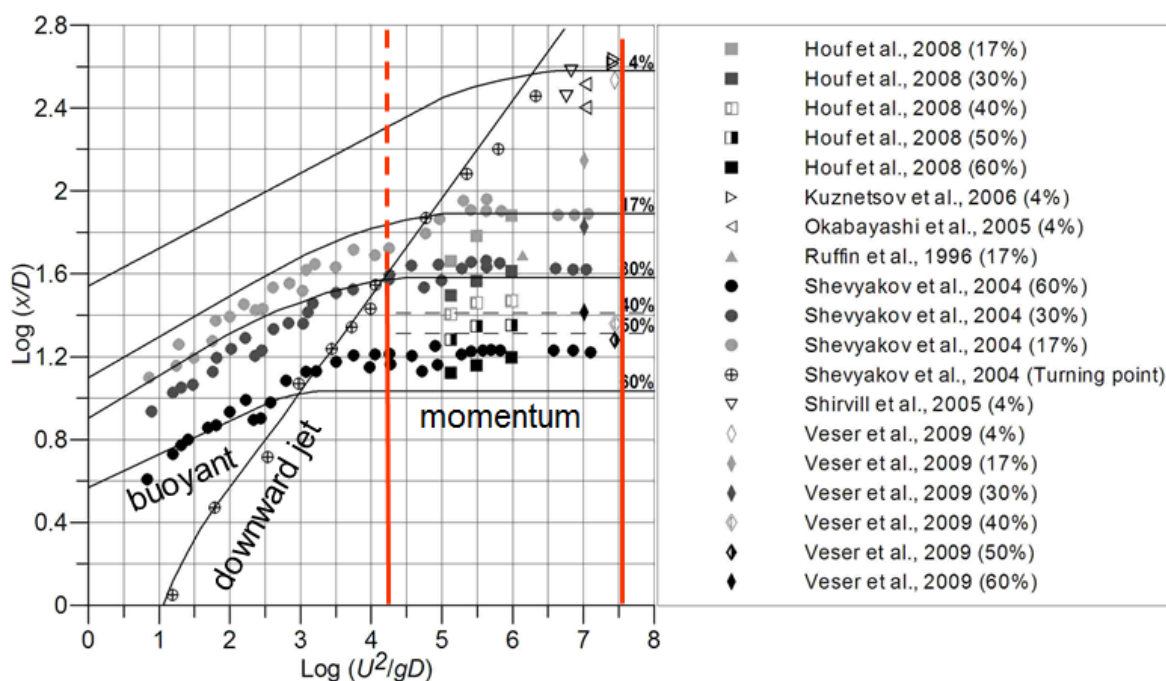


Abbildung 7. Die Abhängigkeit des Verhältnisses von Abstand zu Düsendurchmesser für eine bestimmte Wasserstoffkonzentration in Luft von der Froude-Zahl [17, 18].

Abbildung 7 zeigt fünf theoretische Kurven (durchgezogene Linien) und die experimentellen Daten von Shevyakov und Co-Autoren für expandierte Strahlen [17, 18] sowie die Daten anderer Forscher für unterexpandierte Strahlen. Praktisch alle unterexpandierten Strahlen bei wasserstoffbedingten Vorfällen/Unfällen befinden sich im impulskontrollierten Bereich, wie aus den verfügbaren Tests zur Validierung der Korrelation in Abbildung 7 hervorgeht. Vier der fünf theoretischen Kurven in der Abbildung beziehen sich auf Wasserstoffkonzentrationen von 4 Vol.-%, 17 Vol.-%, 30 Vol.-% bzw. 60 Vol.-%. Jede dieser vier Kurven hat einen ansteigenden Auftriebsteil und einen schwungvollen "Plateau"-Teil [1].

Es ist wichtig zu betonen, dass die Froude-Zahl ( $Fr$ ) beim Übergang vom schwimmenden Teil der Kurve zum impuls gesteuerten Teil von der Konzentration des betrachteten Wasserstoffs abhängt. Zum Beispiel bleibt der Strahl bei einer axialen Wasserstoffkonzentration von 60 Vol.-% im impuls gesteuerten Bereich, bis  $\text{Log}(Fr) > 3,5$  ist, während die Froude-Zahl am Düsenaustritt viel höher sein muss, d. h.  $\text{Log}(Fr) > 6,5$  (d. h. drei Größenordnungen höher),



damit der Strahl an der axialen Stelle, an der die Wasserstoffkonzentration auf 4 Vol.-% (LFL) fällt, im impulsgesteuerten Bereich ist [1].

Die fünfte Kurve in Abbildung 7, die als "abwärts gerichtete Strahlen" bezeichnet wird, ist von besonderem Interesse für diejenigen, die an der Unfallstelle Entscheidungen treffen müssen. Sie gibt für einen senkrecht nach unten gerichteten Strahl eine dimensionslose Entfernung von der Düse bis zum Wendepunkt an, an dem der Strahl seine Strömungsrichtung von unten nach oben ändert. Zur Berechnung des Abstands zum Umkehrpunkt ist nur die Kenntnis der Froude-Zahl an der Düse (fiktive Düse) erforderlich. Die fünfte Kurve schneidet jede der vier anderen Kurven in Abbildung 7 im Bereich des *Übergangs von der impulsdominierten zur auftriebsgesteuerten Strömung*, wie erwartet [1]. Um die Korrelation in Abbildung 7 zu nutzen, sollten die folgenden Schritte durchgeführt werden:

1. Berechnen Sie die Froude-Zahl des Düsenaustritts,  $Fr$ , und ihren Logarithmus. Wenden Sie die Theorie der Unterexpansion an, um den fiktiven Durchmesser des Düsenaustritts und die Geschwindigkeit im fiktiven Düsenaustritt für unterexpandierte Strahlen zu berechnen.
2. Ziehen Sie von dem Punkt auf der Abszisse (horizontale Achse), der dem Logarithmus der berechneten Froude-Zahl entspricht, eine vertikale Linie nach oben. Der Schnittpunkt dieser vertikalen Linie mit der im Diagramm als "abwärts gerichtete Strahlen" markierten Linie gibt die Konzentration an, oberhalb derer der Strahl als impulsdominiert (durchgezogene rote Linie) und unterhalb derer der Strahl als auftriebsgesteuert (gestrichelte rote Linie) eingestuft wird.

Wenn z. B. die Froude-Zahl des Strahlaustritts  $\text{Log}(Fr) = 4,25$  ist, liegt der Schnittpunkt der vertikalen Linie mit der Linie "Abwärtsstrahlen" an der Stelle der theoretischen Kurve, die 30 Vol.-% Konzentration anzeigt. Der Strahl befindet sich also im impulsdominierten Bereich, wenn die Konzentration im Strahl über 30 Vol.-% liegt, und wird schwimmfähig, wenn die Konzentration auf der Strahlachse unter 30 Vol.-% liegt (weiter stromabwärts von der axialen Konzentration von 30 Vol.-%)

Diese Technik ist recht einfach anzuwenden und kann gleichzeitig für die Einsatzkräfte sehr nützlich sein. So kann beispielsweise die Gefahrendistanz für eine horizontale Strahlfreisetzung erheblich reduziert werden, da nur die Länge des impulsdominierten Teils des Strahls als Hinweis auf die Gefahrendistanz herangezogen werden kann, anstatt die aggregierte Distanz (sowohl impuls- als auch auftriebsgesteuerte Teile des Strahls) auf 4 Vol.-% (LFL) zu reduzieren [1].

## 6.2 Was ist ein sicherer PRD-Durchmesser?

Das Ähnlichkeitsgesetz (2) ist ein einfaches und gründlich validiertes Werkzeug für die Wasserstoffsicherheitstechnik sowohl für expandierte als auch für unterexpandierte Rundstrahlen. Betrachten wir das folgende Szenario: Ein FC-Gabelstapler ist in einem



Lagerhaus abgestellt. Der Gabelstapler ist mit einem Wasserstoffspeicher ausgestattet, der mit einer Druckentlastungsvorrichtung (PRD) versehen ist. Berechnen wir, welchen Durchmesser die PRD haben sollte, um ein sicheres Ablassen von Wasserstoff aus dem Speicher bei 35 MPa nach oben zu gewährleisten. In diesem Fall möchten wir die Bildung einer brennbaren Schicht unter einer Lagerhausdecke, die sich 10 m über der PRD befindet, ausschließen. Um diese Sicherheitsstrategie zu realisieren, sollte die Konzentration auf der Düsenachse in 10 m Entfernung gleich oder kleiner als 4 Vol.-% sein (der entsprechende Massenanteil von Wasserstoff beträgt 0,00288). Die nach der Theorie des unterexpandierten Strahls für den Speicherdruck von 35 MPa berechnete Dichte des Wasserstoffs im Düsenausgang beträgt  $\rho_N = 14,4 \text{ kg/m}^3$ . Somit kann der Durchmesser des PRD aus dem Ähnlichkeitsgesetz (2) als gleich oder kleiner als 1,5 mm berechnet werden:

$$D = \frac{C_{ax}^m}{5.4} \sqrt{\frac{\rho_S}{\rho_N}} x = \frac{0.00288}{5.4} \sqrt{\frac{1.205}{14.4}} 10 = 0.0015 \text{ m}, \quad (6)$$

Um diese Sicherheitsstrategie für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Gabelstaplern im Lager zu vervollständigen, muss eine Anforderung an die Feuerwiderstandsfähigkeit des bordeigenen Speichertanks formuliert und eine Prüfung durchgeführt werden. Die Feuerwiderstandsfähigkeit sollte größer sein als die Ausblaszeit (d.h. die Zeit, die zum Entleeren des Speichers benötigt wird) des Speichers, um ein katastrophales Versagen des Speichers im Falle eines externen Feuers auszuschließen. Es ist klar, dass die Verwendung eines PRD mit größerem Durchmesser entweder eine brennbare Atmosphäre oder eine Stichflamme mit höheren Gefahren, z. B. gefährlichem Überdruck während der "verzögerten Zündung" oder der Deflagration der anfänglichen Wolke, und damit verbundenen Risiken erzeugen würde [1]. Die gezündete Wasserstofffreisetzung (oder Stichflammen) wird in einer späteren Lektion behandelt.

