



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

## Lektion 6

# Schadenskriterien für Personen und Sachen

## STUFE IV

### Experte/in

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an **Experten/innen**.

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

Diese Lektion ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen 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 Finanzhilfvereinbarung 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
<b>Inhaltsübersicht.....</b>	<b>4</b>
1. Zielpublikum.....	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Experte/in .....	5
1.2 Kompetenzniveau: Experte/in .....	5
1.3 Vorbildung: Experte/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 .....	14
4.1 Einfluss der Lufttemperatur .....	14
4.2 Wirkung des direkten Kontakts mit Wasserstoffflammen .....	16
4.3 Auswirkung des Wärmestrahlungsflusses von Wasserstoffbränden.....	17
4.4 Wirkung von Überdruck auf den Menschen .....	20
5. Schäden an Gebäuden, Ausrüstung und Umwelt durch Wasserstoffbrände .....	24
6. Auswirkungen von Überdruck auf Strukturen und Ausrüstung .....	25
7. Zusammenfassung der Akzeptanzkriterien für Leben und Eigentum.....	28
8. Kennzeichnung von Wasserstoffsystemen .....	29
9. Persönliche Schutzausrüstung .....	32
10. Auswirkungen auf die Umwelt.....	34
Danksagung.....	34
Referenzen.....	35

## 1. Zielpublikum

Die in dieser Vorlesung enthaltenen Informationen richten sich an die Stufe des Experten und höher. Es gibt auch Vorlesungen für die Stufen I - III: Feuerwehrmann/frau, Gruppenführer/in und Einsatzleiter/in.

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

### 1.1 Beschreibung der Rolle: Experte/in

Experten/innen unterstützen den Einsatzleiter mit Ratschlägen und durch die Leitung und Beaufsichtigung von technischen Einsätzen, die den Einsatz von Wissen, Fähigkeiten oder Ausrüstung in Bezug auf ein bestimmtes Risiko oder eine bestimmte Einsatzfähigkeit erfordern. Typische Vorfälle betreffen gefährliche Stoffe, Transportfahrzeuge, klimatische Ereignisse, strukturelle und andere bauliche Mängel sowie die Logistik von Notfallmaßnahmen.

### 1.2 Kompetenzniveau: Experte/in

Ein wissenschaftliches, technisches und empirisches Fundament im Fachgebiet mit der durch Erfahrung erweiterten Fähigkeit, diese Informationen und Kenntnisse in einer interpretierten und nützlichen Weise anzuwenden, um den Einsatzleiter und andere Einsatzkräfte unter der Leitung der Experten/innen in die Lage zu versetzen, wirksam und sicher auf die Notfallsituation zu reagieren.

### 1.3 Vorbildung: Experte/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 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

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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;
- zwischen direkten und indirekten schädlichen Auswirkungen von Überdruck auf den Menschen zu unterscheiden;

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

- 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 (Untauglichkeit)* 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].

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

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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 LH<sub>2</sub> (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

Mutagenität<sup>1</sup>, Teratogenität<sup>2</sup>, Embryotoxizität<sup>3</sup> 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 in der Regel werden 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 <sub>2</sub> -Konzentration % vol.	O <sub>2</sub> -Konzentration in % vol.	Physiologische Wirkung
<b>0-9</b>	21-19	Keine spezifischen Symptome
<b>9-28</b>	15-19	Verminderte Fähigkeit, Aufgaben auszuführen, kann bei Personen mit Herz-, Lungen- oder Blutkreislaufproblemen frühe Symptome hervorrufen
<b>28-42</b>	12-15	Tiefere Atmung, schnellerer Puls, schlechte Koordination

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

<sup>2</sup> Geburtsfehler durch eine toxische Wirkung auf einen Embryo oder Fötus.

<sup>3</sup> Toxische Auswirkungen einer Substanz, die die Plazentaschranke überwindet, auf den Embryo.

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

42-52	10-12	Schwindelgefühl, schlechtes Urteilsvermögen, leicht blaue Lippen
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 bei Behandlung in 6 Minuten, 100 % Erholung bei 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 von Personal, das in geschlossenen Räumen arbeitet, verhindern [4]. Das System muss so ausgelegt sein, dass das Personal den Bereich nicht betreten kann, es sei denn, die Verfahren zum 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, ist der tolerierbare Wert des Wasserstoffgehalts in der Luft höher und kann bis zu 100 Vol-% betragen. 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).

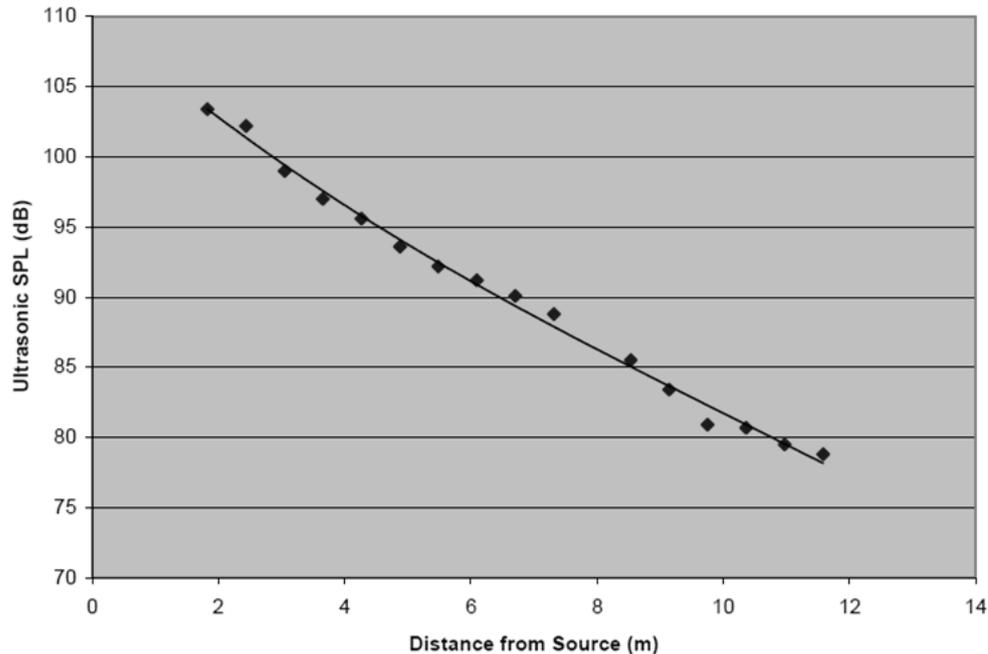


Abbildung 2. Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Abstand von der Wasserstoffleckstelle (Leckdurchmesser: 1 mm; Druck: 5.515 kPa; Leckrate: 0,003 kg/s) [7]

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 LH<sub>2</sub>, 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



## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Die in dieser Studie gemessenen Schallpegel ( $\leq 112$  dB(A)) werden nur bei dauerhafter oder lang anhaltender Exposition als gefährlich angesehen. Eine Gehörschädigung durch kurze Schallwellen ist ab 120 dB(A) möglich. Die in dieser Studie gemessenen Schallpegel von nicht gezündeten und gezündeten kryogenen Wasserstoffdüsen stellen also selbst bei den untersuchten geringen Abständen (1,2 - 4,5 m) keine Gesundheitsgefährdung dar. Andererseits sind die gemessenen Schallpegel laut genug, um eine frühzeitige Identifizierung und Ortung eines freien Wasserstoffstrahls oder einer Stichflamme mit Schallmessgeräten zu ermöglichen" [9].

