



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

Lektion 6

Schadenskriterien für Personen und Sachen

STUFE III

Einsatzleiter/in

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

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

Diese Lektion ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann/frau, Gruppenführer/in (Kommantant), Einsatzleiter/in und Experte/in. 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.

Danksagung

Das Projekt wurde vom Gemeinsamen Unternehmen "Fuel Cells and Hydrogen 2" (JU) im Rahmen der Finanzhilfevereinbarung 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

Dieser Vortrag liefert den Einsatzkräften wertvolle Informationen über die Auswirkungen von Wasserstofflecks, Bränden und Explosionen auf die Gesundheit und die Umwelt des Menschen. Außerdem werden die durch Wasserstoffbrände und Überdruckereignisse verursachten Schäden an Bauwerken und Geräten behandelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Auswirkungen von Wärme und Überdruck auf den Menschen, die natürliche und die gebaute Umwelt. Die Kenntnis der Schadenskriterien ist sehr wichtig, um den Zustand am Unfallort zu bewerten und die richtigen Entscheidungen in Bezug auf Interventionsmaßnahmen zu treffen.

Schlüsselwörter

Wasserstoffunfall, Wärmestrahlung, Überdruck, Schadenskriterien, persönliche Schutzausrüstung

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
Inhaltsübersicht.....	4
1. Zielpublikum.....	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Einsatzleiter/in.....	5
1.2 Kompetenzniveau: Einsatzleiter/in	5
1.3 Vorheriges Lernen: Einsatzleiter/in	5
2. Einleitung und Ziele.....	5
2. Wichtigste Definitionen.....	7
3. Gesundheitsgefahren durch Wasserstofffreisetzungen.....	8
3.1 Gasförmiger Wasserstoff.....	8
3.2 Verflüssigter Wasserstoff.....	12
4. Schädliche Auswirkungen der Wasserstoffverbrennung auf den Menschen	13
4.1 Einfluss der Lufttemperatur	13
4.2 Wirkung des direkten Kontakts mit Wasserstoffflammen	14
4.3 Auswirkung des Wärmestrahlungsflusses von Wasserstoffbränden.....	15
4.4 Wirkung von Überdruck auf den Menschen	15
5. Auswirkungen von Überdruck auf Strukturen und Ausrüstung.....	16
6. Zusammenfassung der Akzeptanzkriterien für Leben und Eigentum.....	17
7. Kennzeichnung von Wasserstoffsystemen	17
8. Persönliche Schutzausrüstung	21
9. Auswirkungen auf die Umwelt.....	22
Danksagung	23
Referenzen.....	23

1. Zielpublikum

Die in dieser Vorlesung enthaltenen Informationen richten sich an die Stufe des Einsatzleiters. Es gibt auch Vorlesungen für die Stufen I, II und IV: Feuerwehrmann, Gruppenführer und Experte.

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

1.1 Beschreibung der Rolle: Einsatzleiter/in

Die Einsatzleiter/in 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/in

Technisches Wissen, das zur Entwicklung von Führungsfähigkeiten geübt und Verhalten zur Untermauerung von Urteilen, Entscheidungen und der Verwaltung verfügbarer Ressourcen sowie zur Interaktion mit anderen Einsatzorganisationen und -stellen. 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/in

EQR 5 Umfassendes, spezialisiertes, faktisches und theoretisches Wissen in einem Arbeits- oder Studienbereich 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 Arbeits- oder Studienkontexten mit unvorhersehbaren Veränderungen; Überprüfung und Weiterentwicklung der eigenen Leistung und der Leistung anderer.

2. Einleitung und Ziele

Das Hauptanliegen der Wasserstoffsicherheit ist der Schutz von Leben und Eigentum. Daher ist es wichtig, die Kriterien für Betreiber, Nutzer, Mitglieder der Öffentlichkeit sowie für Einsatzkräfte festzulegen, die von den Folgen eines Zwischenfalls oder Unfalls in einem FCH-System (fuel cell and hydrogen; Brennstoffzelle und Wasserstoff) oder einer FCH-Infrastruktur betroffen sein können. Die Akzeptanzkriterien für Kunden und Mitarbeiter, die mit dem Betrieb, der Inspektion und der Wartung von FCH-Anlagen und -Infrastrukturen befasst sind, werden ähnlich sein, während für die allgemeine Öffentlichkeit, die sich zufällig in der Nähe eines Zwischenfalls/Unfalls befindet, ein eher konservativer Ansatz gewählt werden sollte. Nach der britischen Norm BS 7974 (2004) werden Feuerwehrleute als eine eigene Kategorie von Betroffenen betrachtet. Sie sind zum Zeitpunkt des Vorfalls/Unfalls nicht in der FCH-

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Einrichtung anwesend und treffen oft dann am Unfallort ein, wenn die Bedingungen am gefährlichsten sind und sie ihren beruflichen Pflichten nachkommen müssen. Sie sind durch den möglichen Einsturz der Gebäude/Strukturen und die Folgen der Druckwelle gefährdet. Da sie mit spezieller persönlicher Schutzausrüstung (PSA) ausgestattet sind, können sie auch höheren Wärmestrahlungen und Temperaturen sowie erstickenden und giftigen Atmosphären standhalten. Darüber hinaus ist der Standort einer Person innerhalb der FCH-Infrastruktur zum Zeitpunkt eines Zwischenfalls/Unfalls sehr wichtig. Die Auswirkungen eines Wasserstoffunfalls können nämlich unmittelbar sein und wirken sich je nach Nähe zur Schadensquelle unterschiedlich auf die Menschen aus. Personen, die sich in geschlossenen Räumen aufhalten, sind eher von der Druckwelle betroffen als Personen, die sich im Freien aufhalten.

Es liegt außerhalb des Rahmens des HyResponder-Projekts, harmonisierte Schadenskriterien oder Schwellenwerte zur Charakterisierung der potenziellen Auswirkungen gefährlicher Phänomene bereitzustellen. Alle interessierten Akteure sollten die für ihr Land geltenden Normen nutzen.

Am Ende dieses Vortrags werden die Teilnehmer in der Lage sein:

- die wichtigsten Gesundheitsgefahren im Zusammenhang mit der Freisetzung von gasförmigem und verflüssigtem Wasserstoff ohne Zündquelle, physikalischen Explosionen (Bersten von Druckbehältern), Bränden, Verpuffungen und Detonationen zu beschreiben;
- die schädlichen Auswirkungen der Freisetzung von nicht entzündetem Wasserstoff in geschlossenen Räumen zu definieren:
 - den Geräuschpegel;
 - Wirkung der Wasserstofftemperatur;
 - Wirkung des Überdrucks bei Druckspitzenphänomenen.
- die schädlichen Auswirkungen der Wasserstoffverbrennung auf den Menschen zu definieren:
 - Auswirkung der Temperatur der Verbrennungsatmosphäre;
 - Exposition gegenüber Wärmestrahlung;
 - Wirkung von Überdruck.
- die Grundsätze und die Anwendung der Rahmenkriterien für die Schädigung von Mensch und Umwelt sowie der Schadenskriterien für Bauwerke und Ausrüstungen zu kennen:
 - Lufttemperatur;
 - thermische Dosis;
 - Wärmestrom;
 - Überdruck, etc.
- die gefährliche und die tödliche Dosis, 50% (LD50) der thermischen Dosis anzugeben;

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

- zwischen direkten und indirekten schädlichen Auswirkungen von Überdruck auf den Menschen zu unterscheiden;
- insbesondere die durch Wasserstoffbrände/ Druckwellen verursachten Schäden an Bauwerken, Geräten und der Umwelt auf die Höhe des Wärmestrahlungsflusses und des Überdrucks in Beziehung zu setzen;
- Kennzeichnungssystemen für die Speicherung von gasförmigem und verflüssigtem Wasserstoff bei Wasserstoff- und Brennstoffzellenanwendungen zu erkennen;
- die persönliche Schutzausrüstung aufzuführen, die nicht nur von den Einsatzkräften, sondern auch von den Mitarbeitern einer FCH-Einrichtung verwendet werden sollte;
- die Auswirkungen von Wasserstoff auf die Umwelt zu beschreiben.

2. Wichtigste Definitionen

Es ist wichtig, dass die Einsatzkräfte in der Lage sind, die Auswirkungen von Wasserstoffzwischenfällen/-unfällen auf die Lebenssicherheit und die Schadensbegrenzung zu bewerten. Es gibt verschiedene Methoden, um die Folgen eines Zwischenfalls/Unfalls zu definieren und abzuschätzen, je nach Schweregrad, Exposition, Dauer und dem betrachteten Ziel (d. h. Öffentlichkeit, Insassen, Strukturen, Gebäude, Ausrüstung usw.). Es gibt einige nützliche Definitionen, die in den aktuellen und zukünftigen Lektionen verwendet werden.