## 7. Ablassen eines Druckwasserstoffspeichers

Eine Abschlämmung ist ein Vorgang, der mit der Entleerung des Tankinhalts durch eine Öffnung eines TPRD/Vent/Lecks verbunden ist. Die Abblaszeit hängt von der Masse des gespeicherten Wasserstoffs, dem Volumen des Tanks, dem Druck und dem Durchmesser der Öffnung ab.

In den Tabellen 2 und 3 sind beispielsweise die Volumina, Drücke, Gewichte und Ausblaszeiten bis zum Atmosphärendruck (in s) für die Wasserstoffspeicherung an Bord ausgewählter Demonstrations- oder Prototyp-Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb angegeben. Bei einem Fahrzeug mit dem größten Speichervolumen (Fahrzeug 3, 156 l, 70 MPa) ist die Abblaszeit am längsten. Bei typischen Leckdurchmessern zwischen 4 und 6 mm liegt die Abblaszeit zwischen 124 s (knapp über 2 Minuten) und 54 s (etwas weniger als 1 Minute), was bedeutet, dass es sich um einen sehr schnellen Prozess handelt.

Tabelle 2. Beispiele für die Parameter der Wasserstoffspeicherung an Bord verschiedener BZ-Fahrzeuge

Fahrzeuge	Hersteller	Modell	Druck (MPa)	Band (L)	Gewicht (kg)	Status
1	Hyundai	Tucson Hybrid FCEV	35	152	3.6	Demonstration
2	VW	Touran HyMotion	35	81	1.9	Prototyp
3	Toyota	FCHV-adv (2008)	70	156	6.2	Prototyp
4	VW	Tiguan HyMotion	70	81	3.2	Fahrzeugprüfung

Tabelle 3. Adiabatische Abblaszeiten, berechnet für verschiedene Leckdurchmesser für Bordtanks der Fahrzeuge 1 - 4

Leckgedurchmesser [mm]	Abblaszeit Fahrzeug 1 (s)	Abblaszeit Fahrzeug 2 (s)	Abblaszeit Fahrzeug 3 (s)	Abblaszeit Fahrzeug 4 [s]
2	427	226	502	260
3	189	100	222	115
4	105	56	124	64
5	67	35	79	41
6	46	24	54	28

Abbildung 8 zeigt, wie der Druck in den Lagertanks während des Abblasens abfällt. Wie man sieht, ist der Druckabfall beträchtlich: Er sinkt schnell auf atmosphärische Werte.

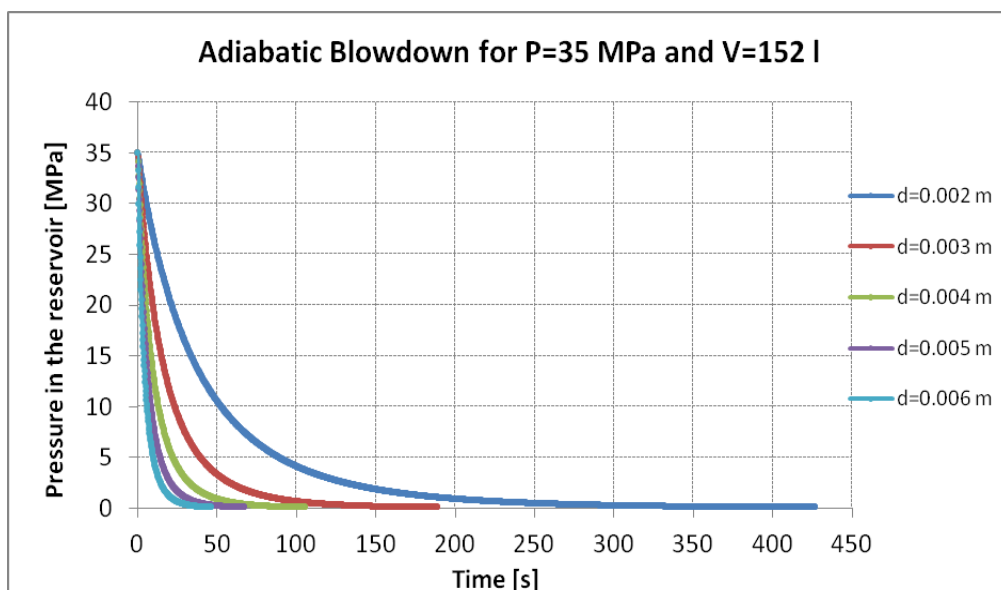


Abbildung 8. Druckabfall in einem Wasserstoffspeicher als Funktion der Zeit für verschiedene Leckdurchmesser (Fahrzeug 1).

Li et al. [19] führten 2015 im HySAFER-Zentrum der Universität Ulster eine CFD-Studie über nicht gezündete Wasserstofffreisetzungen aus dem bordeigenen Wasserstoffspeicher eines FC-Fahrzeugs durch, die ein Unfallszenario mit einer vertikalen Freisetzung von Wasserstoff aus einer thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtung (TPRD) unter einem FC-Fahrzeug im Freien (d. h. in der offenen Atmosphäre) betrachtete. Eine nicht gezündete Freisetzung von Wasserstoff kann durch eine unerwartete Auslösung einer defekten TPRD erfolgen, z. B. nach einem schweren Autounfall. TPRDs befinden sich in der Regel unterhalb des FC-Fahrzeugs (Abbildung 8), und ihre Entlüftungsöffnungen sind vertikal nach unten gerichtet, so dass der freigesetzte Wasserstoff auf den Boden trifft [19]. Der freigesetzte Wasserstoff kann eine entflammbare Atmosphäre bilden, die zu einem Flash-Fire führen kann.

Die in [19] verwendeten Abmessungen eines typischen PKW sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Autoren gingen von einem vollen Wasserstofftank an Bord mit einem Volumen von 171 Litern aus, das von der Spezifikation des Honda FCX [20] übernommen wurde. Es wurden zwei Speicherdrücke berücksichtigt: 35 und 70 MPa. Es wird angenommen, dass sich die TPRD in der Nähe des Hinterrads unter dem Fahrzeug befindet, wie in Abbildung 9 dargestellt, und ihr Öffnungsdurchmesser beträgt 4,2 mm [21]. Weitere Annahmen sind: Umgebungsdruck und -temperatur von 1 atm bzw. 20 °C; kein Wind in der Umgebung [19].

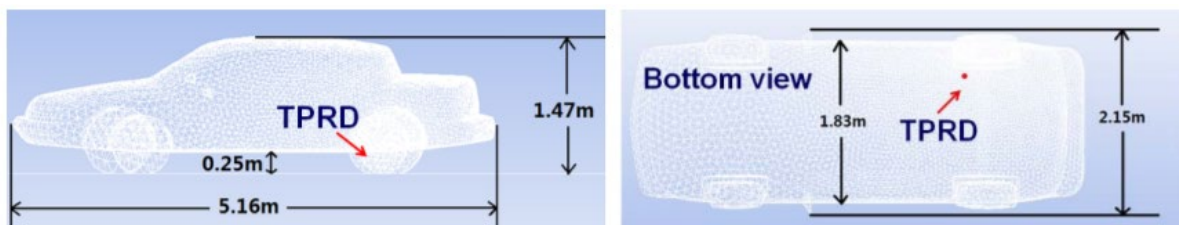


Abbildung 9. Geometrie eines FC-Fahrzeugs und Standort eines TPRD [19].

In dieser Studie wird der konservative Wert der Wasserstoffkonzentration von 4 Vol.-% als Schadenskriterium für die Allgemeinheit angewandt, während 8 Vol.-% als Schadenskriterium für Einsatzkräfte gelten, die nicht mit Wärmeschutzkleidung ausgestattet sind, wie Polizisten und medizinisches Personal. Für Feuerwehrleute, die einen Schutzanzug tragen, ist die brennbare Wasserstoffwolke harmlos, da die Ausrüstung sie vor einem möglichen Wasserstoffbrand schützt. Zusätzlich zu den Kriterien für die Schädigung von Personen wurde eine Wasserstoffkonzentration von 4 Vol.-% als Schadenskriterium für die Luftzufuhr von Gebäuden gewählt. Wenn die entflammbare Atmosphäre mit einer Wasserstoffkonzentration von 4 Vol.-% den Lufteinlass eines Hochhauses erreicht, könnten die Folgen sowohl für die Bewohner als auch für die Struktur des Gebäudes katastrophal sein [19].

