



Europäisches Train-the-Trainer-Programm für Responder

## Lektion 10

# Umgang mit Wasserstoffexplosionen

## STUFE III

### Einsatzleiter

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Ebene des **Einsatzleiters**.

Dieses Thema ist auch auf den Stufen I und IV verfügbar.

Diese Lektion ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann, Gruppenkommandanten (-führer), Einsatzleiter und Experten.

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

In dieser Lektion werden die Hauptmerkmale "chemischer" Explosionen, d.h. Deflagrationen und Detonationen, und "physikalischer Explosionen", d.h. Tankbrüche, behandelt. Er eignet sich für die Ebene des Einsatzleiters.

## Schlüsselwörter

Deflagrationen, Detonation

## Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter .....	3
1. Zielgruppe.....	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Einsatzleiter .....	5
1.2 Kompetenzniveau: Einsatzleiter.....	5
1.3 Vorheriges Lernen: Einsatzleiter.....	5
2. Einleitung und Ziele .....	5
3. Nützliche Terminologie.....	6
4. Gasexplosion .....	6
5. Verpuffungen und Druckwellen.....	7
6. Die Auswirkungen von Druckwellen auf Menschen und Gebäude .....	7
7. Wirkung von Splintern und Trümmern .....	8
8. Mögliche Maßnahmen zur Eindämmung von Explosionen .....	9
Danksagung.....	9
Referenzen.....	9

## Lektion 10: Umgang mit Wasserstoffexplosionen

### 1. Zielgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Stufe des Einsatzleiters. Es gibt auch Lektionen für die Stufen I, II und IV: Feuerwehrmann, Gruppenkommandant (-führer) und Experten.

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

#### 1.1 Beschreibung der Rolle: Einsatzleiter

Die Einsatzleiter sind für die strategische Ausrichtung von Taktik und Einsatz verantwortlich. Sie müssen die Ressourcen effektiv und sicher organisieren, um die beste Lösung für einen Zwischenfall zu finden. Der Einsatzleiter arbeitet innerhalb eines klaren Befehlsrahmens, der ihm hilft, einen Notfall zu strukturieren, zu organisieren und zu bewältigen. Die Strategie und der Rahmen müssen in Bezug auf Umfang und Funktionen anpassungsfähig sein, um verschiedenen und neuartigen Notfällen gerecht zu werden und den Einsatz und die Nutzung aller verfügbaren Ressourcen sicher und wirksam zu ermöglichen.

#### 1.2 Kompetenzniveau: Einsatzleiter

Technisches Wissen, das zur Entwicklung von Führungsfähigkeiten und -verhalten zur Untermauerung von Urteilen, Entscheidungen und der Verwaltung verfügbarer Ressourcen sowie zur Interaktion mit anderen Einsatzorganisationen und -stellen geübt wird. Erforderlich ist die Fähigkeit, Informationen zu beschaffen, zu verarbeiten und zu nutzen, manchmal unter komplexen Umständen und unter extremen Stressbedingungen.

#### 1.3 Vorheriges Lernen: Einsatzleiter

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 Einsatzsituationen mit unvorhersehbaren Veränderungen; Überprüfung und Weiterentwicklung der eigenen Leistung und der Leistung anderer.

### 2. Einleitung und Ziele

Die Wasserstoffwirtschaft ist ein Teil unseres Alltags geworden. Mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge sind bereits auf unseren Straßen unterwegs. Mögliche Wasserstoffexplosionen können einen hohen Überdruck erzeugen und somit eine Gefahr für Leben und Eigentum darstellen. Die Sicherheit von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen und der zugehörigen Infrastruktur, einschließlich Garagen, Wartungswerkstätten, Parkplätzen und Tunneln, ist ein Bereich, der Anlass zur Sorge gibt.

In früheren Lektionen haben wir bereits die spezifischen Eigenschaften und Gefahren der verschiedenen Arten von FCH-Anwendungen erörtert. In dieser Lektion geht es um Explosionen, die durch eine chemische Reaktion (d. h. durch Verbrennung) ausgelöst werden,

