



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

Lektion 9

Gefahrenabstände durch Wasserstoffflammen und Brandbekämpfung

STUFE II

Gruppenkommandant (-führer)

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

Dieses Thema wird auch in 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 folgender Haftungsausschluss: Die Informationen in diesem Dokument werden in der vorliegenden Form bereitgestellt, und es wird keine Garantie oder Gewährleistung dafür übernommen, 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.

Danksagungen

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 "Horizont 2020" der Europäischen Union sowie durch das Vereinigte Königreich, Frankreich, Österreich, Belgien, Spanien, Deutschland, Italien, die Tschechische Republik, die Schweiz und Norwegen unterstützt.

Zusammenfassung

Diese Lektion konzentriert sich auf gezündete Wasserstofffreisetzungen (Mikroflammen, Stichflammen, Feuerbälle). Zu Beginn wurde eine nützliche Terminologie eingeführt. Dann wird eine Klassifizierung der verschiedenen Arten von Wasserstoffbränden gegeben.

Schlüsselwörter

Wasserstoffbrand, Flammenlänge



Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
1. Zielpgruppe	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Gruppenkommandant(-führer)	5
1.2 Kompetenzstufe: Gruppenkommandant.....	5
1.3 Frühere Erfahrungen: Gruppenkommandant	5
2. Einleitung und Ziele	5
3. Wichtigste Terminologie.....	7
4. Arten von Wasserstoffbränden und Flammen	9
5. Strahlungswärmeströme von Düsenfeuern und Feuerbällen.....	10
5.1 Strahlungswärmeströme von Düsenfeuern.....	10
5.2 Wasserstoffstrahlbrände im Vergleich zu Strahlbränden üblicher Brennstoffe.....	10
5.3 Wasserstoff-Feuerkugeln	12
5.4 Auswirkung der verzögerten Zündung auf den Druck von Wasserstoffstrahlbränden	13
6. Brand von FC-Fahrzeugen	13
Danksagung	21
Referenzen.....	22



1. Zielpgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Stufe des Gruppenkommandants. 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 vorausgesetzt werden, werden im Folgenden beschrieben.

1.1 Beschreibung der Rolle: Gruppenkommandant(-führer)

Gruppenkommandant sind für den taktischen Einsatz von Feuerwehrteams verantwortlich, die unter bestimmten Anweisungen auf der Grundlage von Standardarbeitsanweisungen 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: Gruppenkommandant

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, Standardarbeitsanweisungen zu interpretieren und erforderlichenfalls zu ändern, zuvor erworbene und am Einsatzort erhaltene Informationen zu nützen, wird vom Gruppenkommandanten erwartet, dass er taktische Operationen entwickelt und leitet, nachdem er den Notfall bewertet, Prioritäten festgelegt und erforderliche zusätzliche Unterstützung angefordert hat.

1.3 Frühere Erfahrungen: Gruppenkommandant

EQR 4 - Theoretisches und faktisches Wissen in einem breiten Kontext innerhalb eines Arbeits- oder Studienbereichs. 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. Einleitung und Ziele

Häufig wird der Begriff "Sicherheit" als "nichttechnisches" Hindernis für die neuen FCH-Technologien genannt. Vor der Markteinführung dieser Technologien müssen jedoch noch mehrere technische Herausforderungen bewältigt werden. Eine davon ist die Verringerung der Länge der Wasserstoffstrahlflamme von dem derzeitigen Wert von 10-15 m aus der Brennstoffzelle (Fuel Cell) bzw. aus den Wasserstofftanks, um die Evakuierung und Rettung der Passagiere und ihre Sicherung durch die Einsatzkräfte zu ermöglichen. Ein weiteres wichtiges ungelöstes Problem ist die Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer von Wasserstofftanks an Bord von Fahrzeugen von 1-7 Minuten (derzeitiger Wert für Behälter des



Typs IV), um eine längere Zeit für das Abblasen der Tanks zu ermöglichen. Dies würde schwere Schäden an zivilen Gebäuden wie Garagen bei einer unbeabsichtigten Wasserstofffreisetzung verhindern. Außerdem würde dadurch die Bildung großer Wasserstoff-Luft-Wolken in Tunneln ausgeschlossen, die bei Bränden auf der gesamten Länge des Tunnels zu Todesfällen führen können. Die höhere Feuerwiderstandsfähigkeit von Wasserstoffspeichern würde eine sichere Evakuierung von Zivilpersonen vom Unfallort ermöglichen und somit die Sicherheit von Insassen und Einsatzkräften gewährleisten [1].

Zweifellos werden die Einsatzkräfte mit Zwischenfällen oder Unfällen mit Wasserstoffflammen zu tun haben, da Wasserstoffbrände ein typisches Szenario vieler Unfälle sind. Die Kenntnis der möglichen Länge der Wasserstoffflamme und der entsprechenden Abstände ist für die Einsatzkräfte von entscheidender Bedeutung. Es wird auch eine Wärmestrahlung von einem Feuer ausgehen, die in den Entfernungen jenseits der Flammenlänge Menschen verletzen und Schäden an Strukturen, Gebäuden, Geräten usw. verursachen kann. In dieser Lektion werden mehrere Faktoren erörtert, die sich auf das Ausmaß eines Strahlungsfeuers und den damit verbundenen Wärmestrom auswirken, darunter der Wasserstoffspeicherdruck und die Größe des Lecks. Methoden zur Erkennung von Wasserstoffbränden sowie Techniken zur Eindämmung und Löschung von Wasserstoffbränden werden in dieser Lektion ebenfalls behandelt.

Am Ende dieses Lektions wird ein Responder/ein Auszubildender in der Lage sein:

- Unterscheiden zwischen verschiedenen Arten von Wasserstoffbränden:
- von Mikroflammen über Stichflammen bis hin zu Feuerbällen,
- Bewertung der Wasserstoff-Flammenlängen mit Hilfe von Nomogrammen, dimensional und dimensionslosen Korrelationen,
- Beurteilen der durchschnittlichen Position der Flammenspitze des Strahls,
- Vorhersage der Bestimmung von Sicherheitsabständen zum Schutz von Menschen und Gebäuden,
- Erläutern der Auswirkung verschiedener Faktoren auf die Flammenlänge eines Stichflammenfeuers: Größe und Form der Düse, Befestigung des Strahls, Auftrieb, Barrieren oder Wände,
- Vergleichen von Flammenlängen und Wärmeströmung von Düsenfeuern mit Wasserstoff und anderen gängigen Brennstoffen (CNG und LPG),
- Erläutern der Druckauswirkungen von Wasserstoffstrahlbränden,
- Nennen der wichtigsten Methoden zur Erkennung von Wasserstoffbränden,
- Kennt die Techniken zur Eindämmung von Wasserstoffbränden
- Durchführen der Praktiken zur Löschung von Wasserstoffbränden ,
- Erkennen der wichtigsten Sicherheitsprobleme im Zusammenhang mit dem derzeitigen Stand der FCH-Technologien.