## 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 von 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
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 2 aufgeführt.

Der Temperaturwert von 149 °C ist die Grenztemperatur für die Flucht. In den British Standards (BSI PD7974-6:2004) [13] wird beispielsweise 115 °C als Schmerzgrenze für Expositionen von mehr als 5 Minuten Dauer angegeben. Darüber hinaus können zwei Gleichungen aus [12] bzw. [14] sehr hilfreich sein, um die Zeit bis zur Handlungsunfähigkeit ( $t_{inc}$ , min) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur zu ermitteln:

$$t_{inc} = 5.33 \times 10^8 \times T_{air}^{-3.66} \quad (1)$$

$$t_{inc} = 5 \times 10^7 \times T_{air}^{-3.4} \quad (2)$$

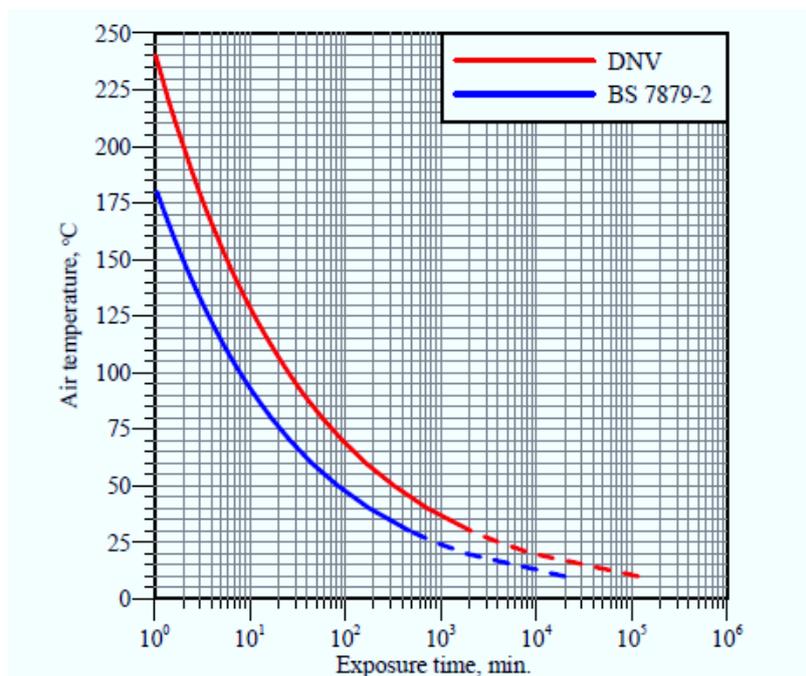


Abbildung 4. Zeit bis zur Handlungsunfähigkeit ( $t_{inc}$ ) als Funktion der Expositionszeit gemäß Ref. [12] (rote Linie) und Ref. [14] (blaue Linie)

Abbildung 4 zeigt zwei Diagramme, die auf der Grundlage der obigen Gleichungen (1) und (2) erstellt wurden und für den Temperaturbereich zwischen 0 und 210 °C gelten. Bitte beachten Sie, dass die gestrichelten Abschnitte der Diagramme bei niedrigeren Temperaturen nicht

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

berücksichtigt werden sollten. Die auf BS 7879-2 basierende Gleichung (blaues Diagramm) ergibt konservativere Werte als die nach dem DNV-Ansatz berechneten Werte (rotes Diagramm). Vergleichen wir die in Tabelle 2 angegebenen Werte mit den in Abbildung 4 dargestellten Werten. Die Temperatur von 149 °C ist eine Grenztemperatur, bei der die Bewohner der Anlage nicht mehr evakuiert werden können. Wie in Abbildung 4 dargestellt, liegt die dieser Temperatur entsprechende Arbeitsunfähigkeitszeit zwischen 2 Minuten (blaue Grafik) und 5 Minuten (rote Grafik). Bei der Temperatur, die der Schmerzgrenze (115 °C) entspricht, liegt sie zwischen 5 Minuten (BS 7879-2-Ansatz) und 15 Minuten (DNV-Ansatz).

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 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

Die in Tabelle 4 dargestellten Daten zeigen, wie sich das Alter einer Person und die verbrannte Hautoberfläche auf die Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls auswirken.

Tabelle 4. Verbrannte Hautfläche mit 50 % Todeswahrscheinlichkeit [16]

Altersgruppe, Jahre	Verbrannte Fläche, %
0-4	60.0

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

5-34	71.2
35-49	61.8
50-59	52.1
60-74	33.7
Über 75	19.6

Darüber hinaus gibt Tabelle 5 eine Schätzung der Sterbewahrscheinlichkeit in der Altersgruppe zwischen 40 und 44 Jahren, abhängig vom Prozentsatz der verbrannten Körperfläche. Es ist offensichtlich, dass eine große Anzahl von Menschen aufgrund einer großflächigen Verbrennung stirbt, die einen großen Prozentsatz ihrer Körperoberfläche abdeckt.

Tabelle 5. Sterbewahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der verbrannten Haut bei 40- bis 44-Jährigen [17]

Verbrannte Körperfläche, %	Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls, %
78-100	100
68-77	90
63-67	80
53-62	70
48-52	60
43-47	40
33-42	30
28-32	20
18-27	10
0-17	0

### 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. Aufgrund des Kohlendioxid CO<sub>2</sub>-Strahlungsbändern und der starken Absorption durch den umgebenden Wasserdampf beträgt das Verhältnis von sichtbaren (mit Hilfe spezieller Techniken oder bei Nacht) zu infraroten Wasserstoffstrahlflammen 0,88 und das Verhältnis von ultravioletter zu infraroter Flammenlänge 0,78 [18]. Dennoch sind die konvektiven und strahlenden Wärmeströme nach wie vor wichtig und müssen zum Schutz von Leben, Eigentum und Umwelt bewertet werden.

Für Personen, die nicht in direktem Kontakt mit Wasserstoffflammen stehen, besteht die Möglichkeit, hohen Strahlungswärmeströmen so lange ausgesetzt zu sein, dass sie zu Verbrennungen ersten, zweiten oder dritten Grades führen. Tabelle 6 fasst die Auswirkungen

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

verschiedener Strahlungsflüsse auf den Menschen zusammen, die als Schadenskriterien verwendet werden können [19].