Akzeptanzkriterien sind die Vorgaben, anhand derer die sichere Auslegung einer FCH-Einrichtung/Infrastruktur bewertet wird [1].

Entmündigung ist ein Zustand, in dem Menschen nicht angemessen funktionieren und nicht in der Lage sind, unhaltbaren Zuständen zu entkommen [2].

Insassen sind Personen, die sich innerhalb der Grenzen einer FCH-Einrichtung/Infrastruktur aufhalten, einschließlich des mit dem Betrieb und der Wartung befassten Personals sowie der Kunden/Besucher [1].

Ein *sicherer Ort* ist ein vorher festgelegter Ort innerhalb oder außerhalb einer FCH-Einrichtung/Infrastruktur, an dem Personen nicht unmittelbar durch die Auswirkungen einer Wasserstofffreisetzung, eines Brandes oder einer Explosion gefährdet sind [1].

Öffentlichkeit sind Personen, die sich außerhalb der Grenzen einer FCH-Einrichtung/Infrastruktur aufhalten.

Ein *sensibler Bereich* ist eine Einrichtung, Infrastruktur oder Ausrüstung, in der sich Bestände gefährlicher Stoffe befinden, die zu einer Schadensquelle werden können, wenn sie von einem Wasserstoffzwischenfall/Unfall betroffen sind [1].

Die *Überlebensfähigkeit* ist die maximale Exposition, die mit einer vernachlässigbaren statistischen Wahrscheinlichkeit des Todes/Schadens und ohne Beeinträchtigung der Fähigkeit einer Person, zu entkommen, aufgenommen werden kann [1].

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Die *Vertretbarkeit* ist die maximale Gefährdung durch einen Wasserstoffzwischenfall/Unfall, die toleriert werden kann, ohne dass die Sicherheitsziele verletzt werden [1].

Der *Schwellenwert* ist die maximale Intensität oder Dosis für eine bestimmte Gefahr, die einer bestimmten physiologischen (für Menschen) oder strukturellen (für Strukturen und Geräte) Reaktion entspricht [1].

3. Gesundheitsgefahren durch Wasserstofffreisetzungen

Wasserstoffgas ist leichter als Luft, weshalb es schnell aufsteigt und sich bei ungewollten Freisetzungen in offener Umgebung schnell in der Luft verdünnen kann. Bei einer unbeabsichtigten Freisetzung in geschlossenen Räumen kann es Menschen durch Erstickung schädigen. Außerdem besteht bei der Freisetzung von Wasserstoff in geschlossenen Räumen die Gefahr von Explosionen. Wasserstoff-Luft-Gemische sind aufgrund des weiten Entflammbarkeitsbereichs von 4 bis 75 Vol.-% Wasserstoff entzündlich. Wenn Wasserstoff an der Luft freigesetzt wird und eine Zündquelle vorhanden ist, verbrennt er unter Bildung von Wasser und Wärme. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich Wasserstoff nach seiner Freisetzung entzündet, ist sehr hoch, da er eine niedrige Mindestzündenergie aufweist: Selbst eine Entladung statischer Elektrizität reicht aus, um Wasserstoff zu entzünden. Für die Einsatzkräfte ist die Verwendung von Schutzkleidung zur Vermeidung von Entladungen statischer Elektrizität nicht erforderlich, da statische Entladungen in seltenen Fällen ausreichen, um Wasserstoff zu entzünden. Weitere Einzelheiten finden Sie in Lektion 8 - Zündquellen und Zündvermeidung. Bei Bränden ist die Wasserstoffflamme bei Tageslicht fast unsichtbar und kann eine Temperatur von bis zu 2000 °C erreichen. Obwohl die Wasserstoffflamme im Vergleich zu einer Kohlenwasserstoffflamme nur wenig strahlt, besteht für die Einsatzkräfte die Gefahr, in die Flamme zu laufen. Die Ausbreitung der Flamme durch das Wasserstoff-Luft-Gemisch ist im Vergleich zu CNG (komprimiertes Erdgas, compressed natural gas) und LPG (Flüssiggas, liquefied petroleum gas) viel schneller, so dass die Gefahr des Übergangs zur Detonation nicht ausgeschlossen werden kann. Was den flüssigen Wasserstoff betrifft, so sind die Hauptrisiken mit den extrem niedrigen Temperaturen und der möglichen Verdampfung verbunden (1 Liter flüssiger Wasserstoff verdampft bei NTP zu 870 Litern Gas), was ebenfalls zur Erstickung führen kann, wenn LH₂ (liquid hydrogen) in Innenräumen freigesetzt wird.

3.1 Gasförmiger Wasserstoff

Wasserstoffgas ist ein geruchs-, farb- und geschmacksneutrales Gas, das von den menschlichen Sinnen nicht wahrgenommen werden kann. Die Verwendung von Geruchsstoffen (z. B. Mercaptanen) in Lagerbehältern ist nicht möglich, da sie die Brennstoffzellen vergiften können. Wasserstoff ist kein krebserregender Stoff. Es ist nicht zu erwarten, dass Wasserstoff

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Mutagenität¹, Teratogenität², Embryotoxizität³ oder Reproduktionstoxizität verursacht. Es gibt keine Hinweise auf schädliche Auswirkungen auf Haut oder Augen, die einer Wasserstoffatmosphäre ausgesetzt sind. Allerdings können Hochdruck-Wasserstoffdüsen die nackte Haut verletzen [3]. Wasserstoff kann nicht verschluckt werden. Das Einatmen von Wasserstoff kann jedoch zur Bildung eines entzündlichen Gemischs in der Lunge des Menschen führen.

Ähnlich wie bei anderen Gasen führt ein Anstieg der Wasserstoffkonzentration zu einer Verringerung des Sauerstoffgehalts in der Luft, was wiederum zu *Erstickungsgefahr* führen kann. Wasserstoff wird als einfaches *Erstickungsmittel eingestuft*; es gibt keinen Grenzwert (TLV) [4]. Hohe Wasserstoffkonzentrationen in der Luft führen in vollständig oder teilweise geschlossenen Räumen zur Bildung von *Sauerstoffmangelatmosphären*. Bei Personen, die solchen Atmosphären ausgesetzt sind bzw. diese einatmen, können die folgenden Symptome auftreten: Kopfschmerzen, Schwindel, Schläfrigkeit, Bewusstlosigkeit, Übelkeit, Erbrechen, Beeinträchtigung aller Sinne, usw. Die Haut der betroffenen Personen kann sich blau verfärben, und unter bestimmten Umständen kann es zum Tod kommen. Wenn Wasserstoff eingeatmet wird und die oben genannten Symptome auftreten, sollte die Person an die frische Luft gebracht werden; wenn die Atmung erschwert ist, sollte Sauerstoff zugeführt werden, und wenn die Person nicht atmet, sollte sie künstlich beatmet werden.

Tabelle 1 zeigt die physiologischen Auswirkungen der Sauerstoffverarmung. Wasserstoff kann durch Verdünnung des Luftsauerstoffs auf Konzentrationen unterhalb des sicheren Niveaus, d. h. unter 19 Volumenprozent, zur Erstickung führen. Sauerstoffkonzentrationen unter 19,5 Volumenprozent sind für den Menschen biologisch inaktiv, und es werden in der Regel keine Auswirkungen des Sauerstoffmangels beobachtet. Bei Sauerstoffkonzentrationen unter 12 Vol.-% kann es ohne vorherige Warnsymptome zu sofortiger Bewusstlosigkeit kommen.

Tabelle 1. Menschliche Reaktion auf Sauerstoffmangel [4]

H-Konzentration ₂ % vol.	O-Konzentration in % vol. ₂	Physiologische Wirkung
0-9	21-19	Keine spezifischen Symptome
9-28	15-19	Verminderte Fähigkeit, Aufgaben auszuführen, kann bei Personen mit Herz-, Lungen- oder Blutkreislaufproblemen frühe Symptome hervorrufen
28-42	12-15	Tiefere Atmung, schnellerer Puls, schlechte Koordination
42-52	10-12	Schwindelgefühl, schlechtes Urteilsvermögen, leicht blaue Lippen

¹ Die Herbeiführung dauerhafter, übertragbarer Veränderungen in der Menge oder Struktur des genetischen Materials von Zellen oder Organismen.