Unter realen Bedingungen handelt es sich bei der Wasserstofffreisetzung aus einem Hochdrucktank nicht um eine stationäre Freisetzung, sondern um einen Abblasvorgang, bei

dem der Druck im Speicher abnimmt, bis der Tank leer ist. Das bereits erwähnte fiktive Düsenmodell kann zur Simulation der Druckdynamik im Wasserstoffspeicher während eines unterexpandierten Strahls verwendet werden. Das Cyber Laboratory Tool "Adiabatic blow-down of storage tank" wurde verwendet. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Für die Freisetzung aus dem 171-Liter-Tank mit 4,2 mm Öffnung bei 35 MPa beträgt die gesamte Abblaszeit weniger als 110 Sekunden ( $< 2$  Minuten), und der Übergang von einem unterexpandierten zu einem expandierten Strahl erfolgt bei 85 s. Für die Freisetzung aus der 4,2 mm Öffnung bei 70 MPa mit identischer Masse beträgt die gesamte Abblaszeit weniger als 75 s, und der Übergang von einem *unterexpandierten* zu einem *expandierten Strahl* erfolgt bei 58 s [19].

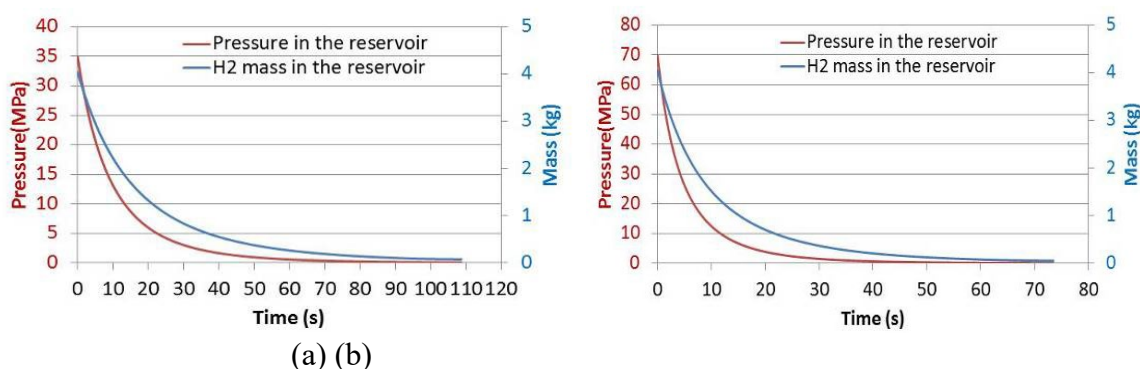


Abbildung 10. Adiabatisches Abblasen (Reduzierung des Drucks und der Wasserstoffmasse) von Lagertanks bei 35 MPa (a) und 70 MPa (b) (Öffnungsdurchmesser - 4,2 mm) [19].

Wie aus Abbildung 11 für die Responder ohne Wärmeschutzkleidung hervorgeht, beträgt die längste Gefahrendistanz vom Ort der Freisetzung 8,8 m bzw. 10,5 m für 35 MPa und 70 MPa Speicherdruck. Die Gefahrendistanz für die Freisetzung aus der Wasserstoffspeicherung bei 70 MPa ist fast 20% höher als bei 35 MPa Speicherdruck. In beiden Fällen bildeten sich die größten Gaswolke aus 8 Vol.-% Wasserstoff in Bodennähe 5,5 s nach der Öffnung des TPRD. Danach reduziert sich die zündfähige Atmosphäre, und die Gefahrenabstände nehmen ab.

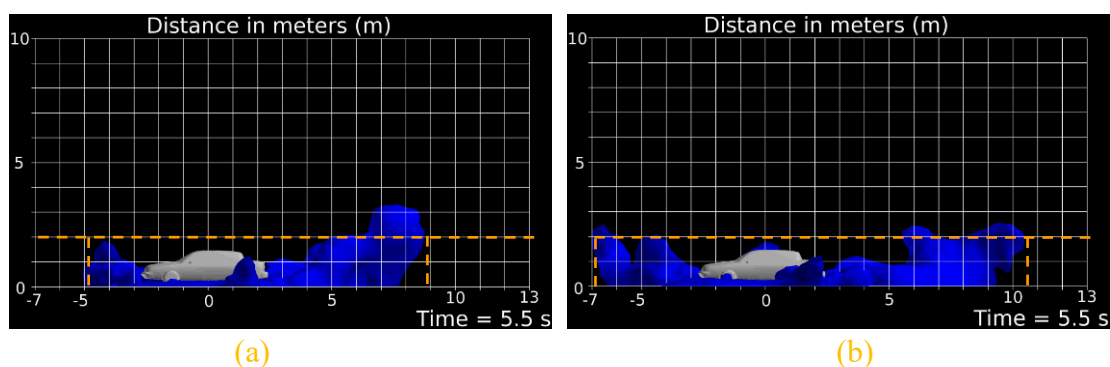


Abbildung 11. 8-Vol.-%-Wasserstoff-Atmosphäre, die 5,5 s nach Beginn der Freisetzung registriert wurden: a) für 35 MPa Speicherdruck, b) für 70 MPa Speicherdruck (längste Gefahrendistanz unter der Annahme, dass die Höhe des Responders bei 2 m abgeschnitten wird) [19].

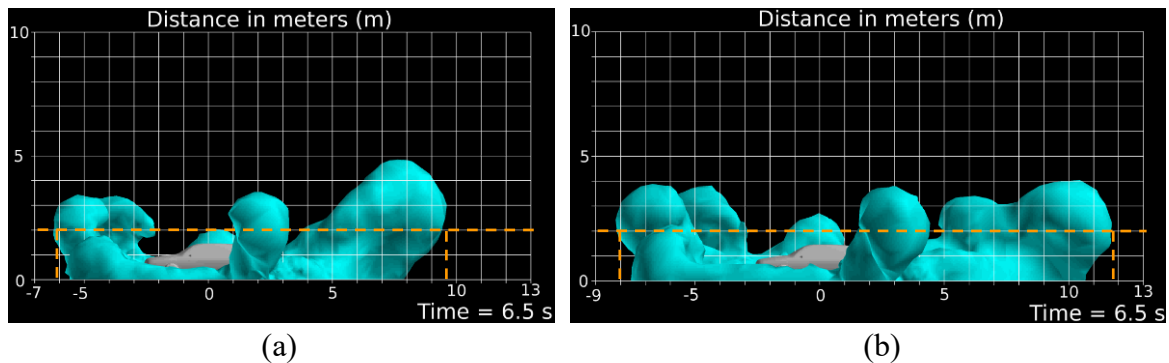
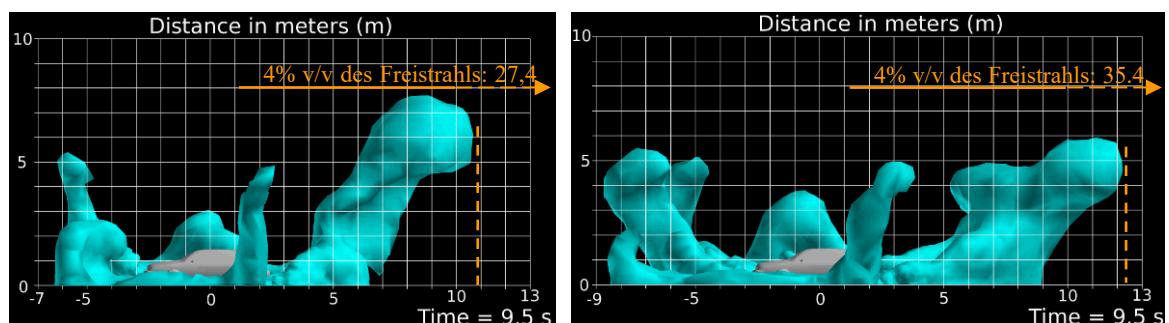


Abbildung 12. 6,5 s nach Beginn der Freisetzung registrierte Gaswolke von 4 Vol.-% Wasserstoff: a) für 35 MPa Speicherdruck, b) für 70 MPa Speicherdruck (längste Gefahrendistanz unter der Annahme, dass die Höhe des Responders bei 2 m abgeschnitten wird) [19].

Wie in Abbildung 12 für die allgemeine Öffentlichkeit am Boden dargestellt, betragen die längsten Gefahrenabstände für 35 und 70 MPa Freisetzungen 9,4 bzw. 11,8 m. In beiden Fällen wurden die größten Gaskonzentrationen von 4 Vol.-% Wasserstoff in Bodennähe 6,5 Sekunden nach der Auslösung des TPRD registriert. Danach verringern sich sowohl die zündfähige Atmosphäre als auch die Gefahrenabstände. In Abbildung 12 sind nur die 4-Vol.-%-Gaskonzentration für eine Höhe von weniger als 2 m dargestellt (orangefarbene Abschnidelinien). Die größten brennbaren Atmosphäre für den gesamten Bereich sind in Abbildung 13 dargestellt, aus denen die Gefahrenabstände für die Umgebung abgeschätzt werden können [19].

Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass die längsten Gefahrenabstände für eine Gebäudeluftansaugung 10,7 m und 12,3 m für 35 MPa bzw. 70 MPa Freisetzungen betragen. Die Gefahrendistanz für die 70 MPa-Freisetzung ist im Vergleich zur 35 MPa-Freisetzung um 15% erhöht. In beiden Fällen treten die größten Konzentrationen mit 4 Vol.-% Wasserstoff 9,5 Sekunden nach der Öffnung des TPRD auf. Danach reduziert sich die zündfähige Atmosphäre, und die Gefährdungsabstände werden kleiner. Vergleicht man die Gefährdungsdistanzen dieser auftretenden Strahlen mit den für freie Strahlen berechneten Gefährdungsdistanzen (27,4 m für 35 MPa Speicherdruck und 35,4 m für 70 MPa Speicherdruck), so zeigen die Ergebnisse eine signifikante Verringerung um mehr als 60 % bzw. 65 % für die 35 MPa und 70 MPa Freisetzungen, wie in Abbildung 13 dargestellt.



(a)

(b)

Abbildung 13. Die Ausdehnung der 4-Vol.-%-Wasserstoffkonzentrationen für nicht gezündete Freisetzungen aus Lagertanks: a) unter Druck mit 35 MPa, b) unter Druck mit 70 MPa [19].

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die CFD-Studie von Li et al. [19] gezeigt hat, dass:

- Bei der Freisetzung von Wasserstoff aus Lagertanks, die unter einem Druck von 35 MPa und 70 MPa stehen, treten die größten Gefahrenabstände innerhalb von 10 s nach dem Öffnen des TPRD auf, und die Dauer der mit der Wasserstofffreisetzung verbundenen Gefahren beträgt weniger als 2 Minuten;
- die deterministischen Gefährdungsdistanzen für die Freisetzung von nicht gezündetem Wasserstoff aus einem TPRD, der senkrecht nach unten unter einem FC-Fahrzeug ausgerichtet ist, sind deutlich kürzer als die von Freistrahlen;
- Sowohl für die Öffentlichkeit als auch für Einsatzkräfte, die nicht mit Wärmeschutzkleidung ausgestattet sind, liegt der maximale Gefahrenabstand bei einer nicht entzündeten Freisetzung je nach Lagerungsdruck zwischen 8 und 12 m;
- Um sicherzustellen, dass die Wasserstoffkonzentration am Ort des Lufteintritts in die Gebäude stets unter der LFL (4 Vol. %) liegt, sollte der Gefahrenabstand bei Freisetzungen von 35 MPa mindestens 11 m und bei Freisetzungen von 70 MPa mindestens 13 m betragen.

Ungezündete Wasserstofffreisetzungen in Innenräumen werden später in der Lektion "Enge Räume" behandelt.

Im Allgemeinen besteht die wichtigste Sicherheitsstrategie für den Umgang mit einem Wasserstoffleck darin, den Massenstrom zu minimieren, z. B. durch Verringerung der Größe eines potenziellen Lecks, indem die Rohrdurchmesser so klein wie möglich gehalten werden, und das Leck "loszulassen", um zu verhindern, dass sich Wasserstoff auf einem gefährlichen Niveau ansammelt, wenn ein entflammbares Wasserstoff-Luft-Gemisch ein inakzeptables Risiko darstellt [1]. Die Verhinderung und Eindämmung von Leckagen von nicht gezündetem Wasserstoff wird im Folgenden erörtert.

## 8. Verhinderung von Wasserstofflecks

Die ersten Schritte vor der Entdeckung und Eindämmung von Wasserstofffreisetzungen sind die Präventivmaßnahmen zur Kontrolle der damit verbundenen Risiken. Präventivmaßnahmen sind Sicherheitsmaßnahmen, die auf die Kombination von Ursachen eines gefährlichen Ereignisses einwirken können, um es zu verhindern. Diese Maßnahmen verringern die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses. Sie zielen darauf ab, einen Verlust der Dichtheit und einen Ausfall der Ausrüstung zu verhindern. Sie umfassen unter anderem die folgenden Maßnahmen:



- Verhinderung der Bildung entzündlicher Atmosphären durch eine grundsätzlich sicherere Konstruktion von FCH-Systemen;
- Wählen Sie die Materialien für FCH-Systeme sorgfältig aus, um Wasserstoffversprödung zu vermeiden;
- Minimieren Sie die Menge an Wasserstoff (und möglicherweise Sauerstoff), die gespeichert wird und an einem Vorgang beteiligt ist;
- Prüfung der Ausrüstung;
- Physischer Schutz;
- Regelmäßige Leckagekontrollen;
- Regelmäßige Überprüfung der Ausrüstung.

Zu den Präventionsmaßnahmen im Zusammenhang mit der mechanischen Integrität von Wasserstoffsystemen gehören:

- Überprüfung des Geräteentwurfs durch Leistungstests;
- Regelmäßige Überprüfung der Geräte nach ihrer Installation.

Die Ausrüstung kann am Ende der angegebenen Lebensdauer außer Betrieb genommen werden [22]. Die Konstruktionsprüfung und Validierung zielt darauf ab, nachzuweisen, dass das Gerät für die Anwendung geeignet ist, für die es eingesetzt werden soll. Es können auch Widerstands- und Dauertests durchgeführt werden. Beständigkeitsprüfungen sind grundlegende Prüfungen, bei denen alle relevanten Eigenschaften des Systems getestet werden (z. B. Hydraulikdruckprüfung). Dauertests sind aufwändiger, wenn das System einer zyklischen Belastung ausgesetzt wird und die Zeit bis zum Versagen die Dauerhaftigkeit charakterisiert. Zur Bestimmung der Lebensdauer wird ein Faktor angewandt, z. B. die Anforderung, 50.000 Testzyklen für eine spezifizierte Lebensdauer von 10.000 Zyklen zu überstehen [22].

Die Geräte, die einer Prüfung der mechanischen Unversehrtheit unterzogen wurden, sind nachstehend aufgeführt:

- Behälter für gasförmigen Wasserstoff,
- Container-Ventile,
- Flexible Schläuche,
- Schnellverbindungsgeräte.

Grundsätzlich sicheres Design ist ein Ansatz, der sich auf die Verringerung oder Beseitigung von Gefahren im Zusammenhang mit dem Produkt oder dem Prozess konzentriert. Betrachten wir, wie die Sicherheit eines Brennstoffzellensystems (BZ/FC) durch die Verringerung von Gefahren verbessert werden könnte, ohne die Technologie selbst zu beeinträchtigen. Leider werden derzeitige FC-Systeme oft mit Rohrleitungsdurchmessern von 5 - 15 mm und Drücken



von 0,5 - 1,5 MPa ausgelegt, ohne die Gefahren zu berücksichtigen. Der Massenstrom durch eine Öffnung von 5 mm Durchmesser bei einem Speicherdruck von 0,5 MPa kann mit Hilfe der *Theorie des unterexpandierten Strahls* berechnet werden und beträgt etwa 6 g/s. Für ein Rohr mit 15 mm Durchmesser und einem Druck von 1,5 MPa beträgt der Massendurchfluss 170 g/s [1].

Schätzen wir nun den Massendurchsatz für ein 50-kW-FC-System, das große Einrichtungen wie Hotels, Krankenhäuser, Bürogebäude und Mehrfamilienhäuser mit Energie versorgt. Unter der Annahme, dass der elektrische Wirkungsgrad einer FC 45 % beträgt und die obere Reaktionswärme (Verbrennung) von Wasserstoff mit Luft  $[(286,1 \text{ kJ/mol})/(2,016 \text{ g/mol})] = 141,92 \text{ kJ/g}$  ist, kann der Massendurchsatz für die mit maximaler Leistung arbeitende FC als  $(50 \text{ kW})/0,45/(141,92 \text{ kJ/g}) = 0,78 \text{ g/s}$  berechnet werden. Dieser Massendurchsatz kann beispielsweise bei einem Druck von 0,5 MPa durch eine Drosselstelle im Speicher- oder Rohrleitungssystem mit einem Öffnungsdurchmesser von nur etwa 1,8 mm oder bei einem Druck von 0,2 MPa durch eine Öffnung von etwa 2,9 mm bereitgestellt werden [1].

Wie weiter oben in dieser Lektion gezeigt wurde, ist die Gefahrendistanz für eine nicht gezündete Freisetzung proportional zum Düsendurchmesser und der Quadratwurzel aus dem Speicherdruck. So kann die Verringerung des Rohrdurchmessers von 15 auf 2,9 mm und die Reduzierung des Drucks von 1,5 auf 0,2 MPa die Gefahrendistanz um mehr als das 14-fache verringern [1].

Weitere Analysen können durchgeführt werden, um die Gefahrenabstände für diese beiden Optionen zu vergleichen:

- Option 1 - Druck 0,5 MPa und Rohrdurchmesser 1,8 mm,
- Option 2 - Druck 0,2 MPa und Rohrdurchmesser 2,9 mm.

Das Verhältnis der Gefährdungsdistanzen für nicht gezündete Freisetzungen bei Option 1 und 2 unter der Annahme eines Vollbruchs kann auf 0,98 geschätzt werden, d. h. sie sind praktisch gleich. Diese Beispiele zeigen deutlich die Vorteile der wissenschaftlich fundierten Sicherheitsauslegung von Wasserstoff- und Brennstoffzellensystemen, um die Gefährdungsabstände wesentlich zu verringern, ohne die Leistungsparameter der FC zu beeinträchtigen [1].