Die Annahmekriterien sind wie folgt definiert:

- Ein Wärmestrom von  $1,5 \text{ kW/m}^2$  gilt als unbedenklich für die Bevölkerung (zum Vergleich:  $1,3 \text{ kW/m}^2$  ist die durchschnittliche Strahlungsintensität der Sonne an einem heißen Tag) [1].
- Grenzwerte für die Exposition ungeschützter Haut wurden in einigen Normen vorgeschlagen und können als Richtschnur dienen, z. B. schlug British Standards [13] einen Wärmestrom von  $2,5 \text{ kW/m}^2$  als Grenzwert für die Exposition ungeschützter Haut gegenüber Strahlungswärme vor, bei dessen Überschreitung starke Schmerzen auftreten. Die Toleranzzeit bei dieser Intensität beträgt 5 Minuten [13]. Dennoch kann eine Exposition mit dieser Intensität je nach Expositionszeit zu Verbrennungen unterschiedlichen Grades führen. Dies ist eine tolerierbare Intensität für einen Bewohner. Oberhalb dieses Wertes des Wärmestroms oder der Expositionsdauer sollte die aufgenommene Dosis berechnet werden, um die Auswirkungen auf den Menschen zu bewerten [1].
- Der Wärmestrom von  $5 \text{ kW/m}^2$  ist eine Schwelle, die für Einsatzkräfte, die Schutzkleidung tragen, tolerierbar ist. Lange Expositionen dieser Intensität sollten jedoch vermieden werden.
- Die Intensität von  $6 \text{ kW/m}^2$  ist für die Insassen bei der Evakuierung erträglich und sollte als wichtiger Schwellenwert angesehen werden. Bei dieser Intensität wird der Schmerz innerhalb von 12 s erreicht, und er ist in etwa 38 s tödlich [1].

Tabelle 6. Auswirkungen des Wärmestrahlungsflusses auf den Menschen\* [19]

Intensität des Wärmestrahlungsflusses, $\text{kW/m}^2$	Auswirkungen auf die Menschen
1.5	Unschädlich; sicher für die Allgemeinheit und für das Schreibwarenpersonal
2.5	Intensität für 5 Minuten erträglich; starke Schmerzen oberhalb dieser Zeitspanne
3	Intensität tolerierbar für nicht häufige Notsituationen für 30 min
5	Schmerz bei 20 Sekunden Einwirkung, Verbrennung ersten Grades. Intensität erträglich für diejenigen, die Notoperationen durchführen
6	Für flüchtende Einsatzkräfte erträgliche Intensität
9.5	Verbrennung zweiten Grades nach 20 Sekunden
12.5-15	Verbrennungen ersten Grades nach 10 Sekunden, 1% Todesfall in 1 Minute
25	Erhebliche Verletzung in 10 s, 100%ige Tötung in 1 min
35-37.5	1% Todesfall in 10 s

\*Dies sind allgemeine Werte für Kohlenwasserstoffbrände

Die Schwellenwerte können von Land zu Land unterschiedlich sein. Nach der französischen Doktrin sind die Schwellenwerte beispielsweise auf 3, 5 und  $8 \text{ kW/m}^2$  festgelegt [8]. Das

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Handbuch für den Umgang mit Zwischenfällen bei Pipelines - HP Natural Gas Action Card des FÖD Inneres (Belgien) gibt an, dass die Schmerzgrenze bei ungeschützter Haut nach einer Einwirkung von  $3 \text{ kW/m}^2$  Wärmestrahlung für 10 s erreicht ist, die sich auf 5 s verringert, wenn die Wärmestrahlungsintensität auf  $5 \text{ kW/m}^2$  ansteigt, und  $10 \text{ kW/m}^2$  ist der Grenzwert für die maximal akzeptable Wärmestrahlungsintensität für ungeschützte Strukturen [44]. Die Korrelationen zwischen den Wärmeströmen und den Entfernungen bei der Verbrennung eines Wasserstofflecks an einer Rohrleitung in Abhängigkeit vom Leckdurchmesser und dem Druck in dem in der französischen Doktrin verwendeten Speichertank finden sich in Anhang 1.

Der Grad der Schädigung hängt nicht nur von der Intensität des Wärmestroms, sondern auch von der Dauer der Exposition ab. Vor diesem Hintergrund wird die Schädlichkeit von Strahlungswärme häufig in Form einer thermischen Dosis einheit ausgedrückt, die die Intensität und die Zeit kombiniert [19], wie in Gleichung (3) dargestellt:

$$\text{thermische Dosis einheit: TDU} = I^{4/3} \cdot t \quad (3)$$

wobei  $I$  der Strahlungsfluss (in  $\text{kW/m}^2$ ) und  $t$  die Dauer der Exposition (in s) ist, 1 Wärmedosis einheit (TDU) =  $1 (\text{kW/m}^2)^{4/3} \text{s}$ .

Für die Einsatzkräfte ist es von entscheidender Bedeutung, den Schaden auf der Grundlage der Dosis für verschiedene Wellenlängen der Strahlung zu kennen. Wie bereits erwähnt, strahlt Wasserstofffeuer mehr im UV-Bereich des Spektrums als im IR-Bereich. Tabelle 7 zeigt die Werte der Wärmedosis einheiten, die zu Verbrennungen 1., 2. und 3. Grades führen, nur für den ultravioletten (UV) und den infraroten (IR) Spektralbereich. Der Wärmestrom der Strahlung im IR-Spektrum ist für die Entstehung von Hautverbrennungen am bedenklichsten, wobei der Dosiswert im Vergleich zum UV-Spektrum viel niedriger ist. Viele Faktoren beeinflussen die in Tabelle 7 angegebenen Schwellenwerte, darunter die Art der Wärmequelle und die Art der in den Versuchen verwendeten Tierhaut [19].

Tabelle 7. Daten zur Verbrennung durch Strahlung [19]

Schwere der Verbrennung	Schwellenwert der Wärmedosis ( $\text{kW/m}^2$ ) <sup>4/3</sup> s	
	Ultraviolet	Infrarot
<b>Erster Grad</b>	260-440	80-130
<b>Zweiter Grad</b>	670-1100	240-730
<b>Dritter Grad</b>	1220-3100	870-2640

Als Kriterien für die tödliche Wirkung können zwei Parameter verwendet werden: 1) die "gefährliche Dosis", die der Dosis entspricht, die bei 1 % der exponierten Bevölkerung zum Tod führt, und 2) die tödliche Dosis "LD50", die eine Dosis angibt, bei der 50 % der Menschen sterben müssen. Die Werte der gefährlichen Dosis und der LD50 wurden in der Literatur angegeben. Rew [16] schlug zum Beispiel 2000 TDU als Äquivalent der LD50 für einfallende Wärmestrahlung an Land vor. Es sei darauf hingewiesen, dass der von Lees [24] angegebene LD50-Wert von  $3600 (\text{kW/m}^2)^{4/3} \text{s}$  viel höher erscheint als  $2000 (\text{kW/m}^2)^{4/3} \text{s}$  [16]. O'Sullivan und Jagger [20] und Chang et al. [21] geben daher einen Richtwert von 3500 TDU an, der

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

einem 100%igen Todesrisiko für das Personal in Kleidung entspricht. 100 % Todesfälle können jedoch auch bei etwas niedrigeren Dosen auftreten. Bei 3500 TDU kommt es zu einer unkontrollierten Entzündung der Kleidung, was bedeutet, dass 100 % der bekleideten Personen nicht überleben werden. Bei dieser thermischen Dosis ist eine Selbstlöschung aufgrund von Verletzungen durch die von der Kleidung ausgehende Hitze unwahrscheinlich. Die britische Gesundheits- und Sicherheitsbehörde (Health and Safety Executive, HSE) schlug vor, für Offshore-Öl- und -Gasanlagen  $LD50 = 2000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$  zu verwenden.

