



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

Lektion 8

Zündquellen und Vermeidung von Zündungen

STUFE I

Feuerwehrmann

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen sind auf das Niveau von **Feuerwehrleuten** ausgerichtet.

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

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

Bitte beachten Sie die Einleitung zur 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

Wasserstoff lässt sich leicht entzünden, da er unter den bekannten Brennstoffen die niedrigste Mindestzündenergie (MZE) aufweist. Es ist oft schwierig, die genaue Quelle der Wasserstoffzündung zu ermitteln und den spezifischen Mechanismus zu bestimmen. Dieser Vortrag gibt einen Überblick über Vorfälle und Mechanismen bei der Entzündung von Wasserstoff.

Schlüsselwörter

Mindestzündenergie (MZE), Selbstentzündungstemperatur, Zündquellen, Entzündungsmechanismen

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	6
3. Zündquellen	7
3.1 Zündung durch elektrostatische Entladung	8
3.2 Mechanische Zündung	8
3.3 Entzündung durch eine heiße Oberfläche	9
4. Wasserstoff-Zündmechanismen	10
4.1 Mindestzündenergie (MZE)	11
4.2 Selbstentzündungstemperatur.....	13
4.3 Diffusionszündung	14
5. Spontane Zündung einer plötzlichen Freisetzung	15
5.1 Mechanismus der Diffusionszündung.....	15
6. Verhinderung der Entzündung von Wasserstoff.....	16
6.1 Kontrolle von thermischen und mechanischen Zündquellen	17
Referenzen	19

1. Zielgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Stufe 1: Feuerwehrmann.

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: 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 arbeiten.

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 Standardeinsatzmaßnahmen (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 Werkzeuge zu lösen. Arbeit oder Studium unter Aufsicht mit einer gewissen Selbstständigkeit

2. Einleitung und Ziele

Diese Lektion vermittelt den Einsatzkräften Informationen über die möglichen Quellen der Wasserstoffzündung und die damit verbundenen Mechanismen, einschließlich des Diffusionsmechanismus der Spontanzündung bei einer plötzlichen Freisetzung von Wasserstoff. Es werden die wichtigsten Merkmale im Zusammenhang mit der Zündung von Wasserstoff-Sauerstoff-Gemischen behandelt: Mindestzündenergie, ihre Abhängigkeit von der Wasserstoffkonzentration im Gemisch, Selbstentzündungstemperatur und Wirkung der Triboelektrizität. In dieser Lektion werden auch die Methoden beschrieben, die zur Verhinderung einer Wasserstoffzündung durch sorgfältige Bewertung der Zündmöglichkeiten und Beseitigung von Zündquellen eingesetzt werden.

Am Ende dieses Vortrags wird ein Feuerwehrmann in der Lage sein:

- Erkennen verschiedener Arten von Zündquellen;
- Identifizieren Sie die Mechanismen der Wasserstoffzündung in Abhängigkeit von der Zündquelle;
- Vergleichen Sie die Werte der Mindestzündenergie (MZE) und der Selbstentzündungstemperatur von Wasserstoff mit denen anderer gängiger Brennstoffe;
- Erläutern Sie die Mindestzündenergie in Abhängigkeit vom Wasserstoffgehalt im Gemisch;
- Bewertung der Stufen der Selbstentzündung bei einer plötzlichen Wasserstofffreisetzung;
- Erkennen der Mittel zur Kontrolle von Wasserstoffzündquellen;
- Nennen Sie die wichtigsten Maßnahmen zur Vermeidung der Entzündung von Wasserstoff.

3. Zündquellen

Aufgrund der niedrigen Mindestzündenergie (MZE) von Wasserstoff ist es schwierig, die genaue Quelle der Wasserstoffzündung zu bestimmen. Daher ist es oft schwierig zu unterscheiden, was genau die Entzündung von Wasserstoff auslöst und was der Zündmechanismus war. Die Liste der möglichen Zündquellen ist unten aufgeführt.

Elektrische Quellen:

- Elektrische Funken (z. B. von elektrischen Geräten)
- Statische Entladungen (z. B. in ungeerdeten Partikelfiltern)
- Lichtbogen (Schalter, Elektromotoren, tragbare Telefone, Pager und Funkgeräte).
- Blitzenladung (z. B. Blitzeinschlag in der Nähe des Abluftkamins)
- Elektrische Ladung, die durch den Betrieb von Geräten erzeugt wird (Kompressoren, Generatoren, Fahrzeuge und andere Baumaschinen)
- Elektrische Kurzschlüsse oder andere elektrische Geräte
- Elektrifizierte Partikel

Mechanische Quellen:

- Mechanische Funken (durch schnell schließende Ventile)
- Mechanischer Stoß und/oder Reibung
- Metallfraktur
- Mechanische Vibration und wiederholte Biegung

Wärmequellen:

- Heiße Oberflächen (z. B. Heizgeräte)
- Offene Flammen
- Heiße Düsen
- Auspuffanlagen (z. B. Verbrennungsmotoren und Schornsteine)
- Explosive Ladungen (z. B. Ladungen, die im Bauwesen, bei Feuerwerkskörpern oder pyrotechnischen Vorrichtungen verwendet werden)
- Katalysatoren, Sprengstoffe und reaktive chemische Stoffe
- Schockwellen und/oder Fragmente
- Reflektierte oder wiederholte Schall- und Stoßwellen

Lektion 8: Zündquellen und Zündvermeidung

Andere Quellen:

- Ionisierende Strahlung (Radioaktivität)
- Elektromagnetische Strahlung
- Ultraschall-Strahlung
- Licht (Laser/Blitzlicht)
- Adiabatische Kompression (Druckanstieg)

Es ist allgemein bekannt, dass sich reine Gase unter normalen Bedingungen nicht elektrostatisch aufladen [3], aber dies bezieht sich im Allgemeinen auf niedrige Geschwindigkeiten und Drücke. Wenn Gase bei sehr hohem Druck freigesetzt werden, wird die Strömung schallartig, und die Neigung zur elektrostatischen Aufladung ist nicht bekannt. Es ist bekannt, dass reine Gase dazu neigen, sich nicht aufzuladen, aber es ist bekannt, dass Partikel innerhalb des Gasstroms elektrostatisch aufgeladen werden können [3].

In vielen praktischen Fällen wäre der Entladungsweg wahrscheinlich spiralförmig und nicht geradlinig. Dies würde erfordern, dass der Wasserstoff in Kurven entweicht, was dazu führen könnte, dass Materialien an der Oberfläche des Entladungsweges, z. B. Rohrleitungen, erodiert werden und Partikel bilden, die sich elektrostatisch aufladen könnten [3].

3.1 Zündung durch elektrostatische Entladung

Es gibt drei Hauptarten elektrostatischer Entladungen: Funken-, Bürsten- und Koronaentladung [1]. Eine *Funkenentladung* ist ein einzelner Plasmakanal zwischen einem Leiter mit hohem Potenzial und einem geerdeten Leiter. Eine *Bürstenentladung* ist eine Entladung zwischen einem geladenen Isolator und einem leitenden geerdeten Punkt. Eine *Koronaentladung* ist eine stille, in der Regel kontinuierliche Entladung mit Strom, aber ohne einen Plasmakanal.

Untersuchungen, die vor vielen Jahren an Wasserstoffschloten durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass es bei schönem Wetter nur selten zu einer Entzündung kommt, dafür aber umso häufiger bei Gewitter, Schneeregen, Schneefall und in kalten Frostnächten [1].

3.2 Mechanische Zündung

Zu den wichtigsten Eigenschaften von brennenden Metallteilchen oder Funken, die für ihre Fähigkeit, ein entflammbares Gemisch zu entzünden, relevant sind, gehören:

- Größe
- Material
- Geschwindigkeit
- Temperatur
- Nummer
- Verbrennungsgeschwindigkeit und -zeit

Es gibt Schwellenwerte für den Kontaktdruck und die Relativgeschwindigkeit von Metall auf Metall, die bei Stößen, Reibungen oder Schleifvorgängen zur Funkenbildung führen. Oberhalb

Lektion 8: Zündquellen und Zündvermeidung

dieser Schwellenwerte gehen Metallpartikel aus dem schwächsten der beiden Werkstoffe verloren. Im Allgemeinen werden die Partikel nur erzeugt, wenn die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Oberflächen 1 m/s überschreitet [4].

3.3 Entzündung durch eine heiße Oberfläche

Dieses Phänomen, das bei den meisten brennbaren Gas-Dampf-Luft-Gemischen auftritt, besteht darin, dass die Umgebung eine ausreichend hohe Temperatur aufweist, so dass die Verbrennungswärme nicht an die umgebenden Oberflächen abgegeben werden kann und die Oxidationskettenreaktion fortschreiten kann [3].

4.3 Diffusionszündung

Das Phänomen der Diffusionszündung wurde von Wolanski und Wojcicki [13] berechnet, die nachwiesen, dass eine Zündung erfolgt, wenn Wasserstoff unter hohem Druck in ein mit Luft oder Sauerstoff gefülltes Stoßrohr eingeleitet wird. Sie stellten fest, dass eine Zündung auch dann erreicht werden kann, wenn die Temperatur unter der Selbstzündungstemperatur des Wasserstoffs liegt.

Lektion 8: Zündquellen und Zündvermeidung

- Kontrolle von Wartungstätigkeiten, bei denen Funken/heiße Oberflächen/offene Flammen entstehen können, durch ein Arbeitserlaubnisverfahren.
- Vorkehrungen zur Beherrschung des Risikos von pyrophorem Kesselstein, der in der Regel mit der Bildung von Eisensulfid in der Prozessausrüstung verbunden ist.