² Geburtsfehler durch eine toxische Wirkung auf einen Embryo oder Fötus.

³ Toxische Auswirkungen einer Substanz, die die Plazentaschranke überwindet, auf den Embryo.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

52-62	8-10	Übelkeit, Erbrechen, Bewusstlosigkeit, aschfahles Gesicht, Ohnmacht, geistiges Versagen, mit einer Toleranzzeit von 5 min
62-71	6-8	Bewusstlosigkeit in 3 Minuten, Tod in 8 Minuten. 50 % Tod und 50 % Erholung mit Behandlung in 6 Minuten, 100 % Erholung mit Behandlung in 4-5 Minuten
71-86	3-6	Koma in 40 s, Krämpfe, Atemstillstand, dann Tod
86-100	0-3	Tod innerhalb von 45 s

Die Systemauslegung sollte jede Möglichkeit der Erstickung des in geschlossenen Räumen arbeitenden Personals verhindern [4]. Das System muss so ausgelegt sein, dass das Personal den Raum nicht betreten kann, es sei denn, die Verfahren für das Betreten von geschlossenen Räumen werden strikt eingehalten. Es wird empfohlen, vor dem Betreten eines Unfallbereichs die Sauerstoffkonzentration zu überprüfen (bei gefährlichen Konzentrationen gibt es keine Geruchswarnung) und ein umluftunabhängiges Atemschutzgerät für Einsatzkräfte zu tragen. Die Wasserstoffkonzentration muss mit einem geeigneten Detektor gemessen werden [5]. Dieser Punkt ist besonders hervorzuheben, es müssen geeignete Wasserstoffgasmessgeräte verwendet werden.

Der Höchstwert der Wasserstoffkonzentration in der Luft für einen Insassen einer FCH-Einrichtung liegt bei etwa 40 Vol.-%, da dies einem Wert entspricht, bei dem eine physiologische Wirkung die menschliche Gesundheit und die Fähigkeit zur Evakuierung stark beeinträchtigen kann. Der tolerierbare Wert für die Öffentlichkeit liegt bei etwa 9 Vol.-%; bei einem höheren Level kann es zu gesundheitlichen Problemen kommen. Bei Einsatzkräften, die mit PSA (persönliche Schutzausrüstung) wie Atemschutzgeräten ausgerüstet sind, liegt der tolerierbare Wert des Wasserstoffgehalts in der Luft höher und kann bis zu 100 Vol-% erreichen. Die Anwesenheit von Respondern in einer entflammaren Wasserstoff-Luft-Atmosphäre ist jedoch keine empfohlene Praxis während des Einsatzes.

Eine weitere Art von Gefahr, die von den Einsatzkräften berücksichtigt werden sollte, ist die *akustische Gefahr*, die mit der Freisetzung von Wasserstoff unter hohem Druck verbunden ist. Die gesundheitlichen Auswirkungen verschiedener Lärmpegel sind in Abbildung 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Lärmpegeln über 85-90 dB Gehörschäden auftreten können und ein Gehörschutz empfohlen wird. Die Schmerzgrenze liegt bei 130 dB; bei Lärmpegeln von über 140 dB ist ein plötzlicher Hörverlust sehr wahrscheinlich. Bitte beachten Sie, dass ein Knallgeräusch zu einem *akustischen Trauma* führen kann - eine plötzliche Veränderung des Gehörs aufgrund einer einmaligen Exposition gegenüber einem plötzlichen Knall oder Schall [7].

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

level	Noise source	Health effects
140dB	Jet plane take off, firecracker, gun shot	Sudden damage to hearing
130dB	Pain threshold exceeded	
120dB	Ambulance siren, pneumatic drill, rock concert	
110dB	Night clubs, disco	
100dB	Motor cycle at 50km/h	
90dB	Heavy goods vehicle at 50km/h	
85dB	Hearing protection recommended in industry	Hearing loss, tinnitus
75dB		Cardiovascular effects
70dB		Sleep disturbances
65dB		Stress effects
60dB		Annoyance
55dB	Desirable outdoor level	
50dB	Normal conversation level	
40dB	Quiet suburb	
30dB	Soft whisper	
20dB	Normal conversation level	

Source: Nopher, a European Commission concerted action to reduce the health effects of noise pollution.
<http://www.ucl.ac.uk/noiseandhealth/EC%20Brochure1.pdf>

Abbildung 1. Gesundheitliche Auswirkungen von Lärmpegeln [6]

Wie in Abbildung 2 dargestellt, können selbst kleine Wasserstofflecks genügend Ultraschallgeräusche erzeugen, um in den meisten industriellen Umgebungen entdeckt zu werden [7]. Während der *hörbare Schallpegel* in Industrieanlagen in der Regel zwischen 60 und 110 dB liegt, beträgt der *Ultraschallpegel* (Frequenzbereich 25-100 kHz) in Bereichen mit hohem Lärmpegel, in denen rotierende Maschinen wie Kompressoren und Turbinen installiert sind, zwischen 68 und 78 dB und übersteigt in Bereichen mit geringem Lärmpegel selten 60 dB. Folglich können Ultraschall-Gaslecksuchgeräte Wasserstofflecks aufspüren, ohne durch Hintergrundgeräusche beeinträchtigt zu werden. Und da die Geräte auf die Freisetzung von Gas und nicht auf das Gas selbst reagieren, können sie schnell Alarm schlagen, oft innerhalb von Millisekunden. Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, ist der Ultraschall-Schalldruckpegel (sound pressure level, SPL) nahezu umgekehrt proportional zur Entfernung von der Geräuschquelle (d. h. dem Wasserstoffleck).

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

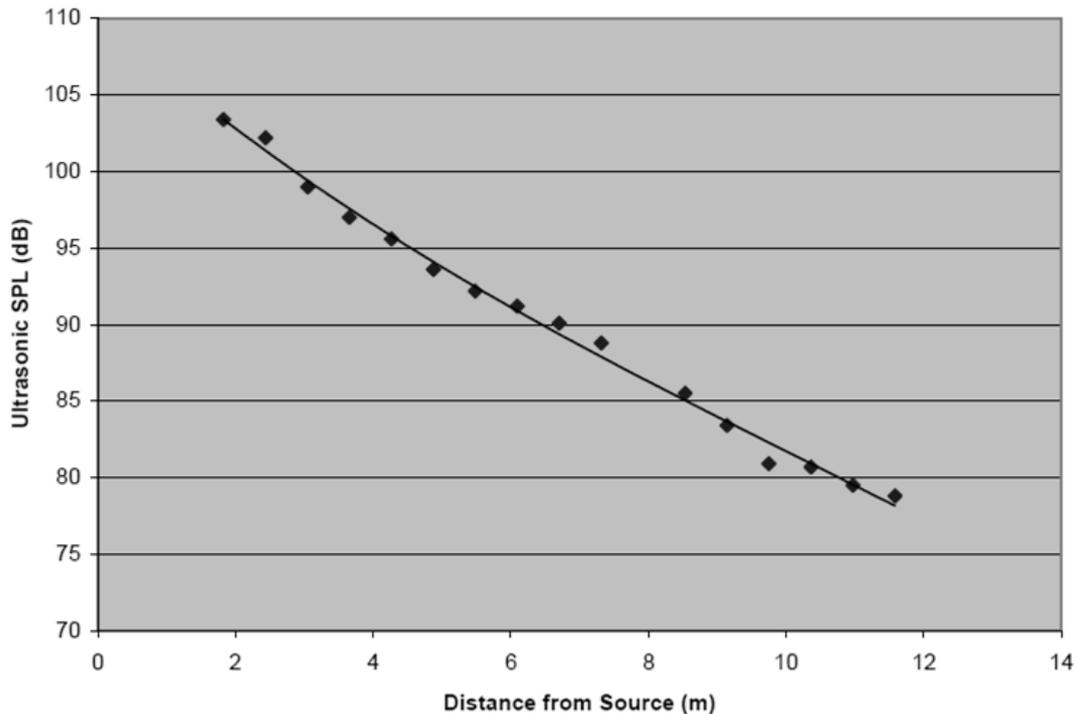


Abbildung 2. Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Abstand von der Wasserstoffleckquelle (Leckdurchmesser: 1 mm; Druck: 5.515 kPa; Leckrate: 0,003 kg/s) [7]

Geräte, die mit einem Druck von 200 bar beaufschlagt werden und mit einem Lyra-Auslass mit einem Öffnungsdurchmesser von 4 mm ausgestattet sind, erzeugen einen Lärm von 130 dB. Bei den von Air Liquide durchgeführten Tests an einem Rohr mit einem Durchmesser von 5 mm, das unter einem Druck von 700 bar stand, lag der Geräuschpegel zwischen 100 und 140 dB. Wasserstofflecks, die einen Schalldruck von 50-60 dB erzeugen, stellen keine Gefahr für Personen in der Umgebung dar, es sei denn, sie befinden sich in einem geschlossenen Raum [8].

