



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

Lektion 6

Schadenskriterien für Personen und Sachen

STUFE II

Gruppenführer/in

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die Ebene des/der **Gruppenführer/in (Kommandant/in)**.

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

Diese Lektion ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufe I - IV: Feuerwehrmann/frau, Gruppenführer/in (Kommandant), 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. Obwohl es nicht Ziel dieses Vortrags ist, den Einsatzkräften absolute Schwellenwerte zu vermitteln, sollten sie sich der Akzeptanzkriterien für die Öffentlichkeit, die Betreiber, die Nutzer einer FCH-Einrichtung und sich selbst bewusst sein. In diesem Vortrag werden die Einsatzkräfte auch mit dem Kennzeichnungssystem vertraut gemacht. Einige Anforderungen an die persönliche Schutzausrüstung werden ebenfalls angesprochen.

Schlüsselwörter

Wasserstoffunfall, Wärmestrahlung, Überdruck, Schadenskriterien, persönliche Schutzausrüstung

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
Inhaltsübersicht.....	4
1. Zielpublikum	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Gruppenführer/in	5
1.2 Kompetenzstufe: Gruppenführer/in.....	5
1.3 Frühere Erfahrungen: Gruppenführer/in	5
2. Einleitung und Ziele.....	5
3. Wichtigste Definitionen.....	7
4. Gesundheitsgefahren durch Wasserstofffreisetzungen	8
4.1 Gasförmiger Wasserstoff.....	8
4.2 Verflüssigter Wasserstoff.....	10
5. Schädliche Auswirkungen der Wasserstoffverbrennung auf den Menschen	11
5.1 Einfluss der Lufttemperatur	11
5.2 Wirkung des direkten Kontakts mit Wasserstoffflammen	12
5.3 Auswirkung des Wärmestrahlungsflusses von Wasserstoffbränden.....	13
5.4 Wirkung von Überdruck auf den Menschen	13
6. Auswirkungen von Überdruck auf Strukturen und Ausrüstung	14
7. Kennzeichnung von Wasserstoffsystemen	15
8. Persönliche Schutzausrüstung	17
9. Auswirkungen auf die Umwelt.....	19
Danksagung	19
Referenzen.....	20

1. Zielpublikum

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

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

1.1 Beschreibung der Rolle: Gruppenführer/in

Gruppenführer/in sind für den taktischen Einsatz von Feuerwehrteams verantwortlich, die unter bestimmten Anweisungen auf der Grundlage von Standardarbeitsanweisungen und vor Ort gesammelten Informationen bestimmte Aufgaben übernehmen, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen, z. B. Suchen und Retten, Löschen und Eindämmen von Bränden, Freilegen und Bergen.

1.2 Kompetenzstufe: Gruppenführer/in

Eine taktische Entscheidungsfähigkeit, die auf Wissen, Fertigkeiten und beruht, mit Verhalten um die Entscheidungsfindung unter schnell wechselnden Bedingungen zu unterstützen. Gestützt auf operatives Lernen und die Fähigkeit, Standardarbeitsanweisungen zu interpretieren und erforderlichenfalls zu ändern, zuvor erworbene und am Einsatzort erhaltene Informationen zu nutzen, wird vom Besatzungskommandanten erwartet, dass er taktische Operationen entwickelt und leitet, nachdem er den Notfall bewertet, Prioritäten festgelegt und erforderliche zusätzliche Unterstützung angefordert hat.

1.3 Frühere Erfahrungen: Gruppenführer/in

EQR 4 Theoretisches und faktisches Wissen in einem breiten Kontext innerhalb eines Arbeits- oder Studienbereichs. Eine Reihe von kognitiven und praktischen Fertigkeiten, die erforderlich sind, um Lösungen für spezifische Probleme in einem Arbeits- oder Studienbereich zu finden. Selbstmanagement im Rahmen von Arbeits- oder Studienkontexten, die in der Regel vorhersehbar sind, sich aber ändern können; Beaufsichtigung der Routinearbeit anderer, wobei eine gewisse Verantwortung für die Bewertung und Verbesserung von Arbeits- oder Studienaktivitäten übernommen wird.