## 9. Minderungsmaßnahmen für nicht gezündete Freisetzungen

Nachdem die Präventionsmaßnahmen ergriffen wurden, kann über Entdeckungs- und Minderungsmaßnahmen nachgedacht werden. Die Sicherheitsmaßnahmen, die darauf abzielen, die Folgen des gefährlichen Ereignisses zu mildern oder deren Schwere zu verringern, werden als Minderungsmaßnahmen bezeichnet [22]. Im Sinne der Risikominderung sollte die Anzahl der gefährdeten Personen so weit wie möglich reduziert werden, und es kann eine





Explosionsentlastung, -unterdrückung oder -eindämmung vorgesehen werden. Zur Erkennung eines Lecks können gegebenenfalls Gassensoren eingesetzt werden. Durchflussmessgeräte, EX-Sensor usw. sind ebenfalls von Bedeutung. Im Folgenden werden einige Maßnahmen zur Risikominderung aufgeführt [22, 23]:

- die Größe eines Lecks zu verringern, z. B. durch den Einsatz von Wasserstoffdurchflussbegrenzern;
- Wasserstoff von Oxidationsmitteln, gefährlichen Stoffen und gefährlichen Geräten zu trennen;
- Verwendung von Alarmen und/oder Warngeräten (einschließlich Wasserstoffsensoren und Brandmeldern);
- Einsatz von Abschaltvorrichtungen und -systemen;
- Potenzielle Zündquellen ermitteln und, wenn möglich, abtrennen oder beseitigen;
- Verhinderung der Bildung brennbarer Atmosphären, z. B. durch Belüftung (natürlich und aktiv);
- Erweiterung durch Wasserstoffmesssystemen, Verwendung von Durchflussmessern usw.;
- wenn möglich im Freien aufstellen;
- Staus zu vermeiden;
- Gefahrenabstände einhalten;
- einen guten vorbeugenden Brandschutz zu praktizieren, z. B. Zugangs- und Evakuierungswege freizuhalten und Brandlasten und andere Verunreinigungen von Wasserstoffsystemen fernzuhalten;
- die Bereitstellung der Notfallmaßnahmen.

## 10. Aufspüren von Wasserstofflecks

Da Wasserstoff farb- und geruchlos ist, werden Sensoren die wichtigste Sicherheitsausrüstung für sichere Tankstellen und andere Wasserstoffanlagen sein. Der Zusatz eines Geruchsstoffs zum Wasserstoff würde die Erkennung kleiner Lecks erleichtern. Dies ist jedoch in den meisten Fällen nicht praktikabel, da dies z. B. einen teuren Katalysator in den Brennstoffzellen vergiften würde. Detektoren/Sensoren können zur Erkennung von Wasserstofffreisetzungen, zur automatischen Abschaltung von Systemen, zur Aktivierung von Alarmen und zur Benachrichtigung von Einsatzkräften eingesetzt werden. Wasserstoffsensoren sind weltweit Gegenstand laufender Forschung.

Für die Auswahl der Wasserstoffsensoren gelten folgende Kriterien:

- Langlebigkeit und Zuverlässigkeit;
- Empfindlichkeit gegenüber Kreuzkontaminationen, z. B. durch Kohlenwasserstoffe;
- Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit;
- Reaktionszeit;
- ob sie durch Querempfindlichkeiten zu falschen positiven Messwerten führen;
- Empfindlichkeit gegenüber Temperaturextremen;
- Wartungsanforderungen;
- Messbereich;
- eine Genauigkeit.

Die von der FCTO (Fuel Cell Technologies Office) behandelten Schwerpunktbereiche sind im Mehrjahresplan für Forschung, Entwicklung und Demonstration des Programms für Wasserstoff-, Brennstoffzellen- und Infrastrukturtechnologien (Multi-Year Project Plan, MYPP) zusammengefasst, der 2007 [24] veröffentlicht und 2012 [25] aktualisiert wurde. Im Jahr 2007 wurde eine kurze Liste kritischer Wasserstoffsensormessgrößen mit Zielspezifikationen festgelegt. Die Tabelle mit einer Zusammenfassung dieser Messgrößen und der entsprechenden Spezifikationen ist in Abbildung 14 wiedergegeben. Eine nahezu identische Tabelle wurde in das MYPP 2012 aufgenommen [25].

Table 3.8.2. Targets for Hydrogen Safety Sensor R&D
<ul style="list-style-type: none"><li>• Measurement Range: 0.1%-10%</li><li>• Operating Temperature: -30 to 80°C</li><li>• Response Time: under one second</li><li>• Accuracy: 5% of full scale</li><li>• Gas environment: ambient air, 10%-98% relative humidity range</li><li>• Lifetime: 10 years</li><li>• Interference resistant (e.g., hydrocarbons)</li></ul>

Abbildung 14. Zielvorgaben für Wasserstoffsensoren, skizziert vom US DoE [26].



Es ist auch wichtig zu wissen, dass Sensoren in der Wasserstoffsicherheitstechnik aufgrund des Auftriebs und der Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff keine vollständige Detektionsstrategie bieten. Ein Wasserstoffsensor ist zum Beispiel in einem großen Räumen oder im Freien wenig nützlich. Die Platzierung der Sensoren sollte sorgfältig überlegt werden, und Werkzeuge wie CFD können zur Simulation von Leckszenarien verwendet werden, um einen Einblick in die Positionierung der Sensoren zu erhalten. Zum Schutz des Personals und der Anlagen sind sowohl fest installierte als auch persönliche/handgehaltene Sensoren erforderlich.

Die vorgeschlagene Positionierung der Wasserstoffsensoren wird im Folgenden erläutert:

- Orte, an denen Wasserstoff austreten kann;
- an routinemäßig getrennten Wasserstoffanschlüssen (z. B. Wasserstoffbetankungsstellen);
- Orte, an denen sich Wasserstoff ansammeln könnte;
- in Ansaugkanälen von Gebäuden, wenn Wasserstoff in das Gebäude getragen werden könnte;
- in Gebäudeabluftkanälen, wenn Wasserstoff im Gebäude freigesetzt werden könnte.

Es gibt auch Vorschriften für den Einbau von Wasserstoffsensoren in FC-Fahrzeugen, um vor möglichen Lecks zu warnen. Die Standorte der Wasserstoffsensoren für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) sind in Abbildung 15 als blaue Punkte markiert und enthalten [27]:

- Abgasleitung (Prozesssteuerung) ;
- Fahrgastraum (Sicherheit) ;
- Motor (Sicherheit) ;
- Brennstoffzellenstapel (Sicherheit).

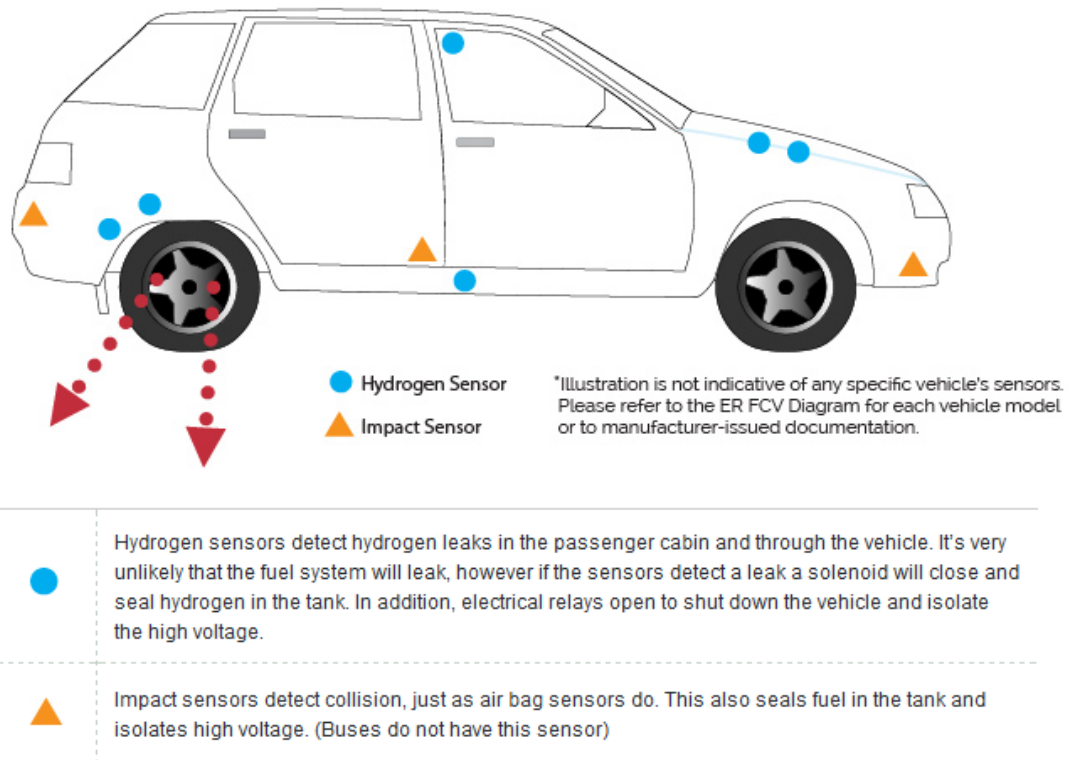


Abbildung 15. Mögliche Anordnung der Wasserstoffsensoren in einem FCEV [27].