### 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.

*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 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 gehört 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

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

die Zugkräfte stark genug sind, um selbst große Objekte zu verschieben, kann eine Person auch zum Projektil werden. Die dabei erlittenen Verletzungen werden als Translationsverletzungen bezeichnet, weil der menschliche Körper buchstäblich mitgerissen und verschoben wird, und die Geschwindigkeit, mit der der Körper verschoben wird, bestimmt die Schwere der Verletzung. 50 % der Personen, deren Körper mit einer Geschwindigkeit von mehr als 0,6 m/s verschoben wird, erleiden leichte Verletzungen; 1 % der Personen, die mit einer Geschwindigkeit von etwa 4 m/s getroffen werden, erleiden Verletzungen wie Organrisse und Knochenbrüche [1]. Zwei Faktoren können Schäden verursachen: die *Höhe des Überdrucks* und die Dauer des hohen Drucks (des *Impulses*). Die Tabellen 8 und 9 enthalten eine Zusammenfassung der Überdruckwerte für direkte und indirekte Auswirkungen, die zu Schäden beim Menschen führen.

Tabelle 8. Direkte Auswirkungen von Überdruck auf Menschen [19]

$\Delta\pi$ , kPa	Beschreibung der Schäden
8	Keine schweren Verletzungen von Personen im Freien
10	Schwere Verletzungen von Menschen in Gebäuden, wenige Todesfälle
13.8	Schwellenwert für Trommelfellrisse
20	Schwelle der Überlebensfähigkeit (20 % Todeswahrscheinlichkeit in Innenräumen; 0 % Todeswahrscheinlichkeit im Freien)
34.5-48.3	50%ige Wahrscheinlichkeit eines Trommelfellrisses
54	Tödliche Kopfverletzung
68.9-103.4	90%ige Wahrscheinlichkeit eines Trommelfellrisses
70	100%ige Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls in Innenräumen
82.7-103.4	Schwellenwert für Lungenblutungen (schwere Verletzungen oder Tod)
137.9-172.4	50 % Wahrscheinlichkeit des Todes durch Lungenblutung
206.8-241.3	90%ige Wahrscheinlichkeit des Todes durch Lungenblutung
48.3	Schwellenwert für innere Verletzungen durch die Explosion
482.6-1379	Unmittelbare Todesopfer der Explosion

Wie aus Tabelle 8 hervorgeht, handelt es sich bei den direkten Auswirkungen in erster Linie um Lungenblutungen und das Zerreißen des Trommelfells aufgrund des Überdrucks. Es ist wichtig, daran zu erinnern, dass der Schaden für Menschen durch die Explosion innerhalb eines Gebäudes größer ist als im Freien, da die Zerstörung des Gebäudes zu einer Bildung von Projektilen (Fragmenten) führt und dadurch die indirekten Auswirkungen verstärkt werden. In der Tat sind die Druckwerte, die zu direkten Verletzungen von Menschen führen, viel höher als bei Gebäuden.

Tabelle 9. Indirekte Auswirkungen von Überdruckereignissen auf Menschen [19]

$\Delta\pi$ , kPa	Beschreibung der Schäden
3.0	Verletzungen durch Glassplitter
6.9-13.8	Schwellenwert für Hautverletzungen durch Flugkörper

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

<b>10.3-20.0</b>	Von der Druckwelle niedergeschlagene Menschen
<b>13.8</b>	Möglicher Tod durch Aufprall auf Hindernisse
<b>27.6-34.5</b>	50 % Wahrscheinlichkeit des Todes durch Raketenwunden
<b>48.3-68.9</b>	100%ige Wahrscheinlichkeit des Todes durch Raketenwunden
<b>55.2-110.3</b>	Wer aufsteht, wird in die Ferne geschleudert.

Für Personen in Innenräumen, die sich hinter den Fenstern aufhalten, kann ein Überdruck von 3 kPa zu Verletzungen durch Glassplitter führen, während 10 kPa eine Schwelle für schwere Verletzungen darstellt. Für Personen, die sich im Freien aufhalten, führt ein Überdruck von 8 kPa nicht zu schweren Verletzungen (Tabellen 8 und 9). Der Schwellenwert für die Überlebenswahrscheinlichkeit liegt bei 21 kPa, andere Quellen empfehlen jedoch Werte im Bereich von 14 - 20 kPa [8]. Der Schwellenwert für das Reißen des Trommelfells liegt bei 13,8 kPa, und der Bereich von 34,5 bis 48,3 kPa entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 50 %, dass das Trommelfell reißt, was zu Taubheit, Tinnitus und Schwindel führen kann. Diese physiologischen Auswirkungen stellen eine Bedrohung für die Insassen dar, die versuchen werden, zu entkommen. Sie werden ziemlich desorientiert sein und nicht in der Lage, miteinander zu kommunizieren. Wenn den Menschen schwindlig wird, könnte es für sie gefährlich werden, Treppen oder Fluchtwege zu benutzen. Interessanterweise sind die indirekten Auswirkungen von Explosionen im Hinblick auf die Sicherheit von größerer Bedeutung. „Die indirekten Explosionsverletzungen sind so vorherrschend, dass die Personen, die nur den direkten Explosionsverletzungen ausgesetzt sind, nur einen kleinen Teil des Patientenaufkommens ausmachen“ [26]. Die direkten Überdruckwirkungen reichen nicht so weit vom Explosionsort weg wie andere Wirkungen und werden oft durch die Sogwirkung überdeckt [27]. Französische Empfehlungen für Abstände zu Überdruckereignissen finden sich in Anhang 2.

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. Schwere Geschosse verursachen möglicherweise keine Penetrationswunden, können aber zu schwereren Verletzungen wie Frakturen führen [26]. Die Schwellengeschwindigkeit für Schädelfrakturen durch 4,5-Milligramm-Geschosse liegt bei nur 4,6 m/s [26]. Es ist jedoch nach wie vor schwierig, die Auswirkungen von Flugkörpern auf Menschen vollständig zu bewerten, da es an ordnungsgemäß validierten Modellen fehlt [1].