3.2 Verflüssigter Wasserstoff

Verflüssigter Wasserstoff wird aufgrund seines niedrigen Siedepunkts (-253 C) bei extrem niedrigen Temperaturen gelagert/verwendet. Die Gesundheitsgefahren, die mit der Freisetzung von verflüssigtem Wasserstoff verbunden sind, werden im Folgenden beschrieben.

- Der Kontakt mit flüssigem Wasserstoff oder seine Spritzer auf der Haut oder in den Augen können schwere Kälteverbrennungen durch *Erfrierungen oder Unterkühlung* verursachen.
- Verbrennungen *durch Kälte* können auch durch den Kontakt ungeschützter Körperteile mit kalten Flüssigkeiten oder kalten Oberflächen entstehen.
- Das Einatmen kalter Wasserstoffdämpfe kann *Atembeschwerden* verursachen und zum *Erstickungstod* führen.
- Direkter physischer Kontakt mit LH₂, kalten Dämpfen oder kalten Geräten kann zu schweren *Gewebeschäden* führen. Bei kurzzeitigem Kontakt mit einer kleinen Menge

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

der Flüssigkeit ist die Gefahr einer Verbrennung nicht so groß, da sich ein Schutzfilm aus verdampfendem gasförmigem Wasserstoff bilden kann. Die Gefahr des Erfrierens besteht, wenn große Mengen verschüttet werden und die Exposition groß ist⁴.

- Das Personal darf keine kalten Metallteile berühren und muss *Schutzkleidung* tragen. Außerdem müssen sie die betroffene Stelle mit einer losen Abdeckung schützen.
- Wenn die Körpertemperatur auf 27 °C oder weniger sinkt, sind *Herzfehlfunktionen* wahrscheinlich, und der Tod kann eintreten, wenn die Körpertemperatur auf weniger als 15 °C sinkt [5].
- Eine *Erstickung* ist auch möglich, wenn verflüssigter Wasserstoff freigesetzt wird und in Innenräumen verdampft.

4. Schädliche Auswirkungen der Wasserstoffverbrennung auf den Menschen

Das Einatmen von Verbrennungsprodukten herkömmlicher Brennstoffe ist eine der Hauptursachen für Verletzungen und eine der Hauptfolgen eines Brandes. Bei Wasserstoff wird sie als weniger schwerwiegend angesehen, da das einzige Verbrennungsprodukt Wasserdampf ist (ungiftig, nicht giftig). Im Gegensatz dazu kann Kohlenmonoxid CO bei Konzentrationen knapp über 400 ppm (parts per million) tödlich sein [10]. Bei Sekundärbränden können jedoch Rauch oder andere Verbrennungsprodukte entstehen, die eine Gesundheitsgefahr darstellen.

4.1 Einfluss der Lufttemperatur

Die Flammentemperatur eines stöchiometrischen Wasserstoff-Luft-Gemisches beträgt etwa 2.403 K [11]. Bei einem Wasserstoffbrand wird die Umgebungsluft stark aufgeheizt, was Menschen in der Nähe beeinträchtigen kann. Der direkte Kontakt mit brennendem Wasserstoff oder den heißen Nachbrenngasen, die bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen, führt zu schweren *thermischen Verbrennungen*. Ein Anstieg der Lufttemperatur kann zu Atemnot oder Verbrennungen der Atemwege führen. Hohe Temperaturen können auch zu einem Kollaps führen.

Tabelle 2. Einfluss der Lufttemperatur auf den Menschen [12]

Temperatur der Luft, C	Physiologische Reaktion
70	Kein fatales Problem in einem geschlossenen Raum, außer einer unbequemen Situation
115	Schmerzschwelle (Expositionszeit länger als 5 Minuten)
127	Schwierigkeiten beim Atmen
149	Atmung über den Mund ist schwierig, Temperaturgrenze für Flucht

⁴ Wirkung von flüssigem Stickstoff: <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291>

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

160	Schnelle, unerträgliche Schmerzen bei trockener Haut
182	Irreversible Verletzungen in 30 Sekunden
203	Die Toleranzzeit der Atmungssysteme beträgt weniger als vier Minuten bei feuchter Haut
309	Verbrennungen dritten Grades bei 20 Sekunden Exposition, verursacht Verbrennungen am Kehlkopf nach einigen Minuten, ein Entkommen ist unmöglich

Nach dem Bericht der DNV (einer norwegischen Forschungsorganisation) aus dem Jahr 2001 [12] werden die Auswirkungen des Anstiegs der Lufttemperatur (bei scheinbar ruhender Atmosphäre) wie folgt klassifiziert

- Wenn die Temperatur unter 70 °C liegt, gibt es in einem geschlossenen Raum keine Todesfälle, außer einem unangenehmen Gefühl.
- Wenn die Temperatur zwischen 70 und 150 Grad Celsius liegt, sind die Auswirkungen auf den Menschen vor allem durch Atemnot gekennzeichnet.
- Wenn die Temperatur über 150 C steigt, kommt es in weniger als 5 Minuten zu Verbrennungen der Haut.

Die Akzeptanzkriterien für die Temperatur der heißen Luft umfassen: 70 C - tolerierbarer Wert für die Öffentlichkeit; 115 C - tolerierbarer Wert für Insassen, die bei einer Expositionszeit von 5 Minuten fliehen können; 149 C - maximale Lufttemperatur, bei der die Insassen nicht fliehen können. Es wird davon ausgegangen, dass die Einsatzkräfte über eine angemessene PSA wie Atemschutzgeräte verfügen, die ihre Atemwege vor den Auswirkungen hoher Temperaturen schützen können. Es wurde festgestellt, dass Atemschutzanzüge für kurze Zeit einen Schutz vor bis zu 1093 C heißer Luft bieten können [15].

4.2 Wirkung des direkten Kontakts mit Wasserstoffflammen

Die Auswirkungen einer Wasserstoffflamme auf den Menschen sind ähnlich wie bei den Flammen anderer gängiger Brennstoffe. Direkter Kontakt mit brennendem Wasserstoff oder heißen Gasen, die nach der Verbrennung von Wasserstoff entstehen, führt zu schweren Verbrennungen [11]. In einer von der HSE (Health and Safety Executive) [16] durchgeführten Studie über Kohlenwasserstoffbrände wurden verschiedene Arten von Bränden und ihre Auswirkungen auf die Bevölkerung in Abhängigkeit von ihrer Intensität, Dauer und Größe ermittelt (Tabelle 3).

Tabelle 3. Merkmale der Haupttypen von Wasserstoffbränden [16]

Art des Brandes	Dauer des Brandes	Größe des Feuers	Intensität des Feuers	Auswirkungen auf die Menschen
Feuerball	Sehr kurz	Groß	Sehr hoch	Strahlung, kaum eine Chance zu entkommen
Strohfeuer	Sehr kurz	Groß	Mittel	Verschlucken: Todesopfer in der Regel innerhalb der Brandgrenze, kaum Fluchtmöglichkeiten
Pool Feuer	Kurz	Mittel	Niedrig oder mittel	Strahlung, Verschlucken, gute Chance zu entkommen

Strahlenfeuer	Mittel oder Lang	Mittel	Hoch	Strahlung, direkter Flammenkontakt, gute Fluchtchancen
---------------	------------------	--------	------	--

4.3 Auswirkung des Wärmestrahlungsflusses von Wasserstoffbränden

Eine Wasserstoffflamme strahlt im Vergleich zu einer Kohlenwasserstoffflamme deutlich weniger Wärme ab und ist bei hellem Tageslicht praktisch unsichtbar. Die maximale Wellenlänge ihrer Emission liegt bei etwa 311 nm, also im ultravioletten (UV) Bereich des Strahlungsspektrums [11]. Das bedeutet, dass Personen, die sich in der Nähe einer Wasserstoffflamme aufhalten, diese möglicherweise erst wahrnehmen, wenn sie mit ihr in Kontakt kommen [11]. Ohne geeignete Detektionsgeräte ist der erste Hinweis auf eine kleine Flamme wahrscheinlich ein "zischendes" Geräusch des durch eine Öffnung entweichenden Gases und vielleicht auch "Wärmewellen" [11].