Eine üblicherweise verwendete Konzentration für den Hauptalarm ist 1 Vol.-% Wasserstoff in der Luft, was 25 % der unteren Zündgrenze (LFL) entspricht. Dieser Wert sollte normalerweise eine ausreichende Zeitspanne bieten, um in geeigneter Weise zu reagieren, z. B. durch Abschalten des Systems, Evakuierung des Personals oder andere Maßnahmen. Eine Warnung kann auch früher erfolgen. Es ist mehr als eine Sensorplattform erforderlich, um alle Zielvorgaben zu erreichen, und eine Kombination von Sensorplattformen zeigt die besten Ergebnisse.

Im Handel sind folgende Arten von Wasserstoffsensoren/-detektoren erhältlich:

- elektrochemische Detektoren;
- Metalloxid-Detektoren;
- Wärmeleitfähigkeitsdetektoren ;
- Feldeffekt-Gasdetektoren (FED);
- Palladium-Dünnschicht auf Widerstandsbasis;
- katalytische Detektoren;
- Mikroelektromechanische Systeme (MEMS);
- optische Geräte;
- Die Forschung ist noch nicht abgeschlossen.



Die folgenden Faktoren sollten bei der Auswahl der Detektoren berücksichtigt werden [28]:

- Genauigkeit (1-10%);
- Zuverlässigkeit;
- Wartbarkeit;
- Kalibrierung;
- Nachweisgrenzen (hoch und niedrig);
- Reaktionszeit (<10 s);
- sich rechtzeitig erholen oder nicht erholen;
- lange Lebensdauer (mehr als 5 Jahre);
- geringer Energieverbrauch (< 10 MW); (< 10 mW)
- einfache Systemintegration.

Im Jahr 2009 führte INERIS (Frankreich) im Rahmen des HYPER-Projekts 2008 [29] ein Testprogramm durch, das auf den internationalen Normteilen IEC 61779-1&4, 1998 [30] basierte und darauf abzielte, die Leistung handelsüblicher Wasserstoffdetektoren zu bewerten. Bei diesen Geräten handelte es sich um elektrochemische und katalytische Typen, d. h. die beiden in der Industrie am häufigsten verwendeten Typen. Der katalytische Sensor reagierte fünfmal schneller als der elektrochemische Sensor auf eine plötzliche Wasserstoffeinwirkung. Allerdings betrug die Ansprechzeit beim katalytischen Sensor etwa 10 s und beim elektrochemischen Sensor 50 s. Diese Zahlen gelten auch für die Erholungszeit. In vielen praktischen Szenarien ist diese lange Zeit kaum akzeptabel [1].

Die im Rahmen des HYPER-Projekts untersuchten katalytischen Detektoren neigten ebenfalls dazu, nach längerer Exposition gegenüber Wasserstoff an Empfindlichkeit zu verlieren und den Nullpunkt zu verschieben. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, diese Geräte regelmäßig zu kalibrieren. Höhere Luftfeuchtigkeit erhöhte tendenziell den Messwert des katalytischen Detektors bei konstantem Wasserstoffgehalt. Der katalytische Detektor reagierte sehr empfindlich auf das Vorhandensein von Kohlenmonoxid (CO), aber die Störung war nur vorübergehend, d.h. wenn die CO-Exposition beendet ist, verhält sich der Detektor normal [1].

Die von der Gemeinsamen Forschungsstelle, Institut für Energie, der Europäischen Kommission im Rahmen des HYPER-Projekts durchgeführten Forschungen haben gezeigt, dass sich die Zeit, die der elektrochemische Sensor benötigt, um auf eine Wasserstoffexposition mit bekannter Konzentration zu reagieren, verlängert, wenn die Gasdurchflussrate reduziert wird, d. h. sie könnte allein durch die Reduzierung der Durchflussrate von 100 auf 30 ml/min doppelt so lang sein. Dieses Erkenntnis ist besonders wichtig, wenn der Sensor die Bildung einer explosiven Atmosphäre in einem FC-Schrank kontrollieren soll [1].

Es gibt ein weiteres Problem im Zusammenhang mit schnelleren katalytischen Sensoren, das in der Literatur noch nicht ausreichend behandelt wird. Dabei handelt es sich um das Potenzial, Wasserstoff-Luft-Gemische mit hohen Wasserstoffkonzentrationen durch den Sensor zu entzünden. Die Zündung von Wasserstoff-Luft-Gemischen mit hohem Wasserstoffgehalt durch Rekombinatoren wurde bereits beobachtet [31].

Im Handel ist eine Vielzahl von Methoden und Sensortypen zum Nachweis von Wasserstoff erhältlich [23]. Viele dieser Detektoren sind für den Einsatz in automatischen Warn- und Betriebssystemen geeignet, siehe z. B. ISO 26142:2010 [32] für Details zu stationären Systemen.

## 11. e-Labor-Tools für relevante Phänomene

Die Einführung in e-Laboratory ist in Lektion 1 gegeben worden. Die Benutzer müssen sich über <https://hyresponder.eu/e-platform/e-laboratory/> im e-Laboratorium anmelden und die entsprechenden Werkzeuge aus der Liste auswählen. In diesem Abschnitt wurden die Tools "Jet-Parameter-Modell", "Ähnlichkeitsgesetz für Konzentrationsabfall und Gefahrendistanz" und "Auftriebsberechnung" im Detail besprochen.

### 11.1 Modell der Strahlparameter

Dieses Modell beschreibt die Parameter entweder eines expandierten oder eines unterexpandierten Strahls. Abbildung 16 zeigt eine einfache schematische Darstellung eines "expandierten" (rote Linien) und eines "unterexpandierten" (schwarze Linien) Strahls im Vergleich zu Abbildung 4.

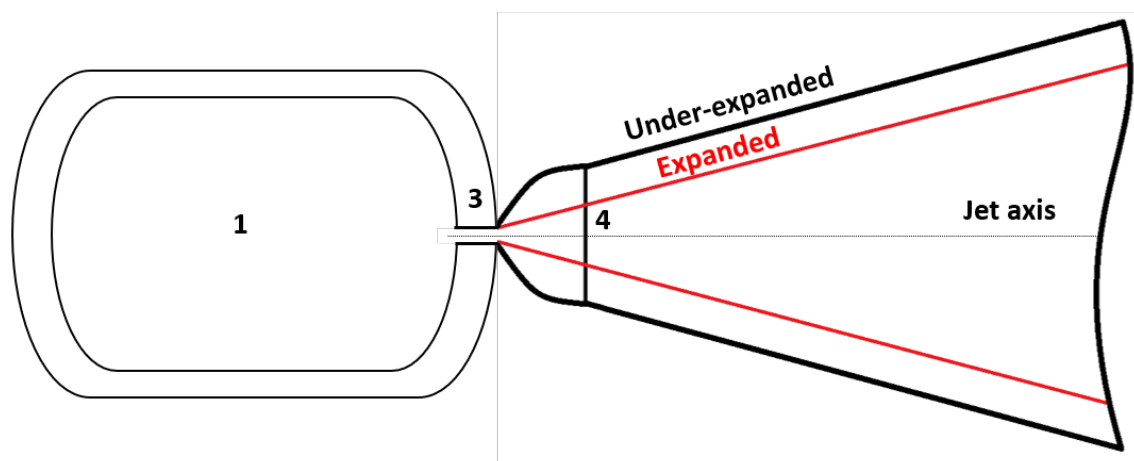


Abbildung 16. Einfaches Schema des "expandierten" (rote Linien) und "unterexpandierten" (schwarze Linien) Strahls.

1 - Behälter (Hochdruckgefäß), 3 - Ausgang der Düse oder Blende (fiktiver Eingang), 4 - fiktiver Ausgang der Düse/Blende (wobei Druck und Geschwindigkeit gleich der Umgebungsgeschwindigkeit bzw. der lokalen Schallgeschwindigkeit sind). Beachten Sie, dass der Ausgang 4 nur für den unterexpandierten Strahl gilt.



Das kritische Druckverhältnis für den Übergang zur Schallströmung beträgt für Wasserstoff etwa 1,9. Ist das kritische Druckverhältnis kleiner als 1,9, ist die Strömung unterschallig und expandiert, ist es größer als 1,9, bleibt die Austrittsgeschwindigkeit lokal schallig und der Strahl ist unterexpandiert. Der Austrittsdruck steigt über den Umgebungsdruck an, so dass die Expansion bis auf den Umgebungsdruck,  $p_{atm}$ , außerhalb der realen Düse stromabwärts der Mach-Scheibe stattfindet, die als "fiktive" Düse oder effektiver Durchmesser bezeichnet wird.