## Lektion 10: Umgang mit Wasserstoffexplosionen

und um "physikalische Explosionen" (d. h. ohne Verbrennung). Es gibt zwei Arten von "Verbrennungsexplosionen", d. h. Verpuffungen und Detonationen. Es gibt noch weitere Arten von "Explosionen", z. B. "physikalische Explosionen" von Behältern durch Überdruck über dem festgelegten Grenzwert aufgrund von Überfüllung (Behälterverschleppung), als Folge einer Durchlaufreaktion usw. Das Wort "Explosion" ist eher ein Jargon und wir werden es in dieser Lektion, wo immer möglich, vermeiden. Manchmal kann die Verwendung des Begriffs "Explosion" zu Missverständnissen führen. So wird beispielsweise in einigen Normen fälschlicherweise eine so genannte "Explosionsgrenze" [1] eingeführt. Dies geschieht trotz der Tatsache, dass zwischen der für Deflagrationen relevanten "Entflammbarkeitsgrenze" und der "Detonationsgrenze" ein erheblicher Unterschied bestehen kann [1]. In dieser Lektion werden den Einsatzkräften die mit Deflagrationen und Detonationen verbundenen Phänomene mit ihren Hauptmerkmalen und Folgen sowie mögliche Präventions- und Entschärfungsmaßnahmen vorgestellt [1]. Die kosteneffektivste und am weitesten verbreitete Entschärfungstechnik, die entlüftete Deflagration, wird im Detail besprochen.

### 3. Nützliche Terminologie

Die *Zellengröße* ist der Parameter, der die Detonationsempfindlichkeit eines Wasserstoff-Luft-Gemisches charakterisiert [2].

*Deflagration* ist das Phänomen der Ausbreitung der Verbrennungszone mit einer Geschwindigkeit unterhalb der Schallgeschwindigkeit (Unterschall) in ein frisches, unverbranntes Gemisch [1].

Unter *Detonation* versteht man die Ausbreitung der Verbrennungszone mit einer Geschwindigkeit, die höher ist als die Schallgeschwindigkeit (Überschall) in dem nicht umgesetzten Gemisch [1].

Die *Flammengeschwindigkeit* ist die Geschwindigkeit der Flamme in Bezug auf einen festen Beobachter [2].

Der *Überdruck* ist der Druck in der Druckwelle, der über dem atmosphärischen Druck oder dem Druck innerhalb eines Sicherheitsbehälters liegt, der über dem atmosphärischen Druck liegt [3].

### 4. Gasexplosion

Die Gasexplosion ist definiert als ein Prozess, bei dem die Verbrennung einer vorgemischten Gaswolke, d. h. Brennstoff-Luft (Oxidationsmittel), einen schnellen Druckanstieg verursacht. Gasexplosionen können in Prozessanlagen, Lagertanks oder Rohrleitungen, in Gebäuden oder Offshore-Modulen, in offenen Prozessbereichen oder in geschlossenen Räumen auftreten. Wenn wir von einer Gasexplosion als Ereignis sprechen, ist dies ein allgemeinerer Begriff. Es ist dann üblich, die Ereignisse vor und nach dem Gasexplosionsprozess einzubeziehen.

## 5. Verpuffungen und Druckwellen

Die folgenden Faktoren können die Schwere von Verpuffungen beeinflussen:

- Die Zusammensetzung des Wasserstoff-Oxidationsmittel-Gemisches. Wasserstoff-Luft-Gemische in der Nähe der maximalen Brenngeschwindigkeit neigen eher zur Flammenbeschleunigung, was zu einem höheren Überdruck führt.
- Die Gleichmäßigkeit des Wasserstoff-Oxidationsmittel-Gemisches. Ungleichmäßige Gemische haben schwerwiegendere Folgen als gleichmäßige Gemische mit der gleichen Ausgangsmasse an Wasserstoff.
- Die Höhe des Einschlusses (d. h. Wände und Decke).
- Der Grad der Verstopfung (die Wirkung von Hindernissen). Die Verstopfung erhöht die Turbulenz, verbessert die Durchmischung und erhöht die Verbrennungsrate.

## 6. Die Auswirkungen von Druckwellen auf Menschen und Gebäude

Die Druckwellen sind in mehrfacher Hinsicht schädlich. Diese lassen sich in primäre, sekundäre und tertiäre Wirkungen einteilen [4].

- Primäre Auswirkungen:
  - Schädigung des Gehörs
  - Schäden an der Lunge und anderen inneren Organen
- Sekundäre Auswirkungen:
  - Verletzungen durch umherfliegende Trümmer (z. B. Glasscherben)
  - Einsturz von Bauwerken auf Menschen mit schweren Verletzungen oder Todesfolge
- Tertiäre Effekte:
  - Eine Ganzkörperverschiebung einer Person

Es ist nicht nur der Überdruck, der Schaden anrichtet, sondern auch der Impuls, der auf eine Person oder ein Objekt einwirkt, der Ort, an dem sich die Person befindet und die persönliche Ausrüstung, die sie trägt.

Tabelle 1. Die Schwellenwerte der Überdrücke für die Gefährdung von Menschen (im Freien).

Wirkung	Überdruck, kPa
Vorübergehende Schwellenverschiebung [5]: "Unbedenklichkeitsschwelle für den Gefahrenabstand (Evakuierungssperimeter)	1.35

## Lektion 10: Umgang mit Wasserstoffexplosionen

1 % Wahrscheinlichkeit, dass das Trommelfell reißt (als "Verletzungsschwelle" gewählt) [6]	16.5
1 % Wahrscheinlichkeit einer tödlichen Lungenblutung (als Schwellenwert für "tödliche Blutungen" gewählt) [6]	100

Tabelle 2. Die Schwellenwerte des Überdrucks für Gebäudeschäden [6].