Bitte beachten Sie, dass eine Wasserstoffflamme ein Minimum an Infrarotstrahlung und praktisch keine sichtbare Strahlung abgibt.

Für Personen, die nicht in direktem Kontakt mit den Wasserstoffflammen stehen, besteht die Möglichkeit, dass sie über einen längeren Zeitraum hohen Strahlungswärmeflüssen ausgesetzt sind, die zu Verbrennungen ersten, zweiten oder dritten Grades führen können.

4.4 Wirkung von Überdruck auf den Menschen

Die Höhe des durch die Verbrennung von Wasserstoff verursachten Überdrucks ist sehr unterschiedlich und hängt vom jeweiligen Unfallszenario ab. Am wenigsten gefährlich ist ein „flash fire“, der auftritt, wenn Wasserstoff bei einer diffusiven (nicht vorgemischten) Verbrennung schnell verbraucht wird, während er freigesetzt wird (z. B. aus einer geborstenen Rohrleitung, einem gebrochenen Ventil oder durch eine defekte Dichtung). Ähnlich wie bei konventionellen Bränden entstehen dabei keine großen Druckwellen, und der Überdruck ist in der Regel sehr gering.

Dampfexplosionen (vapour cloud explosions, VCE) treten auf, wenn sich freigesetzter Wasserstoff mit Luft vermischt und eine brennbare Wolke bildet, bevor diese gezündet wird. „Die durch eine Dampfexplosion erzeugten Überdruckeffekte können sehr unterschiedlich sein und werden durch die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung bestimmt. In den meisten Fällen kommt es zu einer *Deflagration* mit einer Flammenfront im Unterschallbereich. Bei einer Detonation kommt es zu einer Flammenfront im Überschallbereich, was zu erheblichen Überdrücken führt“ [19].

Die Höhe des erzeugten Überdrucks kann von Szenario zu Szenario stark variieren und von vielen Faktoren beeinflusst werden, wie z. B. dem Grad des Einschlusses, der Turbulenz, dem Vorhandensein von Hindernissen, dem Volumen und der Konzentration des brennbaren Gemischs, der Geschwindigkeit der Flammenausbreitung usw.

Die Freisetzung von Wasserstoff in geschlossenen Räumen birgt ein größeres Explosionspotenzial als die Freisetzung im Freien. Die verzögerte Zündung eines

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Wasserstoffstrahls oder die Entzündung einer brennbaren Wolke führt zu einem Überdruck, der Personen- und Sachschäden verursachen kann. Im schlimmsten Fall, d. h. beim katastrophalen Bruch eines Wasserstoffspeichers, kommt es zu einer *Druckwelle* und einem *Feuerball*.

Die Auswirkungen von Überdruckereignissen auf Menschen können direkt und indirekt sein. Die wichtigste direkte Auswirkung ist der erhebliche und plötzliche Druckanstieg, der Schäden an druckempfindlichen Organen wie Lunge und Ohren verursachen kann. Zu den indirekten Auswirkungen gehören der Aufprall von Projektilen und Trümmern in Verbindung mit der Beschädigung von Geräten, die Verschiebung von Gegenständen, der Einsturz von Gebäuden usw. Große Explosionen können eine Person über eine gewisse Entfernung bewegen [19]. Da die Zugkräfte stark genug sind, um selbst große Objekte zu verschieben, kann auch eine Person zum Projektil werden.

Eine der wichtigsten indirekten Auswirkungen von Überdruck sind fliegende Fragmente (auch Raketen oder Geschosse genannt). Das Ausmaß der Verletzungen hängt von der Größe und dem Gewicht der Fragmente, der Aufprallgeschwindigkeit und dem Ort des Aufpralls auf einen menschlichen Körper ab [28]. Die Geschwindigkeit der Raketenbeschleunigung ist der Hauptfaktor, der Verletzungen verursacht. Die Wahrscheinlichkeit einer Penetrationswunde steigt mit zunehmender Geschwindigkeit, insbesondere bei kleinen Flugkörpern wie Glasfragmenten.

5. Auswirkungen von Überdruck auf Strukturen und Ausrüstung

Einige Beispiele für Unfälle, an denen Wasserstoffsysteme beteiligt waren und bei denen es zu strukturellen Schäden und Todesfällen kam, sind:

- Explosion eines Wasserstofftanks (15 Tonnen) in einer Chemiefabrik, 1953. Nagoya, Japan. 16 Menschen wurden getötet und 230 schwer verletzt. Für weitere Einzelheiten folgen Sie bitte dem Link: <https://www.youtube.com/watch?v=eGAfBi6KyMw>
- Wasserstoffbrand und -explosion in einem großen petrochemischen Komplex. 1984; Polysar Ltd, Sarnia, Kanada. Freisetzung von etwa 30 kg Wasserstoffgas in eine Kompressorhalle durch einen geborstenen Flansch, der mit 4800 kPa arbeitet. 2 Personen wurden getötet und 2 verletzt. Umfangreiche größere Strukturschäden wurden im Nahbereich beobachtet; Glas- und kleinere Strukturschäden - bis zu 1 km.
- Wasserstoffexplosion im überkritischen 585-MW-Kohleblock 5 des Kraftwerks Muskingum River, 2007. Ohio, USA. Die Explosion ereignete sich während einer routinemäßigen Lieferung von Wasserstoff, als eine Entlastungsvorrichtung versagte; der Inhalt des Wasserstofftanks trat aus und entzündete sich durch eine unbekannte Quelle. 1 Person wurde getötet und 10 verletzt, mehrere Gebäude wurden erheblich beschädigt.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Für weitere Einzelheiten folgen Sie dem Link: <http://www.powermag.com/lessons-learned-from-a-hydrogen-explosion/>

6. Zusammenfassung der Akzeptanzkriterien für Leben und Eigentum

In Tabelle 4 sind die bereits erörterten Schwellenwerte (d. h. Akzeptanzkriterien für Lebensgefahr und Sachschäden) zusammengefasst. Sie sollten als Richtwerte und nicht als absolute Zahlenwerte verwendet werden.

Tabelle 4. Werte für die Definition von Akzeptanzkriterien für Lebenssicherheit und Sachschäden

Standort	Gefahr für das Leben	Schwellenwert	Einsatzkraft	Insasse	Mitglied der Öffentlichkeit
Drinne und Draußen	Wasserstoffkonzentration, Vol. %	Erträglich	9	28	9
		Maximum	-	40	-
	Temperatur der Luft, C	Erträglich	149	115	70
		Maximum	-	149	-
	Direkter Strahlungswärmestrom, kW/m ²	Erträglich	5	2.5	1.5
		Maximum	-	6	-
	Direkter Überdruck, kPa	Erträglich	8	21	8
		Maximum	-	34	-
	Indirekter Überdruck - Geschosse aus Fenstern, kPa	Erträglich	1	1	1
		Maximum	-	10	-
Gefährdung von Immobilien		Schwellenwert	Werte		
Strahlungswärmestrom, kW/m²		Leichte Schäden	3		
		Mäßige Schäden	10		
		Empfindliches Gebiet	10		
		Kollabieren	16-200		
		Überdruck, kPa		Leichte Schäden	6
Mäßige Schäden	15				
Empfindliches Gebiet	20				
Kollabieren	35				

7. Kennzeichnung von Wasserstoffsystemen

Die Piktogramme für den kommerziellen Transport von Wasserstoff sind in [Abbildung 3](#) dargestellt, wobei "1049" für gasförmigen Wasserstoff und "1966" für flüssigen Wasserstoff steht [36].

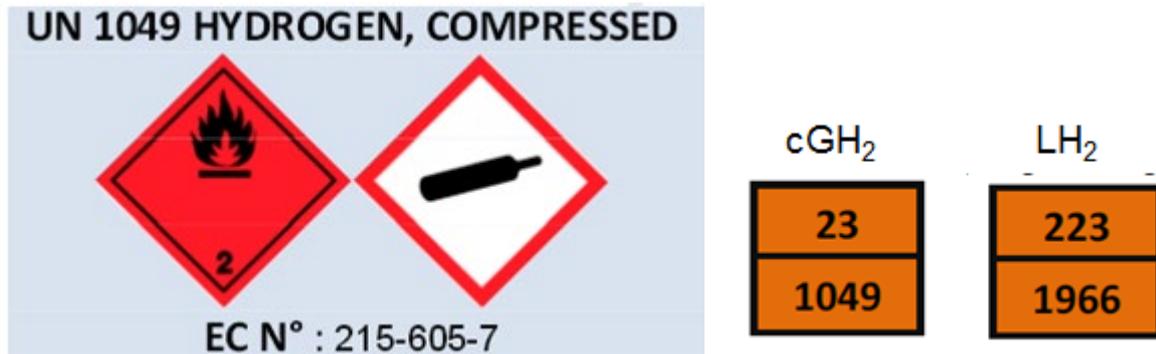


Abbildung 3. Beispiele für Piktogramme, die für den Transport von Wasserstoff verwendet werden.

