



Europäisches Train-the-Trainer-Programm für Responder

Lektion 9

Gefahrenabstände durch Wasserstoffflammen und Brandbekämpfung

STUFE I

Feuerwehrmann

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

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

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 "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

Dieser Vortrag befasst sich mit der Freisetzung von gezündetem Wasserstoff. Zu Beginn wurde eine nützliche Terminologie eingeführt. Dann wird eine Klassifizierung der verschiedenen Arten von Wasserstoffbränden durchgeführt. gegeben

Schlüsselwörter

Wasserstoffbrand, Flammenlänge



Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
1. Zielgruppe.....	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Feuerwehrmann	5
1.2 Kompetenzstufe: Feuerwehrmann.....	5
1.3 Vorbildung: Feuerwehrmann	5
2. Einleitung und Ziele	5
3. Wichtigste Terminologie	7
4. Arten von Wasserstoffbränden und Flammen	9
5. Strahlungswärmeströme von Düsenfeuern und Feuerbällen.....	9
5.1 Strahlungswärmeströme von Düsenfeuern.....	9
5.2 Wasserstoffstrahlbrände im Vergleich zu Strahlbränden üblicher Brennstoffe.....	10
6. Brand von FC-Fahrzeugen	12
Danksagung	13
Referenzen.....	13



1. Zielgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die STUFE 1: Feuerwehrmann. Es gibt auch Lektionen für die Stufen II, III und IV: Gruppenkommandant, Einsatzleiter und Experte.

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

1.1 Beschreibung der Rolle: Feuerwehrmann

Von einem Feuerwehrmann wird erwartet, dass er in der Lage ist, unter allen klimatischen Bedingungen in Bereichen und in Notsituationen, die nach vernünftigem Ermessen einen Einsatz erfordern, in Schutzausrüstung einschließlich Atemschutzgeräten und unter Verwendung der zur Verfügung gestellten Ausrüstung wie Fahrzeuge, Leitern, Schläuche, Feuerlöscher, Kommunikations- und Rettungsgeräte sicher zu handeln.

1.2 Kompetenzstufe: Feuerwehrmann

Die Ersthelfer müssen in der sicheren und korrekten Verwendung von PSA, PA und anderen Ausrüstungsgegenständen, die sie bedienen sollen, geschult sein und über entsprechende Kenntnisse und Praktiken verfügen. Verhaltensweisen, die ihre Sicherheit und die anderer Kollegen gewährleisten, sollten in Standardarbeitsanweisungen (SEM) beschrieben werden. Sie müssen in der Lage sein, das Risiko für ihre eigene Sicherheit und die Sicherheit anderer dynamisch zu bewerten.

1.3 Vorbildung: Feuerwehrmann

EQR 2 - Grundlegende Faktenkenntnisse in einem Arbeits- oder Studienbereich. Grundlegende kognitive und praktische Fertigkeiten, die erforderlich sind, um relevante Informationen zu nutzen, um Aufgaben auszuführen und Routineprobleme unter Verwendung einfacher Regeln und Hilfsmittel zu lösen. Arbeit oder Studium unter Aufsicht mit einer gewissen Selbstständigkeit.

2. Einleitung und Ziele

Häufig wird der Begriff "Sicherheit" als "nicht-technisches" 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 können. In diesem Vortrag werden mehrere Faktoren erörtert, die sich auf das Ausmaß eines Strahlungsfeuers und den damit verbundenen Wärmestrom auswirken, Faktoren sind z.B. der Wasserstoffspeicherdruck und die Größe des Lecks. Methoden zur Erkennung von Wasserstoffbränden sowie Techniken zur Eindämmung und Löschung von Wasserstoffbränden werden in diesem Vortrag ebenfalls behandelt.

Am Ende dieses Vortrags 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 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 der Abstand 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 [8].

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 LH_2 -Lecks/einer LH - 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-Strahlung 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 [9]. 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

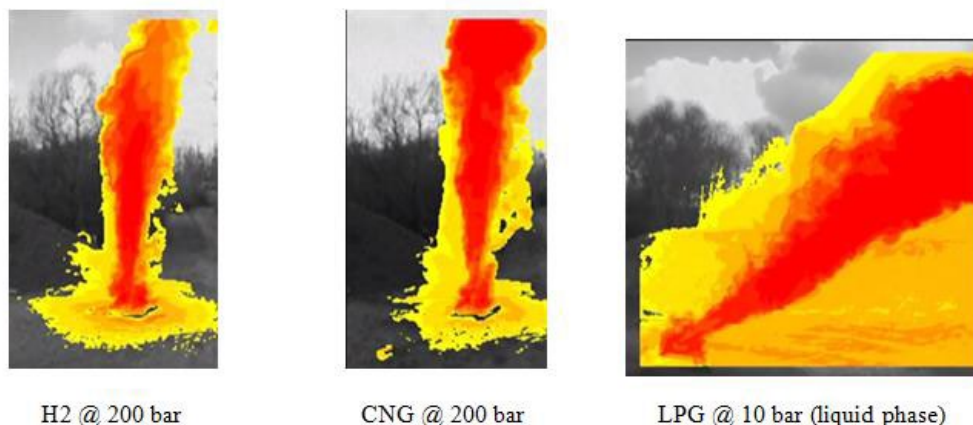


Abbildung 1. Infrarotbild von Düsenfeuern, das die Wärmestrahlung zeigt, die bei der Verbrennung von Wasserstoff (200 bar), CNG (200 bar) und LPG (10 bar) entsteht.

Wie aus [Abbildung 1](#) hervorgeht, entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von CNG und LPG CO₂, 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.



Equivalent Ø: 3,1 mm
H2 length flame: 5,5 m



Equivalent Ø: 3,1 mm
CNG length flame: 8 m



LPG length flame

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

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

6. Brand von FC-Fahrzeugen

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCV) sind eine der wichtigsten und sich am schnellsten entwickelnden Anwendungen der FCH-Technologie. 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. In Deutschland sind mehr als tausend Fahrzeuge im Einsatz und hundert Tankstellen in Betrieb! Auch einige Feuerwehrautos sind bereits Brennstoffzellenfahrzeuge.

Laut der Brandstatistik in Großbritannien [10] wurden dort im Zeitraum 2011-2012 beispielsweise 28.800 Brände von Straßenfahrzeugen registriert. Zum Vergleich: In den USA ereigneten sich im gleichen 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 [10]. 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 [10].

Im Zeitraum von 2000 bis 2006 wurden 20 katastrophale Ausfälle von CNG-Tanks dokumentiert, von denen 11 auf Fahrzeugbrände zurückgeführt wurden [11]. 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 Zersetzung durch örtlich begrenzte Brände sind" [11]. Dies bedeutet, dass ein katastrophales Versagen bei der Risikobewertung nicht ausgeschlossen werden kann [10].



Abbildung 3. Wasserstoffstrahlfeuer und Benzinfeuer: 3 s (links) und 60 s (rechts) nach Auslösung eines Autobrandes [13].



Gefahren und damit verbundene Risiken für FCVs sollten professionell nachgewiesen und interpretiert werden, wobei alle Beteiligten, angefangen bei den Konstrukteuren von FC-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 [13] durchgeführt. **Abbildung 3** zeigt die Momentaufnahmen 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.

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. 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.



9. 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.
10. Case for safety. Relative frequency of failure modes. Available from: http://h2safe.net/case_safety.html [accessed on 25.11.20].
11. Fire statistics, Great Britain, 2011-2012. Department of Communities and Local Government.
12. 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.
13. 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].