



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

## Lektion 7

# Ungezündete Wasserstofffreisetzungen im Freien und ihre Eindämmung

## STUFE II

### Gruppenkommandant(-führer)

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Ebene des **Gruppenkommandanten(-führer)**.

Dieses Thema wird auch auf den Stufen I, III und IV angeboten.

Diese Lektion ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann, Gruppenkommandant(-führer), Einsatzleiter und Experte. Bitte beachten Sie die Einleitung zur Lektion 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 Finanzhilfvereinbarung 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 (Brennstoffzelle und Wasserstoff) 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 entflammbareren Gemischs mit Luft führt. Durch die Anwendung des Ähnlichkeitsgesetz und der Theorie des unterexpandierten Freistrahls können die Einsatzkräfte die Größe der entflammbaren Wasserstoffhülle bewerten und die Abnahme der Wasserstoffkonzentration entlang der Strahlachse berechnen. Darüber hinaus lernen die Einsatzkräfte, 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 Freistrahls, Wasserstoffhülle, Zerfall der Wasserstoffkonzentration, Blowdown, Gefahrenabstand, Minderungsmaßnahmen, Nachweis



## Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter .....	3
1. Zielgruppe.....	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Gruppenkommandanten(-führer).....	5
1.2 Kompetenzstufe: Gruppenkommandanten(-führer) .....	5
1.3 Frühere Erfahrungen: Gruppenkommandanten(-führer).....	5
2. Lecks bei komprimiertem Wasserstoff.....	6
3. Abblasen eines Druckwasserstoffspeichers .....	8
4. Aufspüren von Wasserstofflecks .....	11
Danksagung .....	12
Referenzen.....	12



## 1. Zielgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Stufe des Gruppenkommandanten(-führer) . Es gibt auch Lektionen für die Stufen I, III und IV: Feuerwehrmann, Einsatzleiter und Experte.

Die Rollenbeschreibung, das Kompetenzniveau und die Lernerwartungen, die auf der Ebene der Gruppenkommandanten(-führer) vorausgesetzt werden, werden im Folgenden beschrieben.

### 1.1 Beschreibung der Rolle: Gruppenkommandanten(-führer)

Gruppenkommandanten(-führer) sind für den taktischen Einsatz von Feuerwehrteams verantwortlich, die unter bestimmten Anweisungen auf der Grundlage von Standardeinsatzmaßnahmen und vor Ort gesammelten Informationen bestimmte Aufgaben übernehmen, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen, z. B. Suchen und Retten, Löschen und Eindämmen von Bränden, Freilegen und Bergen.

### 1.2 Kompetenzstufe: Gruppenkommandanten(-führer)

Eine taktische Entscheidungsfähigkeit, die auf Wissen, Fertigkeiten und Erfahrung sowie auf Verhaltensweisen beruht, die die Entscheidungsfindung unter schnell wechselnden Bedingungen unterstützen. Gestützt auf operatives Lernen und die Fähigkeit, Standardeinsatzmaßnahmen zu interpretieren und erforderlichenfalls zu ändern, zuvor erworbene und am Einsatzort erhaltene Informationen zu nutzen, wird vom Gruppenkommandanten(-führer) erwartet, dass er taktische Operationen erstellt und leitet, nachdem er den Notfall bewertet, Prioritäten festgelegt und erforderliche zusätzliche Unterstützung angefordert hat.

### 1.3 Frühere Erfahrungen: Gruppenkommandanten(-führer)

EQR 4 Theoretisches und faktisches Wissen in einem breiten Kontext innerhalb eines Arbeits- oder Studiengbiets. Eine Reihe von kognitiven und praktischen Fertigkeiten, die erforderlich sind, um Lösungen für spezifische Probleme in einem Arbeits- oder Studienbereich zu finden. Selbstmanagement im Rahmen von Arbeits- oder Studienkontexten, die in der Regel vorhersehbar sind, sich aber ändern können; Beaufsichtigung der Routinearbeit anderer, wobei eine gewisse Verantwortung für die Bewertung und Verbesserung von Arbeits- oder Studienaktivitäten übernommen wird.

## 2. 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 einen PRD (Druckentlastungsvorrichtung) 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	Löttriss, Lötschmelze
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, Druckbegrenzungsventil, 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 bei einem 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].