Für BZ-Fahrzeuge empfiehlt die EU-Verordnung Nr. 406/2010 die Verwendung von grünen Rauten in weißen Rahmen mit der Aufschrift "H₂ GAS" oder "LIQUID H₂" in weißen Buchstaben [37]. Die einheitliche Beschilderung in der EU wurde von der CTIF (International Associate of Fire and Rescue Services) Commission for Extrication & New Technology [38] initiiert. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass es sich zwar um einen Leitfaden handelt, dieser jedoch nicht rechtsverbindlich ist und die Einhaltung freiwillig ist. ISO 17840-4: Antriebsenergiekennzeichnung definiert die Kennzeichnungen und die entsprechenden Farben zur Angabe des Kraftstoffs und/oder der Energie, die für den Antrieb eines Straßenfahrzeugs verwendet werden, insbesondere für den Fall neuer Fahrzeugtechnologien und/oder Energiequellen, einschließlich Hybridantriebe (siehe Abbildung 8). Die Kommunikation der Antriebsenergie und der damit verbundenen Gefahren erfolgt auf logische und modulare Weise, um das Verständnis zu erleichtern. Dieses Dokument gilt für Personenkraftwagen, Busse, Reisebusse, leichte und schwere Nutzfahrzeuge gemäß ISO 3833. Dieses Dokument gilt nicht für Kraftstoffe, die Teil der LKW-Ladung sind. Die Verwendung des Kennzeichens schließt das Rettungsblatt (ISO 17840-1 und ISO 17840-2 und den Leitfaden für Notfallmaßnahmen ISO 17840-3) ein, ist aber nicht darauf beschränkt.

Die wichtigsten Schritte bei der Entwicklung von Symbolen für die formale Gefahrenerkennung sind in den [Abbildungen 4](#) und [5](#) dargestellt. Diese Farben werden auch in den Rettungsinformationen und zur Einfärbung von Fahrzeugkomponenten (Rettungsblätter) verwendet.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

GREY	DIESEL
RED	GASOLINE
GREEN	GAS
WHITE	CRYOGEN LNG
BLUE	HYDROGEN
ORANGE	HIGH VOLTAGE

SYMBOLS

- 1) FIRST ENERGY SOURCE:    CNG LNG LPG
- 2) SECOND ENERGY SOURCE:    
- 3) DENSITY COMPARED TO AIR:   
- 4) STORED AGREGATE STATE:   



Abbildung 4. Vom CTIF vorgeschlagene Farben und Symbole für die Entwicklung von standardisierten Zeichen

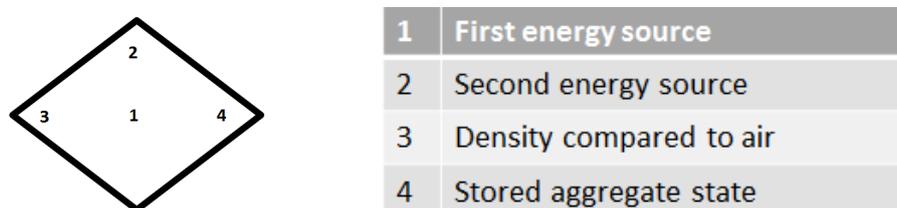


Abbildung 5. Eine vom CTIF vorgeschlagene Rautenform zur Identifizierung von Fahrzeuggefahren [38].

Abbildung 6 zeigt die neueste Version eines Etiketts für ein BZ-Fahrzeug, auf dem zwei Hauptenergieträger angegeben sind: Wasserstoff (in der Mitte) und Strom in der oberen Ecke. Das Symbol in der linken Ecke zeigt an, dass die erste Energiequelle (d.h. Wasserstoff) leichter als Luft ist; das Symbol in der rechten Ecke zeigt an, dass es sich um komprimiertes Gas

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

handelt. Die ISO 17840-4 liefert den Einsatzkräften wertvolle Informationen über die Gefahren, die weithin sichtbar sind.

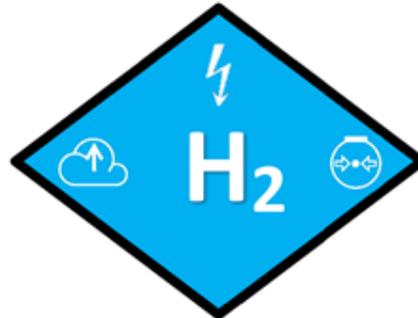


Abbildung 6. Ein vom CTIF entwickeltes Symbol für ein mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff betriebenes BZ-Fahrzeug [38]

Die Beispiele der vom CTIF vorgeschlagenen Symbole für andere Fahrzeugtypen, traditionelle und Hybridfahrzeuge, sind in [Abbildung 7](#) dargestellt.

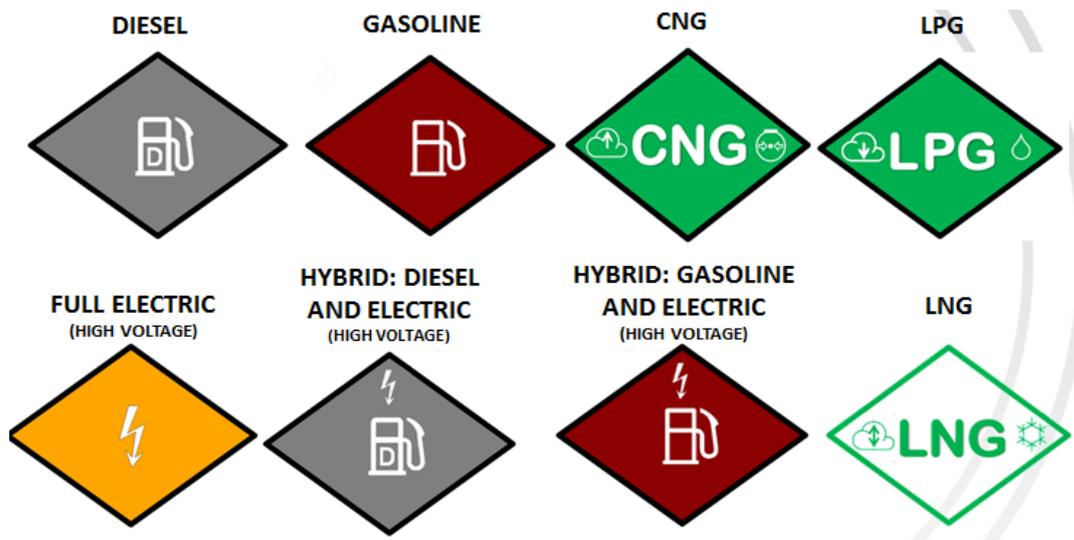


Abbildung 7. Vom CTIF entwickelte Symbole für verschiedene Arten von Fahrzeugkraftstoffen/-energien [38]



Abbildung 8. In den USA verwendete formale Methoden zur Identifizierung [36].

Bitte beachten Sie, dass die Einsatzkräfte in den USA auf die NFPA verwiesen werden, die die Verwendung von "FORMAL" und "INFORMAL" Methoden zur Fahrzeugidentifizierung

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

vorschreibt [36]. Eine formale Kennzeichnung sind die *Aufkleber* und Grafiken auf vielen Fahrzeugen und Bussen. Sie enthalten "FCEV", "FC", Abkürzungen der Begriffe "Fuel Cell" oder "Hydrogen Fuel Cell". Das wird jedoch nicht der Fall sein, je näher wir der Kommerzialisierung kommen. Der Honda FCX Clarity, der in Südkalifornien an Autofahrer vermietet wird, hat zum Beispiel keine Aufkleber. Allerdings trägt er wie jedes andere Fahrzeug neben der Marke und dem Modell die *Fahrzeugplakette* (Abbildung 9). Dies entspricht der internationalen SAE-Norm [36].