Schaden	Überdruck, kPa
Kleinere Schäden am Haus	4.8
Teilabriss des Hauses - es bleibt bewohnbar	6.9
Fast vollständige Zerstörung des Hauses	34.5-48.3

Die oben in den Tabellen 1 und 2 beschriebenen Schadenskriterien für Menschen und Schadenskriterien für Gebäude werden in den nachstehenden Nomogrammen für die Bestimmung der Gefahrenabstände bei einem Bruch von freistehenden und unter Fahrzeugen befindlichen Hochdruck-Wasserstofftanks mit unterschiedlichem Volumen und unterschiedlichem Druck verwendet.

## 7. Wirkung von Splittern und Trümmern

Die meisten Modellierungsansätze befassen sich mit den Auswirkungen von Explosion und Feuer. In vielen Wasserstoffexplosionsszenarien ist jedoch auch die Flugbahn von Splittern oder Trümmern von Bedeutung und in einigen Fällen sogar vorherrschend. Bei Wasserstoffgasexplosionen ist dies typischerweise bei Szenarien der Fall, bei denen ein gewisses Maß an Einschluss oder Umschließung vorhanden ist. Wenn der Verbrennungsprozess von einer Deflagration zu einer Detonation übergeht, kann die Wurfweite von Geschossen oder Trümmern verheerend sein. Beispiele hierfür sind Gasexplosionen in Industrieanlagen, in einer Garage oder einem Parkhaus oder in einem Kernkraftwerk. Diese Szenarien können zu einer großen Gefahr durch Trümmer oder Splittern führen. Bei diesen Szenarien handelt es sich in der Regel um einen Behälterbruch, der zu Geschossen aus Splittern und Trümmern führt. Jede Risikobewertungsmethode für Wasserstoff sollte Modelle für den Austritt von Trümmern oder Splittern enthalten.

Im Allgemeinen sind die Anfangsbedingungen für die Flugbahn durch die Verteilung der Masse der Splitter oder der Trümmer, die Abschussgeschwindigkeit und die Abschussrichtung definiert. Diese Bedingungen werden durch den Versagensprozess und die anschließende Beschleunigung durch die expandierenden Gase bzw. Reaktionsprodukte bestimmt. Damit einher geht eine Druckentlastung durch die zunehmende Entlüftungsfläche zwischen den beschleunigenden Teilen.

Der Zerfall von Gebäuden aus Stahlbeton oder Ziegeln bei einer Gasexplosion im Inneren ist ein komplizierteres Phänomen. Im Falle einer (schwachen) Verpuffung setzt sich die Verbrennung während des Aufbrechens fort, und Trümmer werden ausgeworfen. Die

## Lektion 10: Umgang mit Wasserstoffexplosionen

Kopplung zwischen Druckaufbau, Entlüftung und Abriss bestimmt, welcher Teil der Struktur betroffen ist.

# 8. Mögliche Maßnahmen zur Eindämmung von Explosionen

### Präventionsmaßnahmen [4]:

#### *Passive Maßnahmen:*

- Durchflussbegrenzer zur Minimierung der Wasserstoffmasse, die im Falle einer Leckage an der Bildung eines entflammaren Gemischs beteiligt ist,
- Vermeiden Sie nach Möglichkeit enge Räume,
- Natürliche Belüftung,
- Abwesenheit von Zündquellen.

#### *Aktive Maßnahmen:*

- Aufspüren und Isolieren von Wasserstofflecks.

### Abhilfemaßnahmen [4]:

#### *Passive Maßnahmen:*

- Entlüftung bei Verpuffungen,
- Gefahren- und Sicherheitsabstände,
- Hemmnisse.

#### *Aktive Maßnahmen:*

- Notfallmaßnahmen,
- Erkennung,
- Stromabschaltung.

## 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. Dorofeev, SB (2007). Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32, pp. 2118-2124.

## Lektion 10: Umgang mit Wasserstoffexplosionen

3. NFPA, National Fire Protection Association (2009). Compressed Natural Gas (CNG) Vehicular Fuel Systems Code, 52.
4. HyFacts Project. Chapter DM. Hydrogen deflagrations and detonations. Available from: <http://hyfacts.eu/category/education-training/> [accessed on 04.01.16].
5. Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ and Strehlow, RA (1983). Explosion hazards and evaluation. Elsevier Scientific Publishing Company.
6. Mannan, S (2005). Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 3rd ed., vol. 1. Elsevier Butterworth-Heinemann.