3. Wichtigste Terminologie

Um Wasserstoffbrände und andere damit zusammenhängende Phänomene (wie z. B. Mikroflammen, Löschen, Abheben, Abblasen und Ausblasen, Wärmestrahlung, Sichtbarkeit der Flamme, Flammenlänge und -geschwindigkeit, Feuer mit auftreffenden Strahlen usw.) vollständig zu verstehen, ist es nützlich, einige der unten aufgeführten Definitionen zu kennen. Achten Sie bitte auf die dimensionslosen Zahlen, die in dieser und in weiteren Lektionen häufig verwendet werden.

Blow-down ist ein Prozess, bei dem der Speicherdruck während eines Lecks mit der Zeit abnimmt [1].

Unter *Abblasen* versteht man das Erlöschen der Flamme mit hoher Geschwindigkeit ohne Abheben [2].

Das *Ausblasen* ist das Erlöschen der Flamme bei hoher Geschwindigkeit mit einem Abheben [2].

Die *Ausblasgrenze* ist ein Grenzwert für die Strömungsgeschwindigkeit des Brennstoffs, bei dessen Überschreitung eine angehobene Flamme ausbläst [2].

Die *Deflagration* ist der Prozess, der auf die schwache Zündung in einem brennbaren Gemisch folgt, die sich mit Unterschallgeschwindigkeit in frisches, unverbranntes Gemisch ausbreitet [3].

Die *Detonation* ist der Prozess, bei dem sich die Verbrennungswelle mit Überschallgeschwindigkeit im nicht reagierten Medium ausbreitet [3].

Unter *Rückfall* versteht man die Wiederanbindung einer angehobenen Flamme an die Düse durch eine Abnahme der Abhebegeschwindigkeit [2].

Der *effektive Durchmesser* ist der Strahldurchmesser an der Stelle, an der die Expansion bis auf 1 bar erfolgt, in einem unterexpandierten Strahl [4].

Expandierter Strahl ist der Strahl mit einem Druck am Düsenaustritt, der dem atmosphärischen Druck entspricht [1].

Die *Feuerwiderstandsdauer* ist ein Maß für die Zeit, in der ein passives Brandschutzsystem einer standardisierten Feuerwiderstandsprüfung standhalten kann [1].

Flammenabhebung ist der Zustand, in dem die Flamme und ein Brenner getrennt werden.

Die *Flammengeschwindigkeit* ist die Geschwindigkeit der Flamme in Bezug auf einen festen Beobachter [3].

Der *Flammpunkt* ist die niedrigste Temperatur, bei der der Brennstoff genügend Dämpfe erzeugt, um mit der Luft an seiner Oberfläche ein brennbares Gemisch zu bilden [1].



Die *Froude-Zahl* (Fr) ist eine dimensionslose Zahl, die dem Verhältnis von Trägheitskraft und Schwerkraft entspricht [1].

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.

Die *laminare Verbrennungsgeschwindigkeit* ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme im Verhältnis zur Geschwindigkeit des vor ihr befindlichen unverbrannten Gases unter bestimmten Bedingungen hinsichtlich Zusammensetzung, Temperatur und Druck des unverbrannten Gases [1].

Die *Abhebehöhe* ist die Höhe vom Düsenaustritt bis zur Basis einer abgehobenen Flamme [2].

Die *Abhebegeschwindigkeit* ist die Strömungsgeschwindigkeit des Brennstoffs, die dazu führt, dass sich eine Flamme von der Düse löst [2].

Die *Mach-Zahl* (M) ist eine dimensionslose Zahl, die dem Verhältnis zwischen der lokalen Strömungsgeschwindigkeit und der lokalen Schallgeschwindigkeit entspricht [1].

Der *höchstzulässige Betriebsdruck* ($MAWP$) ist der maximale Druck, dem ein Bauteil oder ein Teil des Drucksystems über den gesamten Bereich der Auslegungstemperaturen ausgesetzt werden kann [5].

Normale Temperatur- und Druckbedingungen (NTP) sind: Temperatur 293,15 K und Druck 101,325 kPa [1].

Eine *nicht vorgemischte Flamme* (oft als *Diffusionsflamme* bezeichnet) ist eine Flamme, in der Oxidationsmittel und Brennstoff vor Erreichen der Flammenfront nicht vermischt werden. Während der Verbrennung verbindet sich das Oxidationsmittel mit dem Brennstoff durch Diffusion. Die Flammengeschwindigkeit wird durch die Diffusionsgeschwindigkeit begrenzt.

Überdruck ist der Druck in einer Druckwelle, der über dem Atmosphärendruck liegt, oder der Druck innerhalb eines Sicherheitsbehälters, der den maximal zulässigen Betriebsdruck des Sicherheitsbehälters überschreitet [5].

Eine *vorgemischte Flamme* ist eine Flamme, in der das Oxidationsmittel mit dem Brennstoff vermischt wurde, bevor es die Flammenfront erreicht. Die Verbrennung von vorgemischtem Brennstoff und Oxidationsmittel bildet eine dünne Flammenfront, da die Reaktanten leicht verfügbar sind.

Die *Löschstrecke* ist die Funkenstrecke zwischen zwei flachen, parallelen Plattenelektroden, bei der die Zündung von brennbaren Brennstoff-Luft-Gemischen unterdrückt wird. Die Löschstrecke ist die erforderliche Durchgangsgröße, um die Ausbreitung einer offenen



Flamme durch ein brennbares Brennstoff-Luft-Gemisch, das den Durchgang füllt, zu verhindern [1].

Die *Reynoldszahl* (Re) ist eine dimensionslose Zahl, die ein Maß für das Verhältnis von Trägheits- zu viskosen Kräften ist [1].

Der *Gefahrenabstand* (oder *Trennungsabstand*) ist ein Mindestabstand, der "bestimmte Ziele (z. B. Menschen, Bauwerke oder Ausrüstungen) von den Folgen möglicher Unfälle im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Wasserstoffanlage" trennt [6].

Ein *unterexpandierter Strahl* ist ein Strahl mit einem Druck am Düsenaustritt, der über dem atmosphärischen Druck liegt [1].

Die *sichtbare Flammenlänge* ist der Abstand der Mittellinie von der Spitze der Düse bis zum Flammenende [2]. Sichtbare, infrarote (IR) und ultraviolette (UV) Digitalbilder werden häufig für die Messung der Flammenlänge verwendet, und die gemessenen Flammenlängen variieren zwischen den verschiedenen Bildern [9].

4. Arten von Wasserstoffbränden und Flammen

Wasserstoff kann in verschiedenen Verbrennungsarten brennen, z. B. als Stichflamme, Strahlfeuer, Deflagration, Detonation usw. Wasserstoffbrände können von Mikroflammen mit einem Massendurchsatz von 10^{-9} kg/s bis hin zu Flammen mit hohem Massendurchsatz (Hunderte von kg/s) reichen. Wasserstofffreisetzungen können als laminare Diffusionsflammen oder als turbulente, nicht vorgemischte Flammen brennen, je nach Reynolds-Zahl (Re) an einem Leckausgang. Die Flammen können auftriebsgesteuert und impulsdominiert sein. Die meisten gefährlichen Wasserstofffreisetzungen werden impulsdominiert verlaufen. Die Strahlbrände können je nach den Bedingungen am Leckaustritt Unterschall (Machzahl $M < 1$), Schall und stark unterexpandierten Überschall sein. In den Szenarien, in denen ein Versagen des Speichertanks mit der sofortigen Freisetzung von Wasserstoff in die umgebende Atmosphäre möglich ist, können sich große Feuerbälle (Dutzende von Metern) bilden. Das Vorhandensein von Hindernissen, Oberflächen und Umschließungen beeinflusst die Stichflamme erheblich. Ein Sonderfall sind die Brände von verflüssigtem Wasserstoff (LH_2). Derzeit gibt es nur wenige Erkenntnisse über LH-Brände. Es besteht eine Wissenslücke mit dem Hinweis, dass die Kondensation und Verfestigung von Sauerstoff (aus der Atmosphäre) im Falle eines $2LH_2$ -Lecks/einer LH-Verschüttung Vermischung unter bestimmten Bedingungen zu explosiven Gemischen führen kann..