Die Dauer der bei einer Explosion entstehenden Druckwelle ist sehr kurz (in den meisten Fällen weniger als eine Sekunde), und die Insassen wären nicht in der Lage, sich in Sicherheit zu bringen. Daher ist es unmöglich, die Dauer der Exposition von Personen gegenüber der Druckwelle zu bewerten, da das Ereignis fast sofort eintritt. Die Dauer der positiven Phase des

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Überdrucks kann jedoch zur Bewertung der Schäden herangezogen werden. So hat Lees [29] eine Überlebenswahrscheinlichkeit und einen Schwellenwert für Lungenschäden durch eine Druckwelle in Abhängigkeit vom Überdruck (vertikale Achse) und der Dauer einer positiven Überdruckphase (horizontale Achse) angegeben (siehe Abbildung 5). Bei konstantem Druck ist die Auswirkung umso schwerer, je länger der Impuls dauert.

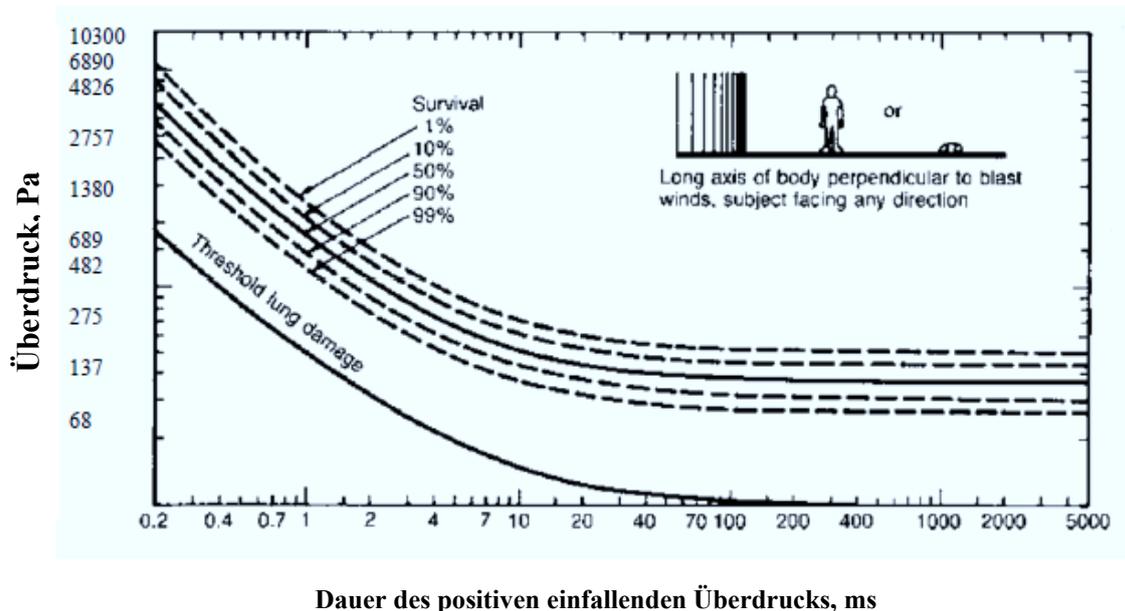


Abbildung 5. Auswirkung des kombinierten Überdrucks und Impulses [29]

Die Akzeptanzkriterien für Überdruckwerte sind nachstehend aufgeführt. Diese Werte sind als Empfehlungen zu verstehen.

- Der Überdruck von 1 kPa ist der tolerierbare Wert für die Bewohner in Innenräumen. Dieser Wert entspricht dem Zerschlagen von 5 % der Fenster [30].
- Der Überdruck von 1,35 kPa und Impulse von 1 Pa-s können als "Unbedenklichkeitsschwelle" für den Menschen angesehen werden [31].
- Der Überdruck von 8 kPa ist der tolerierbare Wert für Personen, die sich im Freien aufhalten [1].
- Der Überdruck von 10 kPa ist der Höchstwert für die Insassen in Innenräumen. Oberhalb dieser Schwelle sind schwere Verletzungen und einige Todesfälle möglich [1].
- Der Überdruck von 21 kPa ist der Überlebenswert für die im Freien befindlichen Insassen. Dieser Schwellenwert beeinträchtigt die Bewegungen nicht und hat eine geringe Verletzungs- oder Todeswahrscheinlichkeit.
- Der Überdruck von 21 kPa ist der Schwellenwert für die Überlebensfähigkeit der Einsatzkräfte, da ihre PSA sie nicht vor den Auswirkungen des Überdrucks schützen kann.
- Der Überdruck von 34 kPa ist der Höchstwert für die im Freien befindlichen Personen. Die Überdruckwerte über 34 kPa wirken sich physiologisch auf die Insassen während der Evakuierungsmaßnahmen aus. Dieser Wert ist konservativ im Hinblick auf die in [29]

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

angegebene Wahrscheinlichkeit von 1 % für den Tod und 1 % für den Tod hauptsächlich durch Lungenblutung (99 kPa).

## 5. Schäden an Gebäuden, Ausrüstung und Umwelt durch Wasserstoffbrände

Die Schadenskriterien für Bauwerke, Ausrüstung und Umwelt, die durch Wasserstoffbrände verursacht werden, können in Form von Strahlungswärme oder direkter Flammeneinwirkung ausgedrückt werden. Die Auswirkungen der Intensität des strahlenden Wärmestroms auf Bauwerke, Ausrüstung und Umwelt sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10. Auswirkungen des Wärmestrahlungsflusses auf Strukturen, Geräte und Umwelt [19, 29]

Strahlungswärmestrom, kW/m <sup>2</sup>	Auswirkungen auf Strukturen, Materialien, Ausrüstung und Umwelt
4	Glasbruch (30 min Exposition)
5	Erheblicher Bruch von Fenstern
8-12	Schwellenwert für die Strahlungsintensität, der Dominoeffekte auslösen kann
10	Heizungsanlagen; Erhöhung der Temperaturen und Drücke in LH <sub>2</sub> /GH-Speichern <sub>2</sub>
10-12	Entzündung der Vegetation
10 oder 20	Zündung von Kraftstoff, Öl (120 bzw. 40 s)
12.5-15	Pilotiertes Entzünden von Holz; Schmelzen von Kunststoffen (>30 min Exposition)
16	Versagen von Bauwerken (außer Beton) bei längerer Exposition
18-20	Verschlechterung der Kabelisolierung (>30 min Exposition)
20	Intensität, der die Betonstrukturen mehrere Stunden lang standhalten können
25-32	Unbeabsichtigte Entzündung von Holz; Stahlverformung (>30 min Einwirkung)
35-37.5	Prozessausrüstung und strukturelle Schäden, einschließlich Lagertanks (>30 min Exposition)
100	Einsturz von Stahlkonstruktionen (>30 min Exposition)
200	Versagen von Betonstrukturen (in mehreren Dutzend Minuten)