8. Persönliche Schutzausrüstung

Im Hinblick auf die Leistungsanforderungen an PSA für die Brandbekämpfung sind zwei wichtige EU-Normen zu nennen. Die (NF) EN 469:2006-02 [39] enthält Anforderungen an Schutzkleidung für Feuerwehrleute, und die (NF) EN 136: 1998 [40] - die für Atemschutzgeräte.

Das Personal, das in einer Wasserstoffanlage oder einem Wasserstoffsystem arbeitet, kann die möglichen Folgen einer Gefahr durch die Verwendung geeigneter Schutzausrüstung verringern. Zu den Bedingungen, bei denen das Personal geschützt werden sollte, gehören die Exposition gegenüber kryogenen Temperaturen, Flammentemperaturen, Wärmestrahlung einer Wasserstoffflamme und sauerstoffarme Atmosphären aus Wasserstoff oder inerten Spülgasen wie Stickstoff und Helium. Die Art der Arbeit bestimmt, welche Art von PSA verwendet werden sollte. Einige allgemeine Leitlinien für PSA wurden in der ISO 15196 [11] festgelegt. Diese Richtlinien enthalten keine PSA, die bei anderen Tätigkeiten wie Arbeiten an elektrischen Schaltkreisen oder Reinigungs- und Dekontaminationsarbeiten zu berücksichtigen ist [11]. Erforderliche oder vorgeschriebene Teile der PSA müssen auf der Grundlage der Bedingungen vor Ort ausgewählt werden.

- Gegebenenfalls sollte ein Augenschutz getragen werden (z. B. ein vollständiger Gesichtsschutz beim Anschließen und Trennen von Leitungen oder Bauteilen oder eine Schutzbrille bei der Handhabung von LH₂).
- Bei der Handhabung von Gegenständen, die mit LH₂ oder kaltem GH₂ in Berührung kommen, sollten gut isolierte Handschuhe getragen werden. Die Handschuhe sollten locker sitzen, sich leicht ausziehen lassen und keine großen Stulpen haben.
- Es sollten lange Hosen, vorzugsweise ohne Manschetten, getragen werden, wobei die Beine außen an den Stiefeln oder Arbeitsschuhen bleiben sollten.
- Es sollten geschlossene Schuhe getragen werden (offene oder poröse Schuhe sollten nicht getragen werden).
- Es sollte Kleidung aus normaler Baumwolle, flammhemmender Baumwolle oder antistatischem Material getragen werden. Vermeiden Sie das Tragen von Kleidung aus Nylon oder anderen synthetischen Stoffen, Seide oder Wolle, da diese Materialien statische Aufladungen erzeugen können, die entflammbare Gemische entzünden können.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Synthetisches Material (Kleidung) kann schmelzen und am Fleisch haften, was zu größeren Verbrennungsschäden führen kann. Kleidung, die mit Wasserstoff besprüht oder bespritzt wurde, sollte ausgezogen werden, bis sie vollständig frei von Wasserstoffgas ist.

- Stulpenhandschuhe, enge Kleidung oder Kleidung, die Flüssigkeit am Körper hält oder einschließt (Taschen), sollten vermieden werden.
- Gehörschutz sollte getragen werden, wenn die Wasserstoffanlage oder das Wasserstoffsystem Geräte enthält, die laute Geräusche erzeugen.
- Schutzhelme sollten getragen werden, wenn in der Wasserstoffanlage oder im Wasserstoffsystem die Gefahr von herabfallenden Gegenständen besteht.
- Bei Arbeiten in geschlossenen Räumen, die eine sauerstoffarme Atmosphäre aufweisen können, sollte ein umluftunabhängiges Atemschutzgerät getragen werden.
- Tragbare Wasserstoff- und Feuerdetektoren sollten verwendet werden, um vor Wasserstofflecks und Bränden zu warnen.
- Wärmebildkameras und unbemannte Schlauch- oder Monitorrohre sollten von den Feuerwehrleuten eingesetzt werden.
- Das Personal sollte sich erden, bevor es ein Werkzeug an einem Wasserstoffsystem berührt oder benutzt, wenn Wasserstoff in dem Bereich vermutet wird.

9. Auswirkungen auf die Umwelt

Wasserstoff verunreinigt weder das Grundwasser (unter normalen atmosphärischen Bedingungen ist er ein Gas), noch trägt eine Freisetzung von Wasserstoff zur Luftverschmutzung bei. Wasserstoff findet sich in der Erdatmosphäre in einer Konzentration von 0,5 ppm (parts per million) vom Boden bis in 60 km Höhe [1]. Zu den von Schultz [41] beschriebenen Quellen von Wasserstoffemissionen gehören:

- Unvollständige Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse (40%),
- Atmosphärische petrochemische Oxidation von Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (50%),
- Emissionen aus Vulkanen, Ozeanen und stickstoffbindenden Leguminosen (10 %).

75 % der Wasserstoffemissionen werden durch trockene Ablagerung auf dem Boden aus der Atmosphäre entfernt, während die restlichen 25 % durch Oxidation in der Atmosphäre entfernt werden [41].

Bei der Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff entstehen keine "Abgase" oder "Rauch". Ein BZ-Fahrzeug hat keine Auspuffemissionen [42].

Danksagung

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

Referenzen

1. Saffers, JB (2010). Grundsätze der Wasserstoffsicherheitstechnik. Dissertation. Universität von Ulster.
2. NFPA (2009). Life Safety Code.
3. Hammer, W. (1989). Occupational Safety Management and Engineering, 4. thAuflage, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989, ISBN 0-13-629379-4, Kapitel 19.
4. NASA (1997). Sicherheitsstandard für Wasserstoff und Wasserstoffsysteme. Richtlinien für die Konstruktion von Wasserstoffsystemen, die Materialauswahl, den Betrieb, die Lagerung und den Transport. Technischer Bericht NSS 1740.16, Office of safety and mission assurance, Washington.
5. Molkov, V. (2012). Grundlagen der Wasserstoffsicherheitstechnik, Teil I und Teil II. Verfügbar unter: www.bookboon.com, kostenloser Download E-Book
6. Prasher, D. (2000). Verringerung der gesundheitlichen Auswirkungen von Lärmbelastung (NOPHER): Ein Arbeitsplan der Europäischen Kommission für eine konzertierte Aktion. Noise Health, Ausgabe 2, S. 79-84. Verfügbar unter: <http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2000/2/8/79/31748> [Zugriff am 09.11.20].
7. Wasserstoffdetektion in Ö Raffinerien. A Gassonic. Ein Unternehmen von General Monitors.
8. NIO Note D'Information Operationnelle (2013). Intervention sur les installations d'hydrogène et Les risques lies. Auf Französisch und auf Englisch. Verfügbar unter: [http://pnrs.ensosp.fr/Plateformes/Operationnel/Actualites/LA-NOTE-D-INFORMATION-OPERATIONNELLE-N.I.O.-SUR-LE-RISQUE-HYDROGENE-GENESE-INTERET/\(mode\)/full/\(page\)/14](http://pnrs.ensosp.fr/Plateformes/Operationnel/Actualites/LA-NOTE-D-INFORMATION-OPERATIONNELLE-N.I.O.-SUR-LE-RISQUE-HYDROGENE-GENESE-INTERET/(mode)/full/(page)/14) Download unter: http://pnrs.ensosp.fr/content/download/32685/550103/file/ENSOSP-PNRS_LA%20NIO%20SUR%20LE%20RISQUE%20HYDROGENE.pdf [Zugriff am 25.11.20].
9. Friedrich, A. et al. (2012). Zündung und Wärmestrahlung von kryogenen Wasserstoffdüsen. International Journal of Hydrogen Energy. Vol.31, pp.17589-17598.
10. Drysdale, D. (1985). Eine Einführung in die Branddynamik. John Wiley and Sons, Chichester, S. 146
11. ISO/TR 15916 (2004). Grundlegende Überlegungen zur Sicherheit von Wasserstoffsystemen. Internationale Organisation für Normung. ISO Technisches Komitee 197 Wasserstofftechnologien. Internationale Organisation für Normung, Genf.
12. DNV Technica (2001). Menschliche Widerstandsfähigkeit gegen thermische Wirkungen, Explosionswirkungen, toxische Wirkungen und Beeinträchtigung der Sicht. DNV Technica, Scandpower A/S, Det Norske Veritas, Oslo, Norwegen.
13. BSI British Standards Institution (2004). Veröffentlichtes Dokument PD 7974-6:2004. Die Anwendung von Grundsätzen der Brandschutztechnik auf die Brandschutzplanung