5. Strahlungswärmeströme von Düsenfeuern und Feuerbällen

5.1 Strahlungswärmeströme von Düsenfeuern

Wasserstoff verbrennt in einer sauberen Atmosphäre mit einer unsichtbaren Flamme. Die adiabatische Temperatur der vorgemischten Flamme für ein stöchiometrisches Gemisch in Luft ist mit 2.403 K etwas höher als bei anderen Brennstoffen. Diese Temperatur kann an einem Unfallort zu schweren Verletzungen führen, insbesondere in einer sauberen Laborumgebung, in der die Wasserstoffflamme praktisch unsichtbar ist. Die Verbrennung von Wasserstoff und heiße Ströme verursachen jedoch Veränderungen in der Umgebung, die zur Erkennung der Flamme genutzt werden können. Obwohl die nicht leuchtende Wasserstoffflamme eine visuelle Erkennung erschwert, gibt es einen starken Einfluss von Wärme und Turbulenzen auf die umgebende Atmosphäre und die aufsteigende Wolke heißer Verbrennungsprodukte. Diese Veränderungen werden als die *Signatur des Feuers bezeichnet*.

Der folgende Abschnitt basiert auf den Arbeiten, die in Ulster im HySAFER-Zentrum durchgeführt wurden [7]. Vor der Erörterung des Strahlungswärmestroms sei darauf hingewiesen, dass eine Wasserstoffflamme nur minimale Infrarotstrahlung und praktisch keine sichtbare Strahlung aussendet. Aufgrund des Fehlens von CO₂-Strahlungsbanden und der starken Absorption durch den umgebenden Wasserdampf beträgt das Verhältnis von sichtbarer zu infraroter Wasserstoffstrahlflamme 0,88 und das Verhältnis von ultravioletter zu infraroter Flammenlänge 0,78 [10]. Dennoch sind die konvektiven und strahlenden Wärmeströme nach wie vor wichtig und müssen zum Schutz von Leben, Eigentum und Umwelt bewertet werden.

Die Auswirkung des Strahlungswärmestroms auf Menschen, Umwelt und Bauwerke wird in der Lektion 6 - Schadenskriterien für Menschen und Sachwerte - ausführlich behandelt.

5.2 Wasserstoffstrahlbrände im Vergleich zu Strahlbränden üblicher Brennstoffe

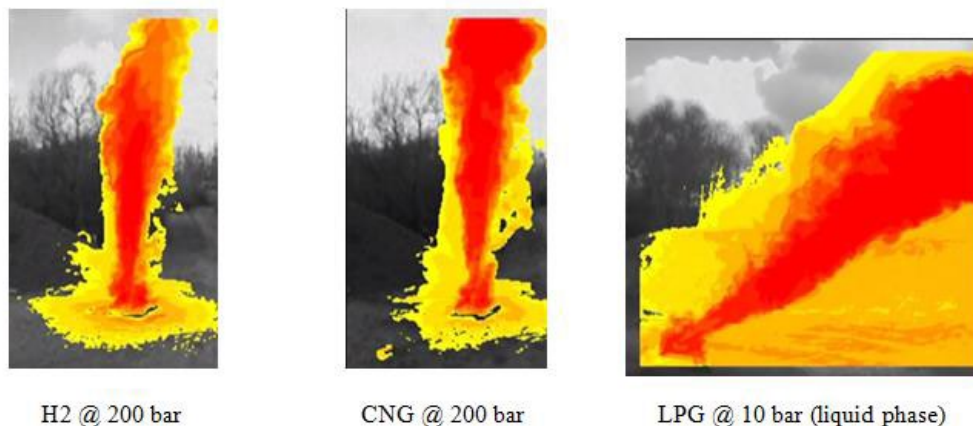


Abbildung 1. Infrarotbild von Düsenfeuern, das die Wärmestrahlung zeigt, die bei der Verbrennung von Wasserstoff (200 bar), CNG (200 bar) und LPG (10 bar) entsteht.

Wie aus **Abbildung 1** hervorgeht, entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von CNG und LPG CO_2 , CO , Ruß und andere Produkte, die im Vergleich zu Wasserstoff eine stärkere Wirkung auf die Strahlung haben. Dieses Phänomen erklärt, warum die Verbrennung von Wasserstoff durch geringere thermische Effekte gekennzeichnet ist als die anderer gängiger Brennstoffe, selbst wenn die Temperatur die einer CNG-Flamme übersteigt. **Abbildung 1** zeigt einen Vergleich der Wärmestrahlung von Wasserstoff (200 bar), CNG (200 bar) und LPG (10 bar) - die Wärmesignatur des Wasserstoff-Jetfeuers ist etwas geringer als die von CNG, und beide sind deutlich geringer als die Wärmestrahlung des LPG-Feuers.

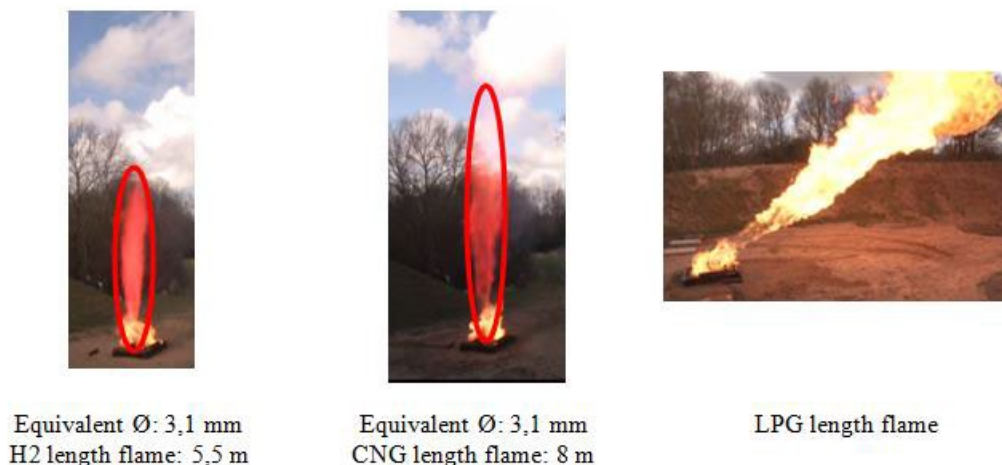


Abbildung 2. Vergleich der Flammenlängen für Düsenbrände von Wasserstoff (Öffnungsdurchmesser 3,1 mm), CNG (Öffnungsdurchmesser 3,1 mm) und LPG.