Die Annahmekriterien sind nachstehend aufgeführt:

- 5 kW/m<sup>2</sup> - Schwellenwert für Lichtschäden, da diese Intensität dem Zerschlagen von Fenstern entspricht;
- 10 kW/m<sup>2</sup> - Schwellenwert für mäßige Schäden, da dies dem Wärmestrom entspricht, der zur Aufheizung von Strukturen und zu einem erheblichen Druckanstieg in Flüssigkeits- oder Gasspeichern führt.
- 10 kW/m<sup>2</sup> - ist ein Schwellenwert für empfindliche Gebiete.
- Die Einsturzschwelle hängen stark von der Art des Materials ab: Das Versagen von Strukturen aus Nichtbeton tritt bei längerer Exposition bei 16 kW/m<sup>2</sup> ein, während Betonstrukturen bei 200 kW/m<sup>2</sup> versagen.

## 6. Auswirkungen von Überdruck auf Strukturen und Ausrüstung

Die Überdruckwerte können den Einsatzkräften Anhaltspunkte für den Grad der Zerstörung geben. Geringfügige strukturelle Schäden treten bei einem Überdruck von etwa 3 - 6 kPa auf, während eine vollständige Zerstörung bei einem Überdruck von 80 - 260 kPa erfolgt.

Die von Mannan [32] vorgeschlagenen Schwellenwerte für Gebäude sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11. Schwellenwerte des Schadensüberdrucks für Gebäude aus Mannan [32]

Überdruck, kPa	Grad der Beschädigung
4.8	Geringe Schäden am Haus
6.9	Teilabriss des Hauses - es bleibt unbewohnbar
34.5-48.3	Fast vollständige Zerstörung des Hauses

Diese Werte wurden kürzlich von Molkov und Kashkarov [33] für die Bewertung von Trennungsabständen von der Druckwelle, die durch den Bruch eines Hochdruck-Wasserstoffspeichers erzeugt wird, angepasst. Die Einzelheiten dieser Methodik werden in der Vorlesung über Wasserstoffdetonationen und -deflagrationen weiter erörtert.

Tabelle 12 fasst die verschiedenen in der Literatur beschriebenen Auswirkungen von Überdruck auf Bauwerke zusammen [29, 30]. Fensterscheiben sind bei geringen Überdrücken besonders bruchgefährdet [1]. Bitte denken Sie daran, dass Glassplitter zu Geschossen werden und Menschen verletzen können.

Tabelle 13. Reaktion der Strukturelemente auf die verschiedenen Überdruckstufen

Elemente	Überdruck, kPa	Beschreibung der Schäden
Fensterscheibe	0.7 - 1.0	5% gebrochen
	1.4 - 3.0	50% gebrochen
	3.0 - 6.0	90% gebrochen
Gebäude	1.4 - 3.0	bewohnbar nach Reparatur von Schäden an Decken, Fenstern und Fliesen
	3.0 - 6.0	Geringfügige strukturelle Schäden. Trennwände und Tischlerarbeiten wurden aus der Verankerung gerissen. Schäden an einer Hausdecke. 90 % des Fensterglases ist zerbrochen
	6.0 - 9.0	Tür- und Fensterrahmen sind gebrochen
	9.0	Stahlrahmen des verkleideten Gebäudes ist leicht verzogen
	14 - 28	Unbewohnbar; teilweiser oder vollständiger Einsturz des Daches, teilweiser Abriss von einer oder zwei Außenwänden, schwere Schäden an tragenden Wänden. Wände aus Beton oder Schlacke, nicht bewehrt, zertrümmert
	30	Zerstörung aller Gebäude, die nicht dafür ausgelegt sind, Explosionen standzuhalten
	35 - 80	50%-75% Außenmauerwerk zerstört oder unsicher gemacht

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

80 - 260	Fast vollständiger Abriss
50 - 100	Verdrängung eines zylindrischen Speichers, Versagen von Rohren

Stephen [34] und Lees [29] geben in Tabelle 13 die Spitzenwerte des Überdrucks und das Ausmaß der Schäden an den Bauwerken an.

Tabelle 13. Klassifizierung der Schäden an Bauwerken bei verschiedenen Überdrücken

Überdruck, kPa	Schadenshöhe
weniger als 3,5	Leichte Schäden
mehr als 17	Mäßiger Schaden
mehr als 35	Schwere Schäden
mehr als 83	Vollständige Zerstörung

In Frankreich gibt es einen Leitfaden für die Folgekriterien zur Bestimmung der Domino-Beziehung (z. B.  $8 \text{ kW m}^{-2}$  für Wärmestrahlung, 200 mbar für Überdruck) [43]. Wie bereits erwähnt, hängen die Schwellenwerte von den nationalen Vorschriften ab. Beispiele für französische Schwellenwerte im Zusammenhang mit den Auswirkungen von Überdruck auf Menschen und Bauwerke sind in Anhang 3 aufgeführt.

Die kombinierten Auswirkungen von Überdruck und Impuls sind in Tabelle 15 und Abbildung 6 angegeben. Diese Werte können als Schwellenwerte verwendet werden. Die Werte für Überdruck und Impuls, die den Punkten A, B, C und D in Tabelle 14 entsprechen, sind auch in Abbildung 6 dargestellt und stimmen gut mit den Schadenshöhen 1, 2 und 3 überein (siehe Legende in Abbildung 6). Abbildung 6 kann verwendet werden, um das Ausmaß der Schäden an Gebäuden für bestimmte Spitzenüberdrücke und -impulse der Explosion abzuschätzen.

Tabelle 14. Kombinierte Wirkung von Überdruck und Impuls auf das Schadensniveau [1]

Überdruckspitze, kPa	Impuls, kPas	Beschreibung der Schäden	Punkt in Abbildung 12
3.6	0.10	Begrenzung kleinerer struktureller Schäden	A
14.6	0.30	Schwelle für moderate Bauschäden: Versagen einiger tragender Elemente	B
34.5	0.52	Schwelle für partielle Ablenkung: 50-75% der Wände zerstört	C
70.1	0.77	Vollständige Zerstörung von Gebäuden	D