2. Einleitung und Ziele

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

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

von Betroffenen betrachtet. Sie sind zum Zeitpunkt des Vorfalles/Unfalls nicht in der FCH-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 verwenden.

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.

3. 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 Vorlesungen 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 *Tenabilität* 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].

4. Gesundheitsgefahren durch Wasserstofffreisetzungen

Wasserstoffgas ist leichter als Luft, weshalb es schnell aufsteigt und sich bei einer ungewollten Freisetzung 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 es nicht erforderlich, Schutzkleidung zu tragen, um die Entladung statischer Elektrizität zu vermeiden, da die Entladung statischer Elektrizität in seltenen Fällen ausreicht, um Wasserstoff zu entzünden. Im Brandfall ist die Wasserstoffflamme bei Tageslicht fast unsichtbar und ihre Temperatur kann 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.

4.1 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 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

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

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.

Die Systemauslegung sollte jede Möglichkeit der Erstickung von Personal, das in geschlossenen Räumen arbeitet, 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 prüfen (bei gefährlichen Konzentrationen ist keine Geruchswarnung möglich) 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

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Gehörs aufgrund einer einmaligen Exposition gegenüber einem plötzlichen Knall oder Schall [7].

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]

4.2 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 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.

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

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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

5. 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). Bei Sekundärbränden können jedoch Rauch oder andere Verbrennungsprodukte entstehen, die eine Gesundheitsgefahr darstellen.

5.1 Einfluss der Lufttemperatur

Bei einem Wasserstoffbrand wird die Umgebungsluft stark erhitzt, was sich auf Personen in der Nähe auswirken kann. Direkter Kontakt mit brennendem Wasserstoff oder 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 1. 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
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

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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 °C 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.

Weitere Einzelheiten zu den physiologischen Reaktionen, die durch erwärmte Luft hervorgerufen werden, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

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 Atemschutz mit PSA für kurze Zeit einen Schutz vor bis zu 1093 °C heißer Luft bieten können [15].

5.2 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 2).

Tabelle 2. 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

5.3 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.

5.4 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.

Dampfwolkenexplosionen (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 Dampfwolkenexplosion 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 Wasserstoffstrahls oder die Entzündung einer brennbaren Wolke führt zu einem Überdruck, der Personen- und Sachschäden verursachen kann. Im schlimmsten Fall, d. h. beim

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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.

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

7. Kennzeichnung von Wasserstoffsystemen

Die Piktogramme für den kommerziellen Transport von Wasserstoff sind in [Abbildung 2](#) dargestellt, wobei "1049" für gasförmigen Wasserstoff und "1966" für flüssigen Wasserstoff steht [36].

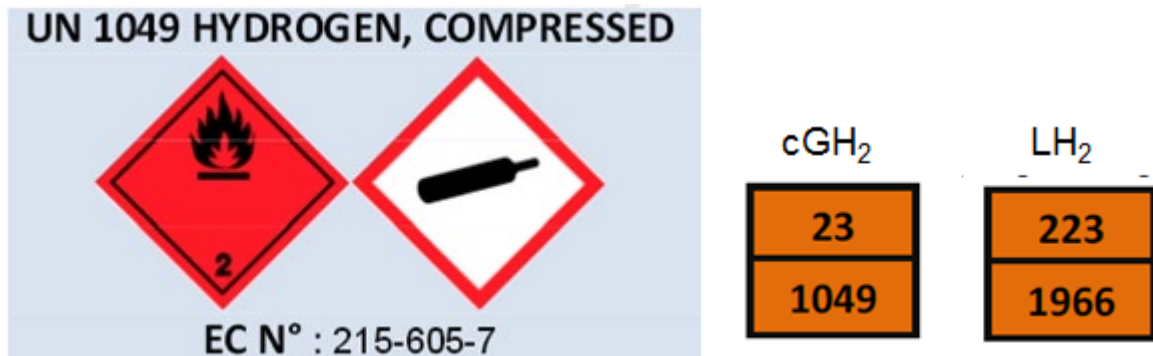


Abbildung 2. Beispiele für Piktogramme, die für den Transport von Wasserstoff verwendet werden.