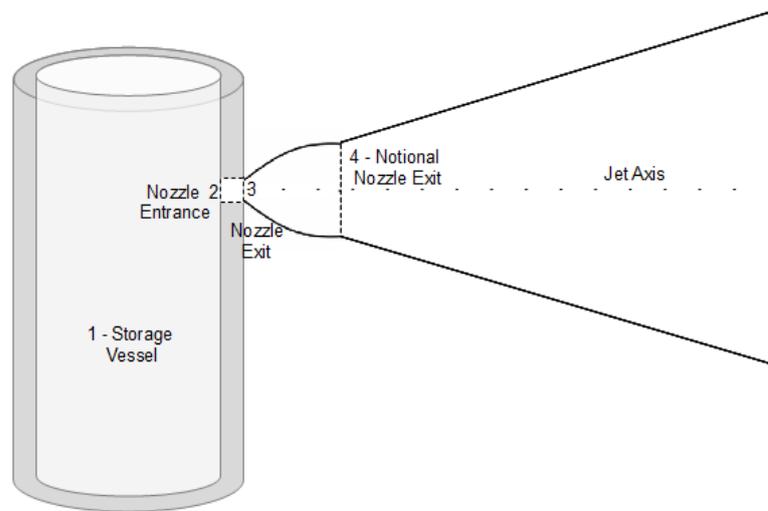


Abbildung 1. Ein Schema der Wasserstofffreisetzung aus einem Hochdruckwasserstoffspeicher.

### 3. Abblasen eines Druckwasserstoffspeichers

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. Dazu wurde das e-Laboratoriumstool "Adiabatisches Abblasen des Speichertanks" verwendet. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 2 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 [7].

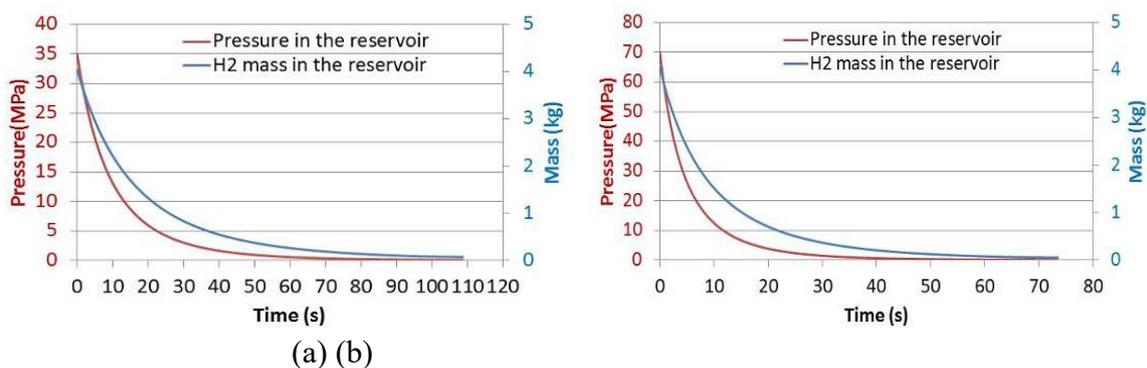


Abbildung 2. Adiabatisches Abblasen (Reduzierung von Druck und Wasserstoffmasse) von Lagertanks bei 35 MPa (a) und 70 MPa (b) (Öffnungsdurchmesser - 4,2 mm) [7].

Wie aus Abbildung 3 für die Einsatzkräfte ohne Wärmeschutzkleidung ersichtlich ist, beträgt die längste Gefahrendistanz von der Freisetzungsstelle 8,8 m bzw. 10,5 m für 35 MPa bzw. 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 Gaskonzentration von 8 Vol.-% Wasserstoff in Bodennähe 5,5 s nach der Öffnung des TPRD. Danach reduzieren sich die Gaskonzentrationen und die Gefahrenabstände nehmen ab.