Wie aus **Abbildung 2** hervorgeht, sind die Flammenlängen von CNG- und LPG-Strahlbränden bei gleichem Durchsatz aufgrund des Sauerstoffverbrauchs, der bei CNG viermal und bei LPG fünfmal höher ist als bei Wasserstoff, länger als die Wasserstoffflammenlänge.

Es ist wichtig zu wissen, dass eine Wasserstoffflamme in einer reinen Umgebung nicht sichtbar ist. Bei FCH-Systemen und Infrastrukturanwendungen sind jedoch immer brennbare Materialien vorhanden, die die Flamme färben, wie in **Abbildung 2** dargestellt.

Die berechneten Flammenlängen welche aus den Thermischen-Druckentlastungsventilen (TPRD) in einigen typischen Fällen austreten, sind in **Tabelle 1** dargestellt. Das Tool - Flammenlängenkorrelation und drei Gefahrenabstände für Düsenbrände - in e-Laboratory (<https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>) wurde implementiert, um die Ergebnisse zu erhalten.

Tabelle 1 Berechnete Flammenlänge vs. TPRD-Durchmesser in typischen Fällen

Speicherdruck (bar)	Durchmesser der Öffnung (mm)	Tanktemperatur (°C)	Länge der Flamme (m)
350	1.0	20	2.6
700	1.0	20	3.3

350	1.0	50	2.5
700	1.0	50	3.2
350	3.0	20	7.8
700	3.0	20	9.9
350	3.0	50	7.5
700	3.0	50	9.6
350	1.0	100	3.1
700	3.0	100	9.2

5.3 Wasserstoff-Feuerkugeln

Wasserstoff-Feuerbälle können als Folge eines katastrophalen Versagens eines Wasserstofftanks entstehen. Der auf der Website "h2safe.net" (http://h2safe.net/case_safety.html) [11] veröffentlichte "Case for Safety" analysiert die relativen Häufigkeiten der Versagensarten und stellt fest, dass nur etwa 10 bis 27 % der Druckgasfreisetzungen als katastrophal eingestuft werden. Dennoch muss betont werden, dass die Fehlfunktion der Tanksicherheitsvorrichtung (TPRD) zu einem katastrophalen Bruch des Wasserstoffspeichers führen kann. Die Ulster Universität hat sich mit der Modellierung der Folgen und Auswirkungen eines katastrophalen Bruchs befasst und sich dabei auf Hitzestrahlung und Druckwellen konzentriert. Die von Zalosh [12] angegebenen Größen des Feuerballs können als Anhaltspunkt dienen. Die Experimente zum katastrophalen Versagen eines Wasserstoffspeichers wurden an einem freistehenden Tank (Typ IV; Volumen 72,4 l; Speicherdruck 34,3 MPa; keine TPRD=Thermische Druckentlastungsventile) und an einem unter einem Geländewagen installierten Tank (Typ III, Volumen 88 l; Speicherdruck 31,8 MPa, keine TPRD) durchgeführt. Der freistehende Tank des Typs IV versagte 6 Minuten und 27 Sekunden nach Beginn des Brandes in katastrophaler Weise. Es folgte ein Feuerball mit einem Durchmesser von 7,7 m, 45 ms nach dem Bruch des Tanks. Dieser Feuerball hat sich innerhalb von 1 s abgelöscht [12].

Bei dem unter dem Fahrzeug befindlichen Tank des Typs III drangen nach etwa 4 Minuten der Einwirkung des Propangasfeuers Flammen und Gase in den Fahrgastraum ein. Der katastrophale Bruch des Tanks ereignete sich nach 12 Minuten und 8 Sekunden Brandeinwirkung, wobei ein Feuerball mit einem maximalen Durchmesser von 24 m entstand, der 4,5 Sekunden andauerte. Verschiedene Teile des Testfahrzeugs und des Tanks wurden in einer Entfernung von bis zu 107 m gefunden. Es muss betont werden, dass die oben genannten Entfernungen bei Wasserstofftanks, die unter einem Druck von 70 MPa stehen, noch größer sein können [12].



Die Entwicklung und Validierung des CFD-Modells zur Simulation von Druckwellen- und Feuerballdynamik nach dem Bruch eines Hochdruck-Wasserstofftanks bei einem Brand in der offenen Atmosphäre wurde kürzlich von Molkov et al. in UU [21] durchgeführt. Die Komplementarität und Synergie von experimentellen Daten und numerischer Analyse ermöglichte es, Einblicke in die Dynamik von Druckwellen und Feuerbällen zu gewinnen und so Wissenslücken im Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Phänomene zu schließen. Dies war die erste Studie, in der der Mechanismus der Wasserstoffverbrennung, der zur Stärke der Druckwelle beiträgt, quantitativ erklärt wurde. Beispielsweise erhöht die Wasserstoffverbrennung nach dem Bruch eines 36-Liter-Tanks mit 70 MPa bei einem Brand den maximalen Überdruck der Druckwelle in 5 m Höhe um 37 %. Der simulierte Feuerball zeigte eine typische Entwicklung während einer Wachstumsphase, bevor er durch Auftriebseffekte aufstieg. Die Größe und Form des Feuerballs (7,7 m nach 45 ms) wurde im Experiment in den USA genau reproduziert.

5.4 Auswirkung der verzögerten Zündung auf den Druck von Wasserstoffstrahlbränden

Unmittelbar nach dem Entweichen von Wasserstoff aus der Hochdruckanlage gibt es eine instationäre Phase der Strahlbildung. Eine verzögerte Zündung und anschließende Verbrennung der in dieser Phase gebildeten instationären, hochturbulenten Wasserstoff-Luft-Wolke kann zu einem erheblichen Überdruck im Nahbereich führen, der Menschen schädigen kann. Dieser Vorgang ist im Grunde die Deflagration und findet statt, bevor sich der quasistationäre Strahlbrand etabliert [1].

6. Brand von FC-Fahrzeugen

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCV) sind eine der wichtigsten sich schnell entwickelnden Anwendungen der FCH-Technologien. Ähnlich wie ein batterieelektrisches Auto hat ein Brennstoffzellenauto keinen Verbrennungsmotor. Brennstoffzellen wandeln die in chemischer Form gespeicherte Energie direkt in elektrische Energie um, die das Fahrzeug antreibt. Weltweit sind bereits mehrere tausend FCV im Einsatz, und kleine Flotten von Brennstoffzellenautos werden vor allem von Unternehmen und Behörden, aber auch von Privatpersonen genutzt. Dazu gehören die freigegebenen Serienmodelle von Hyundai (iX35 Brennstoffzelle und NEXO) und die Toyota Mirai I und II Modelle. Mehr als tausend Fahrzeuge sind in Deutschland im Einsatz, hundert Tankstellen sind in Betrieb! Auch einige Feuerwehrautos sind bereits Brennstoffzellenfahrzeuge.