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 wichtigsten Schritte bei der Entwicklung von Symbolen für die formale Gefahrenerkennung sind in den [Abbildungen 3](#) und [4](#) dargestellt. Diese Farben werden auch in den Rettungsinformationen und zur Einfärbung von Fahrzeugkomponenten (Rettungsblätter) verwendet.

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

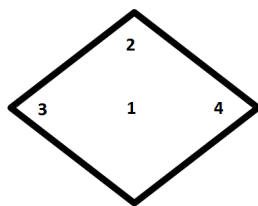
Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

SYMBOLS

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



Abbildung 3. Vom CTIF vorgeschlagene Farben und Symbole für die Entwicklung von standardisierten Zeichen



1	First energy source
2	Second energy source
3	Density compared to air
4	Stored aggregate state

Abbildung 4. Eine vom CTIF vorgeschlagene Rautenform zur Identifizierung von Fahrzeugefahren [38].

Abbildung 5 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 handelt. Die ISO 17840-4 liefert den Einsatzkräften wertvolle Informationen über die Gefahren, die weithin sichtbar sind.



Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Abbildung 5. 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 6](#) dargestellt.

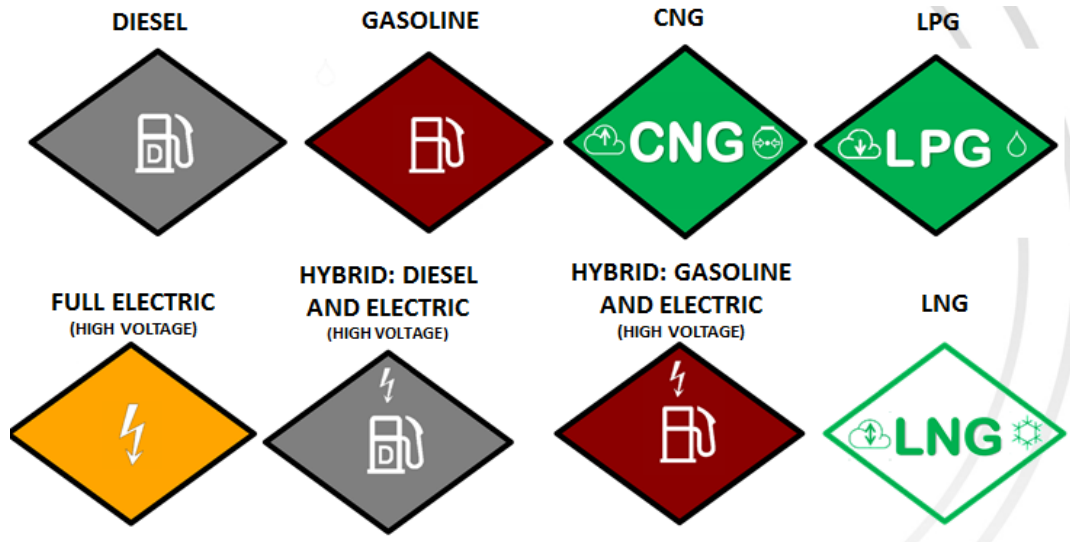


Abbildung 6. Vom CTIF entwickelte Symbole für verschiedene Arten von Fahrzeugkraftstoffen/-energien [38]



Abbildung 7. In den USA verwendete formale Methoden zur Identifizierung [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

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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. 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.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

- Das Personal sollte sich erden, bevor es ein Werkzeug an einem Wasserstoffsystem berührt oder benutzt, wenn der Verdacht besteht, dass sich Wasserstoff in diesem Bereich befindet.

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-Unterlagen 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 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

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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 Entflammbarkeitshüllen 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.
29. Lees, FP (2004). Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 3rdEdition - Hazard Identification, Assessment and Control. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
30. Scilly, NF und High, WG (1986). The blast effects of explosions. Proceedings of the 5thInternationals Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 39-1-39-15.

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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. 11thSymposium 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.