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

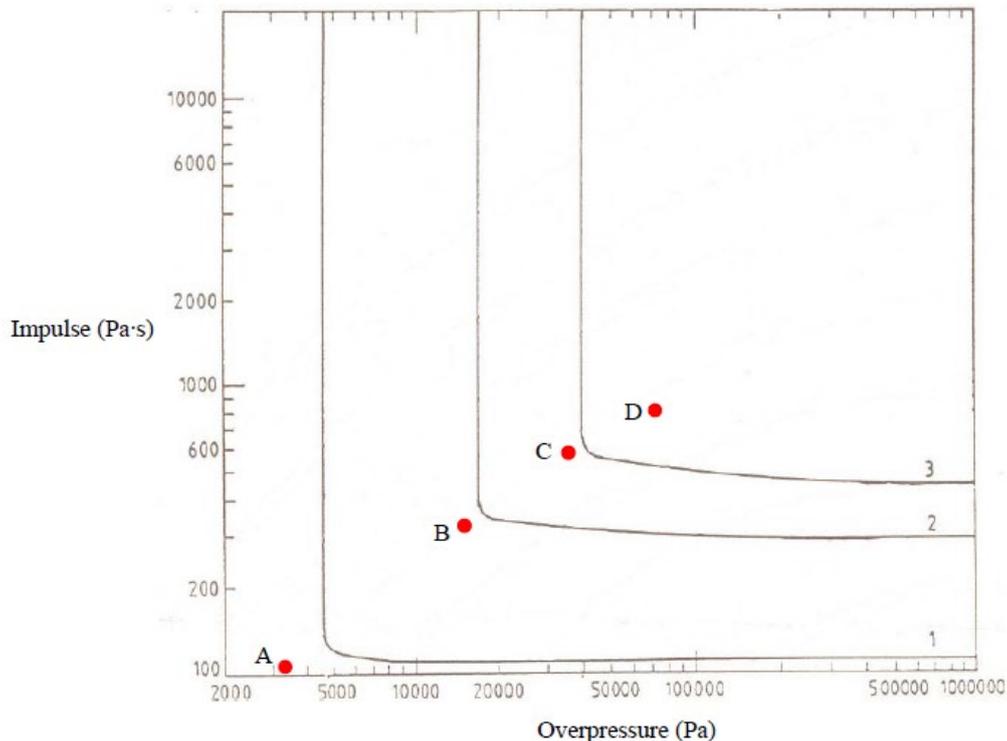


Abbildung 6. Überdruck-Impuls-Diagramm einer hohen Sprengladung auf dem Boden, die einen abgestuften Grad an Schäden an Häusern verursacht: Stufe 1 - leichte Schäden; Stufe 2 - strukturelle Schäden; 3 - Einsturz [35]

Die Annahmekriterien lauten wie folgt:

- Die Schwelle für leichte Schäden liegt bei 3 kPa mit einem Impuls von mehr als 100 Pas. Bei diesem Überdruck ist die Infrastruktur nach der Reparatur von Schäden an Decken, Fenstern und Fliesen bewohnbar.
- Der Schwellenwert für mäßige Schäden liegt bei 15 kPa und einem Impuls von mehr als 300 Pas.
- Der Schwellenwert für den Einsturz von Bauwerken liegt bei 35 kPa und einem Impuls von mehr als 500 Pas.
- Der Schwellenwert für das empfindliche Gebiet liegt bei 20 kPa.

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

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

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 unbekannt 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. Zusammenfassung der Akzeptanzkriterien für Leben und Eigentum

Tabelle 15 fasst die zuvor besprochenen Schwellenwerte (d. h. Akzeptanzkriterien für Lebenssicherheit und Sachschäden) zusammen. Sie sollten als Richtwerte und nicht als absolute Zahlenwerte verwendet werden.

Tabelle 15. Werte für die Definition von Akzeptanzkriterien für Lebenssicherheit und Sachschäden

Standort	Gefahr für das Leben	Schwellenwert	Einsatzkraft	Insasse	Mitglied der Öffentlichkeit
<b>Dringen und Draußen</b>	Wasserstoffkonzentration, Vol.%	Erträglich	9	28	9
		Maximum	-	40	-
	Temperatur der Luft, C	Erträglich	149	115	70
		Maximum	-	149	-
	Direkter Strahlungswärmestrom, kW/m <sup>2</sup>	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	-
<b>Gefährdung von Immobilien</b>		<b>Schwellenwert</b>	<b>Werte</b>		
<b>Strahlungswärmestrom, kW/m<sup>2</sup></b>	Leichte Schäden	3			
	Mäßige Schäden	10			
	Empfindliches Gebiet	10			
	Kollabieren	16-200			
	<b>Überdruck, kPa</b>	Leichte Schäden	6		
Mäßige Schäden		15			
Empfindliches Gebiet		20			
Kollabieren		35			

## 8. Kennzeichnung von Wasserstoffsystemen

Die Piktogramme für den kommerziellen Transport von Wasserstoff sind in [Abbildung 7](#) dargestellt, wobei "1049" für gasförmigen Wasserstoff und "1966" für flüssigen Wasserstoff steht [36].

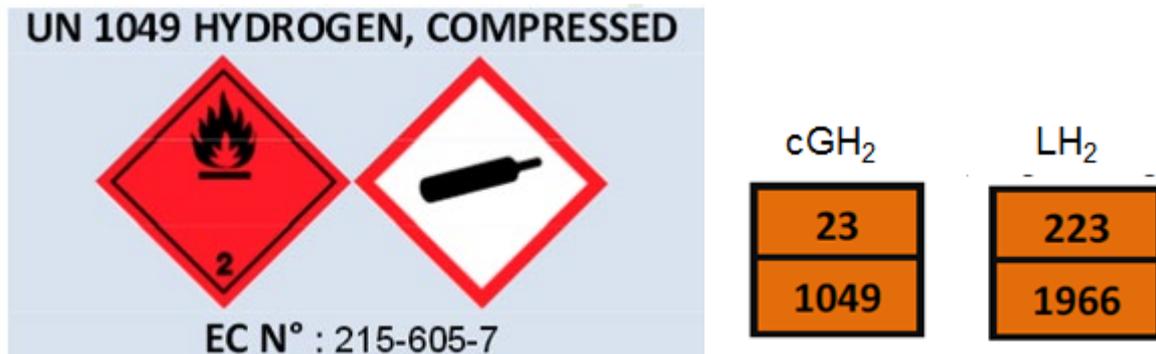


Abbildung 7. Beispiele für Piktogramme, die für den Transport von Wasserstoff verwendet werden.

Für BZ-Fahrzeuge empfiehlt die EU-Verordnung Nr. 406/2010 die Verwendung von grünen Rauten in weißen Rahmen mit der Aufschrift "H<sub>2</sub> GAS" oder "LIQUID H<sub>2</sub>" 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 8](#) und [9](#) dargestellt. Diese Farben werden auch in den Rettungsinformationen und zur Einfärbung von Fahrzeugteilen (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 8. Vom CTIF vorgeschlagene Farben und Symbole für die Entwicklung von standardisierten Zeichen

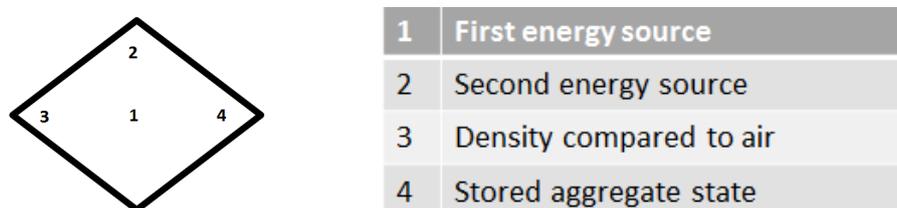


Abbildung 9. Eine vom CTIF vorgeschlagene Rautenform zur Identifizierung von Fahrzeuggefahren [38].