Laut der Brandstatistik in Großbritannien [13] wurden dort im Zeitraum 2011-2012 beispielsweise 28.800 Brände von Straßenfahrzeugen registriert. Zum Vergleich: In den USA ereigneten sich im selben Zeitraum 172.500 Fahrzeugbrände. Es waren verschiedene Fahrzeugtypen betroffen: Pkw, Lkw, leichte Nutzfahrzeuge, öffentliche Verkehrsmittel usw. Die meisten Brände (65 %) ereigneten sich in Pkw, 10 % in Lieferwagen, 4 % in

Lastkraftwagen und 2 % in Bussen oder Kleinbussen [13]. Die Brandursachen können unfallbedingt, vorsätzlich oder unbekannt sein. Die Mehrheit der vorsätzlichen Brände (43 %) betraf Straßenfahrzeuge: 13.900 Brände. Die Zahl der Todesopfer bei Bränden von Straßenfahrzeugen lag 2011-12 bei 37 [13].

Im Zeitraum von 2000 bis 2006 wurden 20 katastrophale Ausfälle von CNG-Tanks dokumentiert, von denen 11 auf Fahrzeugbrände zurückgeführt wurden [14]. Von diesen 11 Vorfällen deuten die Beweise darauf hin, dass die meisten PRDs nicht aktiviert wurden (im Falle eines lokal begrenzten Brandes). "Tests haben gezeigt, dass alle Kraftstofftanks (sowohl CNG- als auch Wasserstofftanks) unabhängig vom Betriebsdruck sehr anfällig für eine schnelle Degradation durch lokale Brände sind" [14]. Dies bedeutet, dass ein katastrophales Versagen bei der Risikobewertung nicht ausgeschlossen werden kann [11].

Gefahren und damit verbundene Risiken für FCVs sollten professionell nachgewiesen und interpretiert werden, wobei alle Beteiligten, angefangen bei den Konstrukteuren von BZ-Systemen über die Regulierungsbehörden bis hin zu den Nutzern, die Folgen in vollem Umfang verstehen sollten. Der erste Vergleich der "Schwere" von Wasserstoff- und Benzinlecks und -entzündungen wurde von Swain [15] durchgeführt. **Abbildung 3** zeigt die Schnappschüsse von Wasserstoff- und Benzinbränden 3 s (links) und 60 s (rechts) nach Ausbruch eines Fahrzeugbrandes. Es ist anzumerken, dass diese frühen Bilder NICHT das neuere Design der abgewinkelten TPRD mit kleinerem Durchmesser widerspiegeln.



Abbildung 3. Wasserstoffstrahlfeuer und Benzinfeuer: 3 s (links) und 60 s (rechts) nach Auslösung eines Autobrands [15].

Das in **Abbildung 3** dargestellte Szenario mit einem wasserstoffbetriebenen Auto ist selten. (Bitte beachten Sie, dass bei FCV-Fahrzeugen die Freisetzung von Wasserstoff nicht vertikal nach oben gerichtet ist.) Es kann durch eine falsche Selbstauslösung einer Druckentlastungsvorrichtung (PRD) realisiert werden. Tatsächlich würde eine Freisetzung von Wasserstoff durch die PRD aus dem Bordspeicher in den meisten Fällen durch einen externen Brand ausgelöst. Ein Szenario mit einem externen Feuer verändert die Gefahren und die damit verbundenen Risiken drastisch im Vergleich zu der in **Abbildung 3** dargestellten Situation.



Abbildung 4. Ein FCV-Benzinpool-Brandtest: links - Benzinbrand kurz vor Auslösung des TPRD, rechts - 1 Sekunde nach Auslösung des TPRD [16].

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse einer in Japan durchgeführten Studie zum Brand von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen [16]. Das FCV war mit einer thermischen Druckentlastungsvorrichtung (TPRD) mit einem Entlüftungsrohr-Innendurchmesser von 4,2 mm ausgestattet. In dem in Abbildung 4 gezeigten Test wurde der Druckwasserstofftank genau an der Stelle installiert, an der der Benzintank entfernt worden war. Aus diesem Grund gab es keine Möglichkeit, einen größeren Speicherbehälter zu installieren, und es wurde ein kleiner Tank von 36 l bei einem Druck von 70 MPa verwendet. Die Brandausbreitung von einem Benzinfahrzeug auf ein FCV wurde untersucht, um Szenarien zu berücksichtigen, in denen verschiedene Fahrzeugtypen bei einem Autounfall oder einer Naturkatastrophe wie einem Erdbeben in Brand geraten. Das Experiment ergab, dass sich ein Feuerball von mehr als 10 m Durchmesser bildet, wenn der TPRD des FCV-Speichertanks durch ein Benzinfeuer aktiviert wird (Abbildung 4, rechts).

In einem weiteren Versuch von Tamura et al. [16] wurden zwei Fahrzeuge in einem Abstand von ca. 0,85 m geparkt und die Brandausbreitung vom FCV auf das Benzinfahrzeug untersucht. Abbildung 5 zeigt zwei Fahrzeuge nach der Auslösung des TPRD im FCV. Daraus lässt sich schließen, dass eine Selbstrettung aus dem Fahrzeug oder eine Absicherung durch Ersthelfer bei einer derartigen Konstruktion des Wasserstofffreisetzungssystems unmöglich ist und dass sich die Fahrzeughersteller mit diesem Problem der Kundensicherheit befassen müssen.



Abbildung 5. Das HFCV mit initiiertem TPRD (links) und das Benzinauto (rechts) [16].

Unter den Testbedingungen ist die Ursache für die Ausbreitung des Feuers vom FCV auf das benachbarte Benzinauto die Flamme, die sich von der Innen- und Außenausstattung des FCV ausbreitet, nicht aber die Wasserstoffflamme aus dem TPRD (es ist erwähnenswert, dass in der Studie von Tamura et al. [16] der kleine Speichertank von nur 36 Litern mit einer kürzeren Wasserstofffreisetzungzeit anstelle eines größeren Tanks verwendet wurde, der für eine wettbewerbsfähige Reichweite erforderlich ist). Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass in Autotransportschiffen und anderen ähnlichen Situationen mit eng geparkten FCV die Testergebnisse auf die Möglichkeit hinweisen, dass ein Feuer in einem FCV dessen TPRD aktiviert und dadurch Wasserstoffflammen erzeugt, die wiederum die TPRD-Aktivierung im Unterflurbereich eines benachbarten FCV verursachen können.

Um den Schaden durch einen FCV-Brand zu minimieren, schlagen die Autoren von [16] vor, dass es wichtig ist, den Brand frühzeitig zu erkennen und zu löschen, bevor der TPRD aktiviert wird. Es ist bekannt, dass ein Wasserstoffbrand in vielen praktischen Situationen schwer oder gar nicht zu löschen ist. Es bleibt zu hoffen, dass die Automobilhersteller geeignete sicherheitstechnische Lösungen entwickeln, die u. a. eine Verringerung der Flammenlänge von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen im Falle eines Unfalls vorsehen, um einen möglichen Dominoeffekt bei der Unfallentwicklung auszuschließen und die Ersthelfer bei der Kontrolle solcher Brände und der Durchführung von Rettungsmaßnahmen zu unterstützen. Die von Tamura et al. durchgeführten Experimente haben deutlich gezeigt, dass die Folgen eines Brandes bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen sowohl in Bezug auf Menschenleben als auch auf Sicherheit und Sachschäden eine große Herausforderung darstellen können [16].