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

- von Gebäuden - Teil 6: Menschliche Faktoren: Lebensrettende Strategien - Evakuierung, Verhalten und Zustand der Insassen (Teilsystem 6).
14. BSI British Standards Institution (1997). Britische Norm 7899:1997. Verhaltenskodex für die Bewertung der Gefährdung von Leben und Gesundheit durch Feuer. Leitfaden für Methoden zur Quantifizierung von Gefahren für Leben und Gesundheit und zur Schätzung der Zeit bis zur Arbeitsunfähigkeit und zum Tod bei Bränden.
 15. National Fire Protection Association NFPA, Recommended practice for Responding to Hazardous Materials Incidents (1997).
 16. Rew, P. (1997) LD50-Äquivalent für die Auswirkungen von Wärmestrahlung auf den Menschen, in: Suffolk, Health and Safety Executive (HSE) Books.
 17. Bull, JP (1971). Revidierte Analyse der Sterblichkeit aufgrund von Verbrennungen. THE LANCET, Vol. 298, Issue 7734: pp. 1133-1134.
 18. Houf, WG und Schefer, RW (2007). Vorhersage von Strahlungswärmeströmen und Entflammbarkeithüllen bei unbeabsichtigter Freisetzung von Wasserstoff. Internationale Zeitschrift für Wasserstoffenergie. Vol. 32, pp. 136-151.
 19. LaChance, J., Tchouvelev, A. und Engebo, A. (2011). Entwicklung einheitlicher Schadenskriterien zur Verwendung in der quantitativen Risikoanalyse der Wasserstoffinfrastruktur. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36 pp. 2381-2388.
 20. O'Sullivan, S. und Jagger, S. (2004) Human vulnerability to thermal radiation offshore, in: S. Jagger(Ed.), Health&Safety Laboratory,Buxton.
 21. Chang, Y et al. (2008). The Study of Flame Engulfment Protection of Firefighter's Clothing, J. HanaokaTextile, Vol. 15, 345-349.
 22. Eisenberg, NA, et al. (1975). Vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills, Final Report SA/A-015 245, US Coast Guard.
 23. Tsao, CK und Perry, WW (1979). Modifikationen des Vulnerabilitätsmodells: ein Simulationssystem zur Bewertung von Schäden infolge von Meeresverschmutzungen. Bericht ADA 075 231 US Coast Guard.
 24. Lees, FP (1994). Die Bewertung größerer Gefahren: ein Modell für tödliche Verbrennungsunfälle. Transaktionen des Instituts für Chemieingenieure. Bd. 72 (Teil B), S. 127-134.
 25. Methoden zur Bestimmung von möglichen Schäden. In: CPR 16E. Die niederländische Organisation für angewandte wissenschaftliche Forschung; 1989.
 26. NATO (1993). Feldhandbuch, Unterstützung des Gesundheitsdienstes in einer nuklearen, biologischen und chemischen Umgebung. Fm 8-10-7 Headquarters, Department of Army, Washington DC.
 27. Health and Safety Executive (2006). Indikative Anfälligkeit des Menschen gegenüber gefährlichen Stoffen im Offshore-Bereich zur Anwendung bei der Risikobewertung von schweren Unfällen. SPC/Tech/OSD/30.
 28. Okabayashi, K, Hirashima, H, Nonaka, T, Takeno, K, Chitose, K und Hashiguchi, K (2007). Einführung einer Technologie zur Bewertung der Wasserstoffsicherheit. Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technische Rundschau. Vol. 44(1), S. 1-3.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

29. Lees, FP (2004). Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 3rd Edition - Hazard Identification, Assessment and Control. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
30. Scilly, NF und High, WG (1986). The blast effects of explosions. Proceedings of the 5th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 39-1-39-15.
31. Baker, WE et al. (1983). Explosionsgefahren und Bewertung. Elsevier Scientific Publishing Company.
32. Mannan, S. (2005). Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 3. Aufl., Bd. 1. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
33. Molkov, V. und Kashkarov, S. (2015). Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 40, pp. 12581-12603.
34. Stephens, MM (1970). Minimierung der Schäden an Raffinerien durch nukleare Angriffe. Natur- und andere Katastrophen. Büro für Öl und Gas. Department of Interior.
35. Mercx, WPM, Weerheijm, J, Verhagen, TLA (1991). Einige Überlegungen zu den Schadenskriterien und Sicherheitsabständen bei industriellen Explosionen. 11th Symposium on New Directions in Process Safety - Hazards. 124, S. 255-275.
36. US DoE, US Department of Energy (2008). Wasserstoff-Sicherheitstraining für Ersthelfer. Verfügbar unter: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [Zugriff am 11.11.20].
37. EU Nr. 406/2010, Verordnung der Kommission vom 26. April 2010 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 79/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen. Amtsblatt der Europäischen Union. Bd. 53, 18. Mai 2010. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [Zugriff am 09.11.20].
38. Esbroeck, T. und Vollmacher, K. (2015). Identifizierung der ISO-Antriebsenergie. Commission for Extrication and New Technologies. Unveröffentlicht.
39. (NF) EN 469:2006-02. Europäische Norm. Schutzkleidung für Feuerwehren. Leistungsanforderungen an Schutzkleidung für die Feuerwehr.
40. (NF) EN 136: 1998. Europäische Norm. Atemschutzgeräte. Vollgesichtsmasken. Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung.
41. Schultz, MG, Markt, F, Pilegaard, K (2004). Wasserstoff und Umwelt. RisØ Energy Report, Roskilde, RisØ National Laboratory. P.58-62
42. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. Verfügbar unter: <http://cafcp.org/> [Zugriff am 09.11.20].
43. Seveso-Dokumente. Leitlinien zu Anwendbarkeit, Bewertung und Rechtsdokumenten für den Nachweis der Übereinstimmung von Industriegasanlagen mit der/den Seveso-Richtlinie(n). Doc 60/15, Überarbeitung von Doc 60/04. Europäischer Industriegaseverband AISBL.
44. Umgang mit Vorfällen im Zusammenhang mit Pipelines, FÖD Inneres. Generaldirektion für zivile Sicherheit. Juni 2009 - Version 2.2.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Anhang 1. Französischer Leitfaden zu den thermischen Auswirkungen der Wasserstoffverbrennung [8].

Scenario of a pipework leak	Tank pressure (bar)	Immediate combustion (flaming leak)			Delayed combustion (fire-ball)		
		Long duration thermal effects (kW/m ²)			Short-term thermal effects		
		3 kW/m ²	5 kW/m ²	8 kW/m ²	SEI ¹⁴	SEL ¹⁵	SELS ¹⁵
		The distances are in m			The distances are in m		
Hose from an articulated trailer	200	7.2	7.2	7.2	7	6.4	6.4
0.1 mm		0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4
0.2 mm		0.5	0.4	0.4	0.9	0.8	0.8
4 mm		11	9	8	17.6	16	16
0.1 mm	525	0.4	0.3	0.3	0.8	0.7	0.7
0.2 mm		0.7	0.6	0.6	1.5	1.3	1.3
2.3 mm		9	7.9	7	17	15	15
4 mm		17	15	13	29	26	26
5.16 mm		22	19	17	37	34	34
0.1 mm	450	0.2	0.2	0.2	0.7	0.6	0.6
0.2 mm		0.3	0.3	0.3	1.5	1.2	1.2
4 mm		16	14	12	27	24	24
5.16 mm		21	18	16	35	31	31
0.1 mm	700	0.2	0.2	0.2	0.8	0.8	0.8
0.2 mm		0.8	0.4	0.4	1.72	1.5	1.5
2.3 mm		10	9	8	19	18	18
4 mm		19	17	15	33	30	30

Anmerkung: SEI - Schwelle für irreversible Wirkungen; SEL - Schwelle für tödliche Wirkungen; SELS - signifikante tödliche Wirkung [8].

Anhang 2. Referenzwerte in Verbindung mit dem Schwellenwert für Überdruckwirkungen [8].

Level of overpressure	20 mbar	50 mbar	140 mbar	200 mbar	300 mbar
Effects on structures	Threshold for significant destruction of windows	Threshold for slight damage to structures	Threshold for serious damage to structures	Threshold for domino effects	Threshold for very serious damage to structures
Effects on man	Threshold for indirect effects by breakage of windows on man	Threshold for irreversible effects defined by significant danger to human life	Threshold for lethal effects defined by grave danger to human life	Threshold for lethal effects defined by very grave danger to human life	