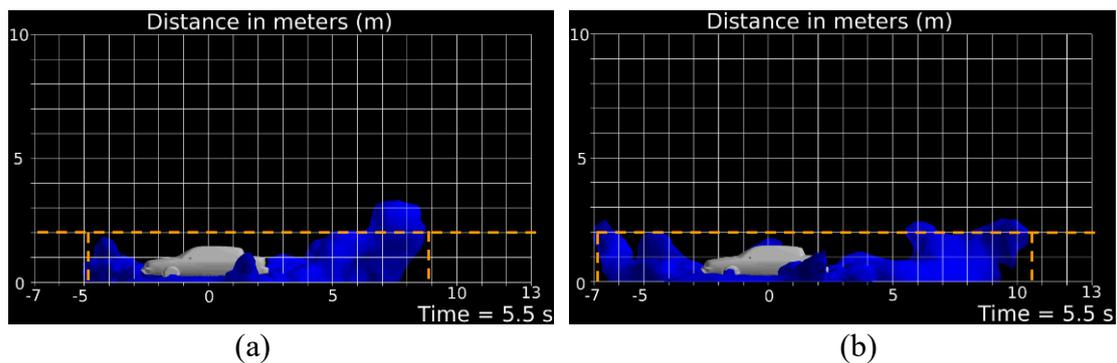


Abbildung 3. 8-Vol.-%-Wasserstoff-Gaskonzentration, die 5,5 s nach Beginn der Freisetzung registriert wurden: a) für 35 MPa Speicherdruck, b) für 70 MPa Speicherdruck (längste Gefahrendistanz unter der Annahme, dass die Höhe des Responders bei 2 m abgeschnitten wird) [7].

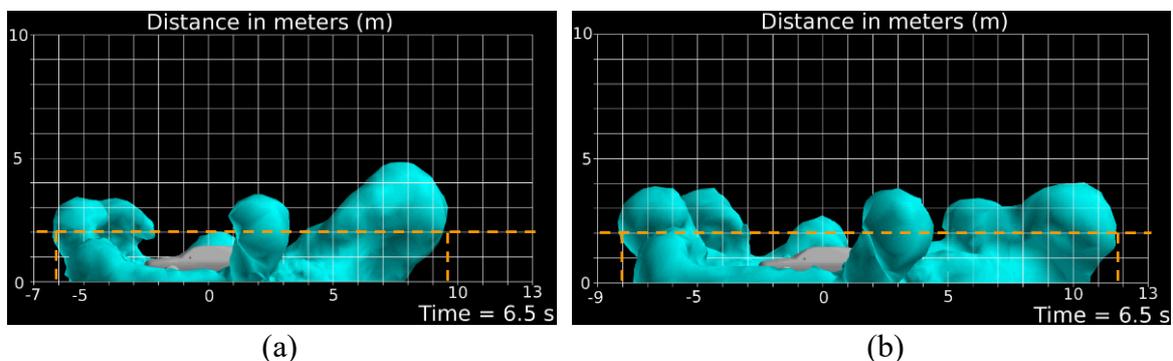


Abbildung 4. 6,5 s nach Beginn der Freisetzung registrierte Gaskonzentrationen von 4 Vol.-% Wasserstoff: a) für 35 MPa Speicherdruck, b) für 70 MPa Speicherdruck (längste Gefahrendistanz unter der Annahme, dass die Höhe des Responders bei 2 m abgeschnitten wird) [7].

Wie in Abbildung 4 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 Gaskonzentrationen als auch die Gefahrenabstände. In Abbildung 4 sind nur die 4-Vol.-%-

Gaskonzentration für eine Höhe von weniger als 2 m dargestellt (orangefarbene Abschnidelinien). Die größten brennbaren Gaswolken für den gesamten Bereich sind in Abbildung 5 dargestellt, aus denen die Gefahrenabstände für die Umgebung ermittelt werden können [7].

Aus Abbildung 5 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 Freisetzung von 70 MPa ist im Vergleich zur Freisetzung von 35 MPa um 15 % erhöht. In beiden Fällen treten die größten Gaskonzentrationen mit 4 Vol.-% Wasserstoff 9,5 Sekunden nach der Öffnung des TPRD auf. Danach schrumpfen die Gaskonzentrationen, und die Gefährdungsabstände werden kleiner. Vergleicht man die Gefährdungsdistanzen dieser auftreffenden Strahlen mit den für freie Strahlen berechneten Gefährdungsdistanzen (27,4 m für 35 MPa Speicherdruck und 35,4 m für 70 MPa Speicherdrücke), so zeigen die Ergebnisse eine signifikante Verringerung um mehr als 60 % bzw. 65 % für die 35 MPa und 70 MPa Freisetzungen, wie in Abbildung 5 dargestellt.