Wie bereits erwähnt, ist komprimierter gasförmiger Wasserstoff derzeit die gängige Technologie für die Wasserstoffspeicherung an Bord. Der Druck für die Speicherung an Bord beträgt bis zu 70 MPa. Normalerweise werden Tanks des Typs IV (mit Polymerauskleidung) verwendet. Leider ist die Feuerbeständigkeit dieser Tanks gering. Stephenson [17] hat zum

Beispiel die Zeit bis zum katastrophalen Versagen mit 3,5 bis 6,5 Minuten angegeben. Die derzeitige "Lösung" zur Verhinderung eines katastrophalen Versagens dieser Tanks im Brandfall besteht darin, den Wasserstoff vor dem Versagen schnell durch einen TPRD mit einer Öffnung von vergleichsweise großem Durchmesser (bis zu etwa 5 mm) freizusetzen. Diese "Lösung" ist jedoch aufgrund der langen Flammen, die eine sichere Evakuierung und Rettung verhindern, selbst in offener Atmosphäre inakzeptabel (Abbildung 6). Darüber hinaus stellt dies ein ernsthaftes Problem für die Sicherheit von Menschenleben und den Schutz von Eigentum dar, wenn sich der FCV in einem geschlossenen Raum wie Garagen, Tunneln oder Parkhäusern befindet [8].



Abbildung 6. Wasserstoffstrahlflamme aus einem nach oben gerichteten PRD eines FCV [18].
(HINWEIS: Aktuelle TPRDs sind in der Regel abgewinkelt)

Der in Abbildung 6 dargestellte Brand wurde am Aschenbecher des Armaturenbretts ausgelöst [18]. Der PRD war nach oben gerichtet und wurde 14 Minuten und 36 Sekunden nach der Brandauslösung aktiviert (Aufwärtsszenario). Das getestete FCV war mit zwei Zylindern mit einem Fassungsvermögen von je 34 l bei 35 MPa und einem PRD-Durchmesser von 5 mm ausgestattet (um ein Abblasen des Wasserstoffs in 5 Minuten vor dem katastrophalen Bruch zu ermöglichen).

Das Szenario mit einer abwärts gerichteten Wasserstofffreisetzung aus einem PRD ist in Abbildung 7 dargestellt. Der PRD wurde in diesem Fall 16 Minuten und 16 Sekunden nach Brandausbruch aktiviert [18].



Abbildung 7. Wasserstoffstrahlflamme aus einer nach unten gerichteten PRD eines FCV (links - Rückansicht des Fahrzeugs; rechts - Seitenansicht des Fahrzeugs) [18].

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen, dass die derzeitige Konstruktion von TPRD im Falle einer Wasserstofffreisetzung und eines Düsenfeuers keine Selbstrettung des Fahrers und der Insassen ermöglicht, ein Eingreifen der Rettungskräfte verhindert und eine Gefahr für die Öffentlichkeit darstellt. Die Freisetzung von Wasserstoff aus einer TPRD kann als ein typisches Unfallszenario betrachtet werden. Wenn die Temperatur mehr als 110°C erreicht, wird die TPRD aktiviert und Wasserstoff freigesetzt. TPRDs befinden sich in der Regel auf Lagertanks unterhalb von FCVs. Die Freisetzung ist senkrecht nach unten gerichtet, und die Wasserstoffflamme trifft auf den Boden. Eine entzündete Freisetzung aus einer TPRD ist am wahrscheinlichsten bei einem Fahrzeugbrand, unabhängig davon, ob das Fahrzeug geparkt ist oder auf einer Straße fährt. Die mit diesem Szenario verbundenen Gefahren hängen vom Zeitpunkt der Zündung ab. Im Falle einer sofortigen Zündung breitet sich die auftreffende Wasserstoffstrahlflamme (unter dem Auto) nach außen aus und erzeugt eine Brandumgebung mit hohen Temperaturen, die für Menschen und Sachwerte gefährlich ist. Ohne sofortige Zündung bildet der freigesetzte Wasserstoff eine brennbare Wolke, die zu einer verzögerten Zündung führen kann.

In den Studien der Universität Ulster werden die deterministischen Trennungsabstände für gezündete Freisetzungen in der offenen Atmosphäre bewertet [49]. Für gezündete Freisetzungen wurden drei Temperaturgrenzen als Schadenskriterien für verschiedene gefährdete Ziele angenommen. Für die Allgemeinheit wurde eine Temperatur von 70°C als Akzeptanzkriterium für Unbedenklichkeit angenommen. Für die Einsatzkräfte ohne Wärmeschutzkleidung wurde eine Temperatur von 115°C als Schmerzgrenze angenommen. Für Einsatzkräfte mit Wärmeschutzkleidung wurde konservativ angenommen, dass sie nicht in einer Umgebung arbeiten sollten, in der die Temperatur höher als 260°C ist, da die Bunkerausrüstung so konzipiert ist, dass sie sich nicht entzündet, schmilzt, tropft oder sich löst, wenn sie fünf Minuten lang solchen Temperaturen ausgesetzt ist [20].

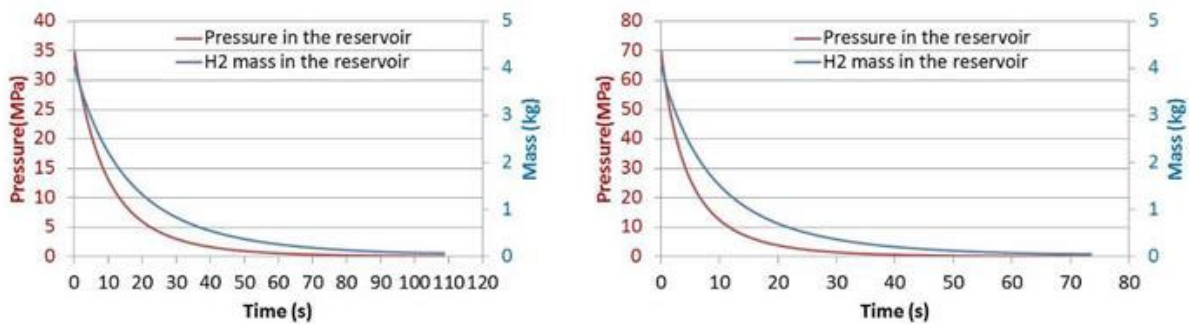


Abbildung 8. Druck- und Massendynamik in einem Wasserstoffspeicher beim Abblasen durch eine 4,2 mm TPRD-Düse: 171-Liter-Tank, Anfangsdruck 35 MPa (links), und 101-Liter-Tank, Anfangsdruck 70 MPa (rechts) [19].