Das kritische Druckverhältnis über dem Leck,  $p^*$ , bestimmt, ob es sich um eine Unterschall- oder Schall- bzw. Überschallströmung handelt.

$$p^* = \frac{p_1}{p_{atm}} = \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (6)$$

Daher werden unterschiedliche Gleichungssätze gelöst, je nachdem, ob die Strömung expandiert oder unterexpandiert ist. Der Gleichungssatz für einen unterexpandierten Strahl wird in Molkov [11] detailliert beschrieben und basiert auf der Abel-Noble-Zustandsgleichung für Wasserstoff, den Erhaltungsgleichungen für Masse und Energie und der Annahme, dass im Zustand (4) (dem so genannten "effektiven Düsendurchmesser") der Druck gleich der Umgebung und die Geschwindigkeit gleich der lokalen Schallgeschwindigkeit ist.

Der erweiterte Strahlgleichungssatz verwendet die isentropen Druck- und Dichteverhältnisse.

Zu den Eingangsparametern gehören der Öffnungsdurchmesser  $d_3$ , der Umgebungsdruck  $p_4$ , der Wasserstoffdruck im Reservoir  $p_1$  und die Wasserstofftemperatur im Reservoir  $T_1$ . Sobald die oben genannten Parameter definiert wurden, erhält man die Werte einer Reihe von berechneten Parametern, wie in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Die Eingangs- und Ausgangsparameter des Strahlparameter-Modells

Name	Symbol	Value	Unit
Orifice diameter	$d_3$	0.0095	m
Ambient pressure	$p_4$	1.01325e+5	Pa
H2 pressure in reservoir	$p_1$	2.05e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	$T_1$	288	K
H2 density in reservoir	$\rho_1$	15.2366	kg/m <sup>3</sup>
H2 density at orifice	$\rho_3$	9.48882	kg/m <sup>3</sup>
Pressure in orifice	$p_3$	9.83938e+6	Pa
Velocity in orifice	$V_3$	1253	m/s
Temperature at the orifice	$T_3$	233	K
Diameter of effective nozzle exit	$d_4$	0.0942914	m
Density in effective nozzle exit	$\rho_4$	0.1025	kg/m <sup>3</sup>
Velocity in effective nozzle exit	$V_4$	1178	m/s
Temperature in effective nozzle exit	$T_4$	239.501	K
Mass flow rate	$\dot{m}$	0.84318	kg/s

## 11.2 Ähnlichkeitsgesetz für den Konzentrationsabfall und den Gefahrenabstand

Dieses Modell ermöglicht die Vorhersage des axialen Konzentrationsabfalls eines austretenden Gases für sub-sonische (unterhalb der Schallgeschwindigkeit), sonische und super-sonische Strahlen. Es wird gezeigt, dass das Ähnlichkeitsgesetz in einem breiten Bereich von Bedingungen von expandierten bis zu stark unterexpandierten Strahlen gültig ist. Das Modell wird für die Berechnung von Gefahrenabständen verwendet, die sich aus der Größe der entflammaren Hülle ergeben.

Die Analyse experimenteller Daten hat gezeigt, dass die längsten und damit gefährlichsten Flammen aus unterexpandierten Strahlen zu erwarten sind. Vor diesem Hintergrund wurde das von Chen und Rodi [34] vorgeschlagene Ähnlichkeitsgesetz [33] für den axialen Konzentrationsabfall in runden, nicht gezündeten, expandierten, impulsdominierten Strahlen nun für unterexpandierte Wasserstoffstrahlen erweitert und validiert [1].

Die Gleichung zur Berechnung des axialen Abstands von der Düse bis zu einer vorgeschriebenen Wasserstoffkonzentration lässt sich wie folgt formulieren:

$$x = \frac{5.4 \times D}{C_{ax}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_S}} \quad (7)$$

wobei  $x$  der axiale Abstand von der Düse ist,  $D$  der Düsendurchmesser ist,  $C_{ax}$  der Massenanteil des Wasserstoffs im axialen Abstand  $x$ ,  $\rho_N$  die Dichte am Düsenausgang und  $\rho_S$  ist die Luftdichte.

Bei der Betrachtung unterexpandierter Strahlen ist die Kenntnis der Dichte in der Düse,  $\rho_N$ , (als Funktion des Speicherdrucks und der Verluste im Leckpfad) erforderlich. Diese Dichte wird mit Hilfe des in Abschnitt 10.1 beschriebenen technischen Tools "Wasserstoffstrahlparameter" berechnet. Für expandierte Strahlen basieren die Berechnungen auf isentropen Druck- und Dichtebeziehungen (dieser Gleichungssatz wird in der Beschreibung des Engineering-Tools "Flammenlänge und Trennungsabstand für Strahlbrände" ausführlicher beschrieben).

Eine Korrelation zwischen dem Ort der Spitze des Wasserstoffflammenstrahls und dem Ort von drei verschiedenen Wasserstoffkonzentrationen (8 %, 11 % und 16 %) in einem nicht gezündeten Strahl, der von derselben Leckquelle ausgeht.

Dieses technische Hilfsmittel berechnet den axialen Abstand von der Düse, der dem Ort verschiedener vorgewählter Wasserstoffkonzentrationen entspricht, nämlich 4 %, 8 %, 11 %, 16 % und 29,5 Vol.% in nicht gezündeten Strahlen. Dieses Modell ermöglicht es dem "Benutzer" auch, seine eigene Konzentration für die Analyse zu wählen, innerhalb der Wasserstoff-Entflammbarkeitsgrenzen von 4 bis 75 Vol.%.

Ein Beispiel für die Eingabe- und Ausgabeparameter und ihre Werte für dieses Tool ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Eingabe- und Ausgabeparameter dieses Tools



Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	$p_1$	3.5e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	$T_1$	293	K
Orifice diameter	$d_3$	0.005	m
Ambient pressure	$p_4$	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	$T_{atm}$	293	K
Axial distance from nozzle to 4% by vol. H2	$X_{4\%,H_2}$	32.6212	m
Axial distance from nozzle to 8% by vol. H2	$X_{8\%,H_2}$	15.6793	m
Axial distance from nozzle to 11% by vol. H2	$X_{11\%,H_2}$	11.0593	m
Axial distance from nozzle to 16% by vol. H2	$X_{16\%,H_2}$	7.20885	m
Axial distance from nozzle to 29.5% by vol. H2	$X_{29.5\%,H_2}$	3.33269	m
Axial distance from nozzle to 7% by vol. H2	$X_{7\%,H_2}$	5.50167	m

### 11.3 Berechnung des Auftriebs

Dieses Tool zeigt die Auswirkungen der Verringerung der Gefahrendistanz aufgrund des Auftriebs bei nicht gezündeten Freisetzungen. Es ermöglicht die Berechnung der Entfernung von der Freisetzungsdüse bis zu der Konzentration, bei der die Freisetzung vom impuls gesteuerten Regime zum auftriebs gesteuerten Regime wechselt, sowie die Berechnung der Gefahrendistanz bis zu einer Konzentration von 4 Volumenprozent Wasserstoff.

Alle Strahlen lassen sich aufgrund des Auftriebseffekts in drei Typen unterteilen. Diese Düsentypen sind in [错误!未找到引用源。](#) schematisch dargestellt [错误!未找到引用源。](#) [未找到引用源。](#) für einen horizontalen Strahl dargestellt. Vollständig impuls gesteuerte Strahlen werden durch den Auftrieb nicht beeinflusst. Vollständig auftriebs gesteuerte Strahlen werden schnell von der horizontalen in die vertikale Strömungsrichtung umgelenkt. Die dritte Art von Strahlen, die man als Übergangstyp bezeichnen kann, hat einen impuls dominierten Teil näher an der Düse und eine auftriebs gesteuerte Strömung weiter stromabwärts, wenn die Strahlgeschwindigkeit abnimmt und der Strahldurchmesser zunimmt. Für die Wasserstoffsicherheitstechnik ist es wichtig zu wissen, wann dieser Übergang stattfindet. Dies hat direkte Auswirkungen auf den Trennungsabstand und damit auf die Sicherheit und die Kosten des Wasserstoffsystems oder der Infrastruktur.

Das hier vorgestellte technische Hilfsmittel, mit dem ein Wasserstoffstrahl (sowohl expandiert als auch unterexpandiert) oder sein Teil als impuls gesteuert und der Rest des Strahls stromabwärts als auftriebs gesteuert eingestuft werden kann, basiert auf den Arbeiten von [17, 18], die nur mit expandierten Strahlen durchgeführt wurden. Die Abhängigkeit des Verhältnisses von Abstand zu Düsendurchmesser ( $x/D$ ) von der Froude-Zahl ( $Fr$ ) für eine bestimmte Wasserstoffkonzentration in der Luft wird in Gleichung (5) dargestellt. Für unterexpandierte Strahlen wurden der fiktive Düsenaustrittsdurchmesser und die Geschwindigkeit am fiktiven Düsenaustritt nach der Theorie des unterexpandierten Strahls berechnet [11]. Sowohl erweiterte als auch unterexpandierte Strahlen gehorchen der gleichen



funktionalen Abhängigkeit mit einer für technische Anwendungen akzeptablen Genauigkeit von 20 %.

Fünf theoretische Kurven (durchgezogene Linien) und experimentelle Daten für expandierte Strahlen [17, 18] sowie Daten anderer Forscher für unterexpandierte Strahlen. Praktisch alle unterexpandierten Strahlen bei Wasserstoffzwischenfällen/-unfällen befinden sich im impulskontrollierten Bereich. Vier der fünf theoretischen Kurven im Diagramm beziehen sich auf Wasserstoffkonzentrationen von 4 %, 17 %, 30 % bzw. 60 % des Volumens. Jede dieser vier Kurven hat einen ansteigenden Auftriebsteil und einen Impuls-"Plateau"-Teil.