6.1 Kontrolle von thermischen und mechanischen Zündquellen

Die Entzündung eines Wasserstoff-Luft-Gemisches kann durch eine heiße Oberfläche verursacht werden. Bei Wasserstoff darf die Temperatur heißer Oberflächen oder heißer Stellen nach den im Rahmen des europäischen Projekts MECHEX durchgeführten Experimenten 585°C nicht überschreiten, auch nicht für wenige mm² (bitte beachten Sie, dass die Selbstentzündungstemperatur von Wasserstoff mit 510 °C noch niedriger ist als oben angegeben).

Eine räumliche Trennung von Zündquellen, wie z. B. Schweißen, Flammen oder Heißenarbeiten, ist vorzuziehen.

Die mechanische Zündung ist im Allgemeinen das Ergebnis einer mechanischen Belastung unter anormalen oder fehlerhaften Bedingungen (d. h. Reiben, Schleifen und Stöße oder eine Kombination dieser Faktoren) und besteht in der Regel aus drei Schritten: Wärmeerzeugung, Wärmeübertragung an die umgebende explosionsfähige Atmosphäre und schließlich die Zündung selbst [15]. Die Beherrschung der mechanischen Zündung erfordert eine sorgfältige Auslegung der Geräte durch eines der folgenden Mittel:

- Begrenzung der Drehgeschwindigkeit,
- Sorgen Sie für einen ausreichenden Abstand zwischen feststehenden und rotierenden Teilen,
- Einrichten von Temperatursensoren.

Die durch den Aufprall erzeugte Energie kann bis zu einigen Joule betragen und reicht aus, um ein Wasserstoff-Luft-Gemisch zu entzünden. Um die Entzündung durch den Aufprall zu vermeiden, ist es notwendig, [15]:

- Verwenden Sie geeignete funkenfreie Werkzeuge,
- Wasserstoff vor jedem Eingriff ausspülen
- Vermeiden Sie den Kontakt zwischen Aluminium und Stahl.

Heiße Arbeiten haben Ähnlichkeiten mit der mechanischen Zündung, aber sie werden nicht durch ein mechanisches Versagen des Prozesses, sondern durch eine menschliche Aktivität erzeugt. Es ist notwendig, jeden daraus resultierenden Unfall/Vorfall zu verhindern [15]:

- Erteilung der "Genehmigung für Heißenarbeiten",

Lektion 8: Zündquellen und Zündvermeidung

- Angemessene Schulung des zuständigen Personals,
- Bereitstellung einer angemessenen Feuerlöschhausrüstung,
- Unterbrechung der Gaszufuhr während des Eingriffs,
- Spülung der Ausrüstung vor dem Eingriff.

Referenzen

1. Astbury, GR and Hawksworth, SJ (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: a review of postulated mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 2178-2185.
2. Moorehouse, J, Williams, A and Maddison TE (1974). An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons. *Combustion and Flame*. Vol. 23, pp. 203-213.
3. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II*. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
4. HyFacts Project. Chapter IM. Hydrogen ignition mechanisms. Prevention and mitigation of ignition. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [accessed on 23.11.20].
5. Bond, J (1991). *Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products*. Oxford: Butterworth Heinemann.
6. Chaineaux, J, Mavrothalassitis, G and Pineau, J (1991). Modelization and validation of the discharge in air of a vessel pressurized by flammable gas. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 134, pp. 104-137.
7. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y and Iwabuchi, H (2005). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations, *Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety*, 8-10 September 2005, Pisa, Paper 120105.
8. Schmidchen, U (2009). Hydrogen safety facts and myths. 3rd International Short Course and Advanced Research Workshop “Progress in Hydrogen Safety”, Belfast, 27th April-1st May 2009, Northern Ireland, UK.
9. ISO/TR 15916 (2004). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
10. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence “Safety of hydrogen as an energy carrier” (NoE HySafe). Available from: www.hysafe.org [accessed on 23.11.20].
11. Baratov, AN, Korolchenko, AY and Kravchuk, GN (Eds.) (1990). *Fire and explosion hazards of substances and materials*. Moscow: Khimia. 496 p., ISBN 5-7245-0603-3 part 1, ISBN 5-7245-0408-1 part 2 (in Russian).

Lektion 8: Zündquellen und Zündvermeidung

12. NASA (1997). Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Technical report NSS 1740.16, Office of safety and mission assurance, Washington. Available from: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> was cancelled on July 25 2005 [accessed 13.05.14].
13. Wolanski, P and Wojcicki, S (1972). Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere. Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 14, pp. 1217-1223.
14. Health and Safety Executive (2012). Hazardous Area Classification and Control of Ignition Sources. Available from: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm> [accessed 23.11.20].
15. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
16. Reider, R, Otway, HJ and Knight HT (1965). An unconfined large volume hydrogen/air explosion. Pyrodynamics. Vol. 2, pp. 249-261.