Unter realen Bedingungen ist eine Wasserstofffreisetzung aus einem Hochdrucktank kein stationärer Vorgang, sondern ein Abblasvorgang, bei dem der Druck im Tank abfällt, bis der Tank leer ist. Das oben erwähnte fiktive Düsenmodell kann zur Simulation der Druckdynamik im Wasserstoffspeicher während einer unterexpandierten Strahlabgabe verwendet werden. Abbildung 8 zeigt die Druck- und Massendynamik während des Abblasens aus zwei Wasserstoffspeichern: 171 l Volumen, 35 MPa Speicherdruck (Abbildung 8 links) und 101 l, 70 MPa Speicherdruck (Abbildung 8 rechts). Beide Tanks enthalten anfangs die gleiche Menge Wasserstoff von 4,05 kg und haben den gleichen TPRD-Durchmesser von 4,2 mm. Wie aus Abbildung 8 hervorgeht, beträgt die Gesamtabblaszeit selbst bei einem Speicherdruck von 35 MPa weniger als 110 s, und der Übergang von einem unterexpandierten zu einem expandierten Strahl erfolgt bei 85 s. Bei der Freisetzung aus einem 70-MPa-Speichertank beträgt die Gesamtabblaszeit weniger als 75 s, wobei der Übergang von einem unterexpandierten zu einem expandierten Strahl bei etwa 58 s erfolgt [19].

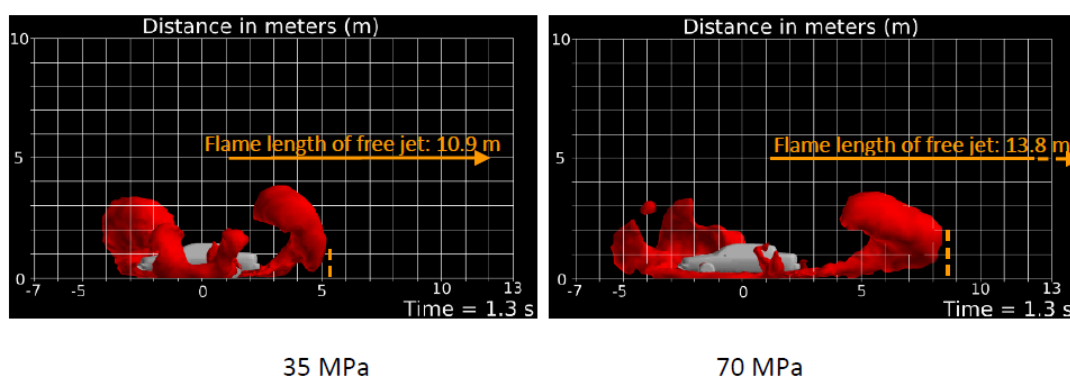


Abbildung 9. Seitenansicht der größten Wasserstoffflammenhülle (Isofläche der Temperatur $T = 1.300 \text{ }^\circ\text{C}$) [19].

Abbildung 9 zeigt eine Momentaufnahme der größten Flammenhüllkurve, die sich aus der Freisetzung von Wasserstoff über eine unter einem Auto installierte und nach unten gerichtete TPRD mit einer Öffnung von 4,2 mm ergibt. Die Flammenhülle wurde in CFD-Simulationen

ermittelt und mit Hilfe der Temperatur-Isofläche $T = 1.300 \text{ °C}$ visualisiert. Die längste Flammenspitze liegt bei etwa 5,2 m und 8,4 m für Freisetzungen aus Lagern mit Drücken von 35 MPa bzw. 70 MPa. Die Flammenlänge bei der Freisetzung mit 70 MPa ist um mehr als 60 % größer als bei der Freisetzung mit 35 MPa. In beiden Fällen treten die größten Flammenhüllen in Bodennähe etwa 1,3 s nach der Öffnung des TPRD auf. Danach schrumpft die Flamme, und die Trennungsabstände nehmen ab. Abbildung 9 zeigt auch die längste Flammenausbreitung für ungehinderte Freistrahldrände, die anhand einer analytischen Korrelation berechnet wurde. Eine realistische Freisetzung aus TPRD unter dem Fahrzeug führt zu einer erheblichen Verringerung der Flammenhülle - mehr als 50 % bzw. fast 40 % für Freisetzungen aus Lagern mit einem Druck von 35 MPa bzw. 70 MPa [19].

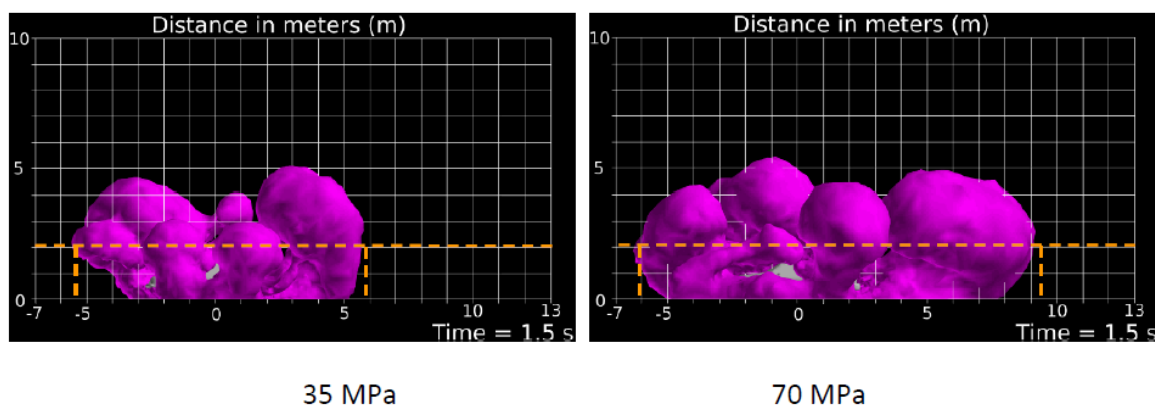


Abbildung 10. Seitenansicht der größten Umhüllung für den sicheren Einsatz von Einsatzkräften in Schutzkleidung (Iso-Oberfläche der Temperatur $T = 260 \text{ °C}$), die in 2 m Höhe abgeschnitten ist [19].

Abbildung 10 zeigt die Temperatur-Isofläche $T = 260 \text{ °C}$, die der Sicherheitsschwelle für den Einsatz von Einsatzkräften in Hitzeschutzkleidung entspricht. Die längste Gefahrendistanz beträgt etwa 5,8 m und 9,2 m für Freisetzungen aus Lagern mit Drücken von 35 MPa bzw. 70 MPa. Die Gefahrendistanz für die Freisetzung mit 70 MPa erhöht sich um mehr als 58 % im Vergleich zur Freisetzung mit 35 MPa. In beiden Fällen treten die größten Temperaturhüllen von 260 °C in Bodennähe etwa 1,5 s nach der Öffnung des TPRD auf. Danach schrumpfen die Hüllkurven, und die Trennungsabstände nehmen ab [19].