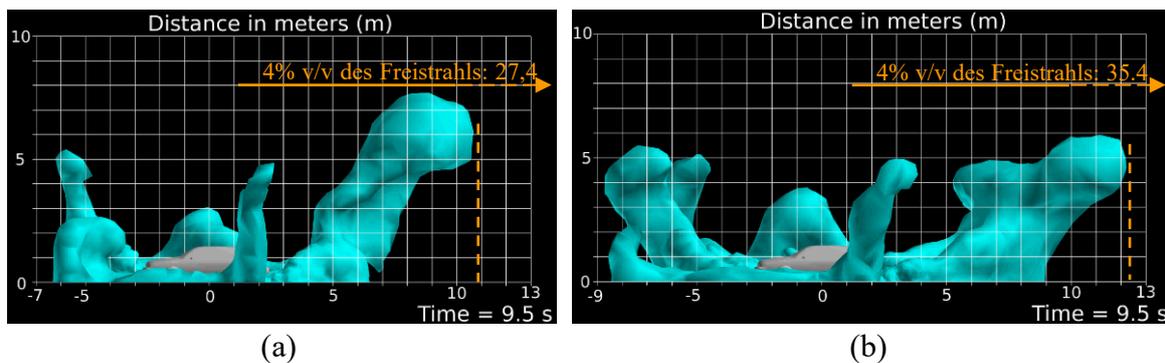


Abbildung 5. Die Ausdehnung der 4-Vol.-%- Gaskonzentrationen für nicht gezündete Freisetzungen aus Lagertanks: a) unter Druck mit 35 MPa, b) unter Druck mit 70 MPa [7].

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die CFD-Studie von Li et al. [7] 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 min;
- 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 unteren Zündgrenze (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.

## 4. Aufspüren von Wasserstofflecks

Es ist 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 (Computergestützte Strömungsmechanik) 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.

Außerdem müssen Wasserstoffsensoren an FC-Fahrzeugen angebracht werden, um vor möglichen Lecks zu warnen. Die Standorte der Wasserstoffdetektoren für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) sind in Abbildung 6 als blaue Punkte markiert und umfassen [10]:

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

- Brennstoffzellenstapel (Sicherheit).

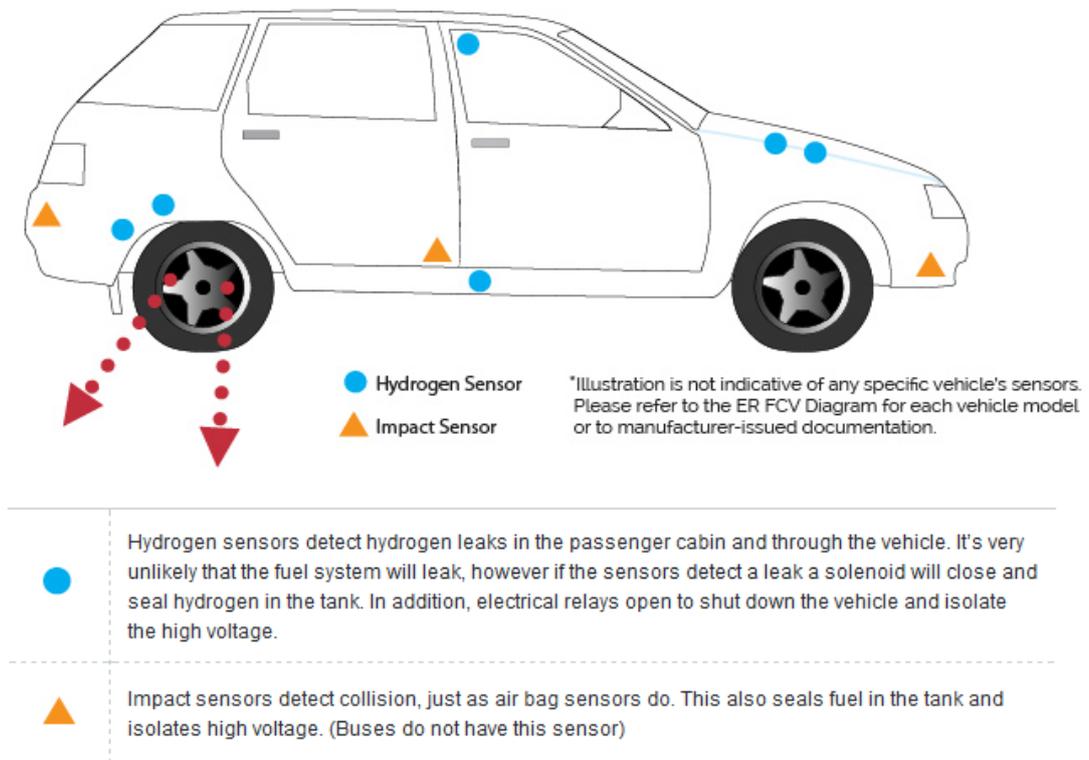


Abbildung 6. Mögliche Anordnung der Wasserstoffsensoren in einem FCEV [10].

## 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. 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.
  8. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org/> [accessed on 12.11.20].