Es ist wichtig zu betonen, dass die Froude-Zahl beim Übergang vom Auftriebsteil der Kurve zum Impulsteil von der Konzentration des betrachteten Wasserstoffs abhängt. Bei einer axialen Wasserstoffkonzentration von 60 Volumenprozent verbleibt der Strahl beispielsweise im impuls gesteuerten Bereich, bis  $\text{Log}(Fr) > 3,5$  ist, während die Froude-Zahl am Düsenaustritt viel höher sein muss, d. h.  $\text{Log}(Fr) > 6,5$  (drei Größenordnungen höher), damit sich der Strahl an der axialen Stelle, an der die Wasserstoffkonzentration auf 4 Volumenprozent (LFL) sinkt, im impuls gesteuerten Bereich befindet.

Die Kurve "Abwärts gerichtete Strahlen" ist von besonderem Interesse für die Wasserstoffsicherheitstechnik. Sie gibt für einen senkrecht nach unten gerichteten Strahl einen dimensionslosen Abstand von der Düse bis zum Wendepunkt an, an dem der Strahl seine Strömungsrichtung von unten nach oben ändert. Zur Berechnung des Abstands zum Umkehrpunkt ist lediglich die Kenntnis der Froude-Zahl an der Düse (fiktive Düse) erforderlich. Die fünfte Kurve schneidet erwartungsgemäß jede der vier anderen Kurven im Bereich des Übergangs von der impulsdominierten zur auftriebsgesteuerten Strömung.

Zur Beantwortung der folgenden zwei Fragen gibt es im e-Laboratorium zwei Unterwerkzeuge über die Auswirkung des Auftriebs auf die Verringerung des Gefahrenabstands bei nicht gezündeten Freisetzungen.

- Q1: bei horizontaler Freisetzung der Abstand und die Konzentration, bei der die Freisetzung schwimmfähig wird, und der Gefahrenabstand zu 4 % v/v entlang der Mittellinie des Strahls.
- Q2: bei vertikaler Abwärtsströmung die Entfernung und die Konzentration, bei der die Strömung aufgrund des Auftriebs zu steigen beginnt.

Die Eingabeparameter dieses Tools sind der Wasserstoffdruck im Reservoir  $p_1$ , die Wasserstofftemperatur im Reservoir  $T_1$ , der Öffnungsdurchmesser  $d_3$  und der Umgebungsdruck  $p_4$ . Als Beispiel sind in Tabelle 6 die Ausgabeparameter des Tools für Q1 aufgeführt.

Tabelle 6 Ein Beispiel für die Eingabe- und Ausgabeparameter dieses Tools

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	$p_1$	7e+6	Pa
H2 temperature in reservoir	$T_1$	288	K
Orifice diameter	$d_3$	0.02	m
Ambient pressure	$p_4$	1.01325e+5	Pa
Axial distance from nozzle to $C_B$ % by vol. $H_2$ where release becomes buoyant.	X	35.6746	m
Axial distance from nozzle to 4% by vol. $H_2$	$X_{4\%}$	44.2411	m
Axial distance from nozzle to 17% by vol. $H_2$	$X_{17\%}$	9.24329	m
Axial distance from nozzle to 30% by vol. $H_2$	$X_{30\%}$	4.5659	m
Axial distance from nozzle to 40% by vol. $H_2$	$X_{40\%}$	3.08551	m
Axial distance from nozzle to 50% by vol. $H_2$	$X_{50\%}$	2.43964	m
Axial distance from nozzle to 60% by vol. $H_2$	$X_{60\%}$	1.28028	m

## Danksagung

Das HyResponse-Projekt wird anerkannt, da die hier vorgestellten Materialien auf der Grundlage der ursprünglichen HyResponse-Vorlesungen erweitert wurden.

## Referenzen

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), free download e-book
2. HyFacts Project. Chapter R. Hydrogen releases and dispersion. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/category/education-training/> [accessed on 12.11.20].
3. EIGA, European Industrial Gases Association (2007). Determination of safety distances. IGC Doc 75/07/E.
4. EU No 406/2010, Commission Regulation of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles. Official Journal of the European Union. Vol. 53, 18 May 2010. Available from: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [accessed on 12.11.20].
5. Saffers, JB, Makarov, DV and Molkov, VV (2011). Modelling and numerical simulation of permeated hydrogen dispersion in a garage with adiabatic walls and still air. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36(3), pp. 2582-2588.
6. Adams, P, Bengaouer, A, Cariteau, B, Molkov, V and Venetsanos, AG (2011). Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36, pp. 2742-2749.
7. Dulov, VG and Luk'yanov, GA (1984) *Gasdynamics of the outflow processes*. Nauka, Novosibirsk.



8. Ishii, R, Fujimoto, H, Hatta, N and Umeda, Y (1999). Experimental and numerical analysis of circular pulse jets. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 392, pp. 129-153.
9. Birch, AD, Brown, DR, Dodson, MG and Swaffield, F (1984) The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas. *Combustion Science and Technology*, vol. 36, pp. 249-261.
10. Schefer, RW, Houf, WG, Williams, TC, Bourne, B and Colton, J (2007). Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 2081-2093.
11. Molkov, V, Makarov, D and Bragin, M (2009). Physics and modelling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere, In Fortov, VE et al. (eds). *Physics of Extreme State of Matter 2009*. Chernogolovka, Russia, pp.143-145.
12. LaChance, J, Tchouvelev, A and Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36 pp. 2381-2388.
13. Chen, CJ and Rodi, W (1980). Vertical turbulent buoyant jets - a review of experimental data, *The Science Applications of Heat and Mass Transfer series*, Vol. 4, Ed. by Chen C.J. 1980, Pergamon Press: Oxford, 83p.
14. Molkov, V and Bragin, M (2009) High-pressure hydrogen leak through a narrow channel. In: *Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere*; Torus Press: Moscow, pp. 332-338.
15. International fire code (2006). International Code Council.
16. NFPA 55, National Fire Protection Association (2010). Standard for the storage, use, and handling of compressed gases and cryogenic fluids in portable and stationary containers, cylinders, and tanks. Quincy, MA, 2010.
17. Shevyakov, GG, Tomilin, VP and Kondrashkov, YuA (1980). Influence of buoyancy on the mixing length in a free turbulent jet, *Engineering Physical Journal*. deposit with VINITI, N3671-80 (in Russian).
18. Shevyakov, GG and Savelieva, NI (2004). Dispersion and combustion of hydrogen jet in the open atmosphere. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. Vol. 1(9), pp. 23-27 (in Russian).
19. Li, Z, Makarov, D, Keenan, J, Molkov, V (2015). CFD study of the unignited and ignited hydrogen releases from TPRD under a fuel cell car. 6<sup>th</sup> International Conference on Hydrogen Safety, 19-21 October 2015, Yokohama, Japan.

20. Honda FCX Specifications (2009). Available from: <https://global.honda/heritage/timeline/product-history/automobiles/2016Clarity-Fuel-Cell.html> [accessed on 12.11.20].
21. Tamura, Y, Takabayashi, M and Takeuchi, M (2014). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 6169-6175.
22. HyFacts Project. Chapter RM. Prevention and mitigation of releases: Detection and ventilation. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/category/education-training/> [accessed on 12.11.20].
23. ISO/TR 15916 (2004). Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
24. Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program, Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan Planned program activities for 2005-2015, (2007).
25. DOE FCTO Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan, (2012). [https://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f23/fcto\\_myRDD\\_safety\\_codes.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f23/fcto_myRDD_safety_codes.pdf) [accessed on 12.11.20].
26. Buttne W, Burgess R, Schmidt K, Wright H, Rivkin C et al. Hydrogen safety sensor performance and use gap analysis. 7<sup>th</sup> International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2017), Hamburg, Germany, Sep 11-13, 2017.
27. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org/> [accessed on 12.11.20].
28. Bader, M. Hydrogen sensors. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells, 2014.
29. HYPER (2008). FP6 STREP project “Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications”. *Deliverable 4.3 Releases, Fires and Explosions*. WP4 Final Report. Available from: <http://www.hyperproject.uk/page/4942/> [accessed 12.11.20].
30. IEC 61779-1 (1998). Electrical Apparatus for the Detection and Measurement of Flammable Gases - Part 1: General Requirements and Test Methods. Standard IEC 61779-4: Performance requirements for group II apparatus indicating up to a volume fraction of 100 % lower explosive limit. International Electrotechnical Commission (IEC).
31. Blanchat, TK and Malliakos, A (1998). Performance testing of passive autocatalytic recombiners, NUREG/CR-6580, SAND97-2632.



32. ISO 26142:2010. Hydrogen detection apparatus -- Stationary applications. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization.
33. S. L. Brennan, D. V. Makarov, and V. Molkov, 'LES of high pressure hydrogen jet fire', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, no. 3, pp. 353–359, May 2009.
34. C. Chen and W. Rodi, *Vertical turbulent buoyant jets - a review of experimental data*. Oxford: Pergamon Press, 1980.
35. V. Molkov and J.-B. Saffers, 'Hydrogen jet flames', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 19, pp. 8141–8158, Jun. 2013.