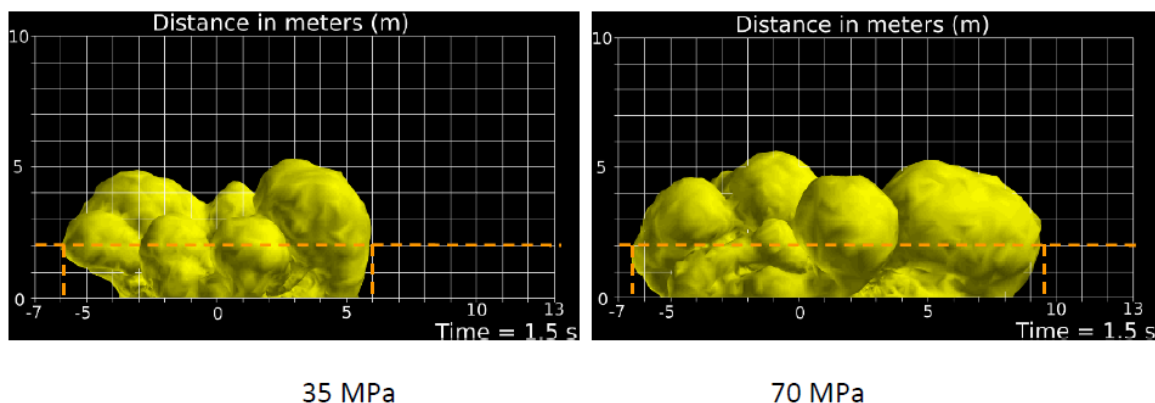


Abbildung 11. Seitenansicht der größten Umhüllung für den sicheren Einsatz von Respondern ohne Schutzkleidung (Iso-Oberfläche der Temperatur $T = 115 \text{ °C}$), die in 2 m Höhe abgeschnitten ist [19].

Die Isofläche der Temperatur $T = 115 \text{ °C}$, die dem Schwellenwert für den Einsatz von Einsatzkräften ohne Schutzkleidung entspricht, ist in Abbildung 11 dargestellt. Die längste Gefahrendistanz beträgt in diesem Fall etwa 6 m bzw. 9,4 m für Freisetzungen aus 35 MPa- bzw. 70 MPa-Speichertanks. Die Gefahrendistanz für die Freisetzung von 70 MPa erhöht sich um fast 57 % im Vergleich zur Freisetzung von 35 MPa. In beiden Fällen treten die größten Hüllkurven, die der Temperatur $T = 115 \text{ °C}$ entsprechen und sich in Bodennähe befinden, etwa 1,5 s nach der Öffnung des TPRD auf. Danach schrumpfen die Umhüllungen und die Trennungsabstände nehmen ab [19].

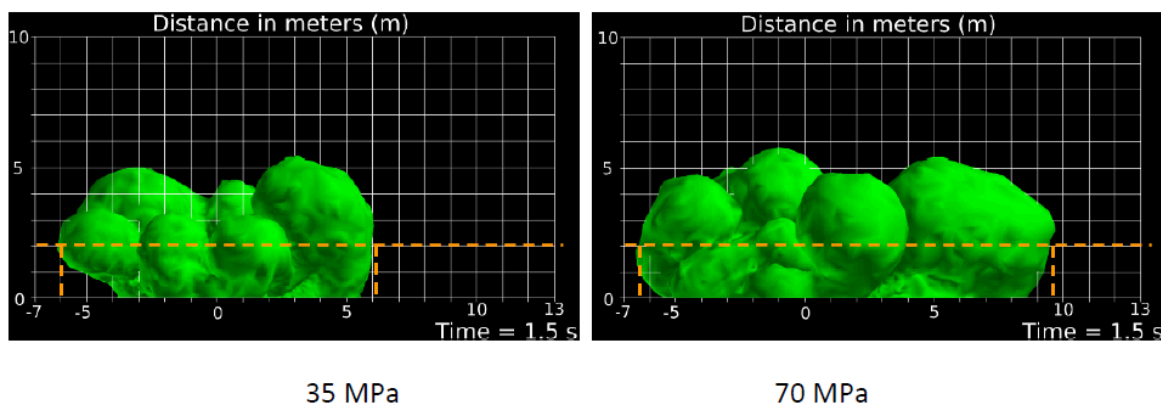


Abbildung 12. Seitenansicht der größten Umhüllung für die öffentliche Sicherheit (Isofläche der Temperatur $T = 70 \text{ °C}$), Abgrenzung in 2 m Höhe [19].

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass der längste Trennungsabstand für die Allgemeinheit etwa 6 m und 9,5 m für die 35 MPa und 70 MPa Freisetzung beträgt. Der Trennungsabstand für die 70 MPa Freisetzung erhöht sich um mehr als 58% im Vergleich zu der 35 MPa Freisetzung. In beiden Fällen treten die größten Temperaturhüllen von 70 °C in Bodennähe etwa 1,5 Sekunden nach der Öffnung des TPRD auf. Danach schrumpfen die Umhüllungen, und die Gefahrenabstände nehmen ab [19].

Darüber hinaus müssen auch die Schallpegel berücksichtigt werden, die mit dem Austreten von Wasserstoff und einer Explosion verbunden sind.

Danksagung

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

Referenzen

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
2. Cheng, TS, Chiou, CR (1998). Experimental investigation of the characteristics of turbulent hydrogen jet flames. Combustion Science and Technology. Col. 136, p. 81-84.
3. Dorofeev, SB (2009). Evaluation of hydrogen explosion hazards: phenomenology and potential flame acceleration and DDT. 4th European Summer School on Hydrogen Safety.
4. Birch, AD, Brown, MG, Dodson, MG, Swaffield, F (1984). The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas. Combustion Science and Technology. Vol. 36, p. 249-261.
5. NFPA®52. Vehicular Natural Gas Fuel Systems Code, 2019 Edition.
6. 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 p. 2381-2388.
7. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
8. HyFacts Project. Chapter F. Hydrogen fires. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [accessed on 25.11.20].
9. Schefer, RW, Houf, WG, Bourne, B and Colton, J (2006). Spatial and radiative properties of an open-flame hydrogen plume. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 31, pp. 1332-1340.
10. Houf, WG and Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32, pp. 136-151.
11. Case for safety. Relative frequency of failure modes. Available from: http://h2safe.net/case_safety.html [accessed on 25.11.20].
12. Zalosh, R (2007). Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. Proceedings on the 5th Seminar on Fire and Explosion Hazard, Edinburgh, UK, 23-27 April 2007, pp. 2154-2161.
13. Fire statistics, Great Britain, 2011-2012. Department of Communities and Local Government.
14. Gambone, LR and Wong, JY (2007). Fire protection strategy for compressed hydrogen-powered vehicles. 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain, 11-13 September, 2007.

15. Swain, MR (2001). Fuel leak simulation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review. Available from: <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf> [Accessed 25.11.20].
16. Tamura, Y, Takabayashi, M, Takeuchi, M and Mitsuishi, H (2011). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Hydrogen Safety, 12-14 September 2011, San Francisco, USA.
17. Stephenson, RR (2005) Fire safety of hydrogen-fuelled vehicles: system-level bonfire test. Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, 2005. Available from: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005>. [Accessed 25.11.20].
18. Watanabe, S, Tamura, Y, Suzuki, J (2007). The new facility for hydrogen and fuel cell vehicle safety evaluation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32 (13), pp. 2154-2161.
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. 6th International Conference on Hydrogen Safety, 19-21 October 2015, Yokohama, Japan.
20. NFPA 1971, Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting, 2007 Edition. National Fire Prevention Association, 2007, Boston, Massachusetts.
21. Molkov VV, Cirrone DMC, Shentsov VV, Dery W, Kim W, Makarov DV. Dynamics of blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire in the open atmosphere. Int J Hydrogen Energy, 2021, 46: 4644-4665.