Abbildung 10 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.

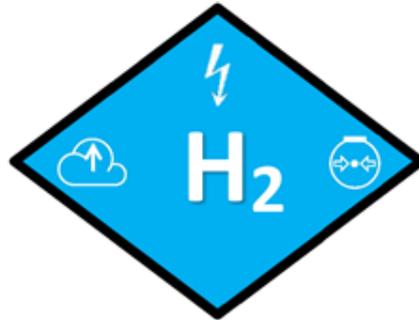


Abbildung 10. Ein vom CTIF entwickeltes Symbol für ein mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff betriebenes BZ-Fahrzeug [38]

Die Beispiele der vom CTIF vorgeschlagenen Symbole für andere Fahrzeugtypen, traditionelle und Hybridfahrzeuge, sind in [Abbildung 11](#) dargestellt.

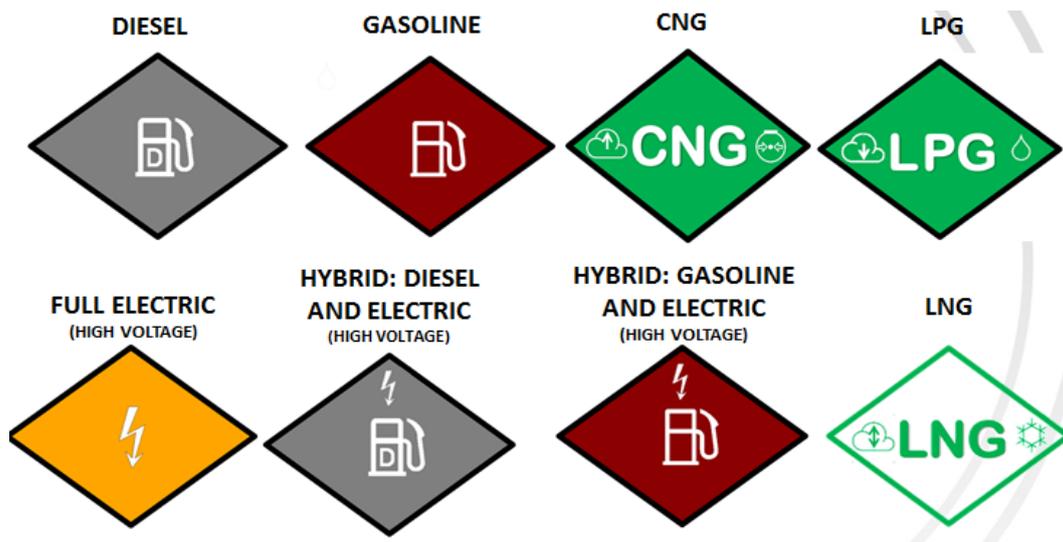


Abbildung 11. Vom CTIF entwickelte Symbole für verschiedene Arten von Fahrzeugkraftstoffen/-energien [38]



Abbildung 12. In den USA verwendete formale Methoden zur Identifizierung [36].

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Bitte beachten Sie, dass die Einsatzkräfte in den USA auf die NFPA verwiesen werden, die die Verwendung von "FORMELLEN" und "INFORMELLEN" Methoden zur Fahrzeugidentifizierung 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 12). Dies entspricht der internationalen SAE-Norm [36].

## 9. 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 Anforderungen an Atemschutzgeräte. Gemäß den Anforderungen an die Hitzebeständigkeit der (NF) EN 469:2006-02 darf sich das Material, das für die Montage der Kleidung verwendet wird, bei einer Temperatur von  $180 \pm 5$  C und einer Einwirkungszeit von 5 Minuten weder entzünden noch schmelzen und darf sich weder in Längs- noch in Querrichtung um mehr als 5 % zusammenziehen [39]. Bitte beachten Sie, dass der einfallende Wärmestrom auf einen Nennwert von  $80 \text{ kW/m}^2$  begrenzt ist.

Die Testergebnisse werden als Wärmedurchgangsindex ( $\text{HTI}_{24}$ ) ausgedrückt, d. h. als die Zeit (in Sekunden, s), die erforderlich ist, um die Temperatur in einem Kalorimeter auf  $24$  °C ansteigen zu lassen. Zur Klassifizierung von Feuerwehrbekleidung wird auch die Zeit (in s) aufgezeichnet, die einem Temperaturanstieg von  $12$  °C entspricht ( $\text{HTI}_{12}$ ). Die Reaktion des Materials auf die Wärmeübertragung (Flamme) muss das unten angegebene Leistungsniveau erreichen [39].

Level 1	Level 2
$\text{HTI}_{24} \geq 9.0$	$\text{HTI}_{24} \geq 13.0$
$\text{HTI}_{24} - \text{HTI}_{12} \geq 3.0$	$\text{HTI}_{24} - \text{HTI}_{12} \geq 4.0$

Die Wärmestromdichte von  $40 \text{ kW/m}^2$  wird verwendet, um die Leistung des Materials gegenüber Strahlungswärme zu messen. Gemessen werden Strahlungswärmeübertragungsindizes (RHTI). Die Anforderungen der Norm EN 469:2006 sind nachstehend aufgeführt:

Level 1	Level 2
$\text{RHTI}_{24} \geq 10.0$	$\text{RHTI}_{24} \geq 18.0$
$\text{RHTI}_{24} - \text{RHTI}_{12} \geq 3.0$	$\text{RHTI}_{24} - \text{RHTI}_{12} \geq 4.0$

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

Die Restfestigkeit des Materials, das einer Strahlungswärme von  $10 \text{ kW/m}^2$  ausgesetzt ist, sollte  $\geq 450 \text{ N}$  sein [39]. Das Personal, das in einer Wasserstoffanlage oder einem Wasserstoffsystem arbeitet, kann die möglichen Folgen einer Gefährdung 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 sauerstoffarmen 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  $\text{LH}_2$ ).
- Bei der Handhabung von Gegenständen, die mit  $\text{LH}_2$  oder kaltem  $\text{GH}_2$  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.

## Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

- 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.

## 10. 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. <sup>th</sup>Auflage, 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](http://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](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, 3<sup>rd</sup>Edition - Hazard Identification, Assessment and Control. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
30. Scilly, NF und High, WG (1986). The blast effects of explosions. Proceedings of the 5<sup>th</sup>Internationals 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. 11<sup>th</sup>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 <sup>2</sup> )			Short-term thermal effects		
		3 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	8 kW/m <sup>2</sup>	SEI <sup>14</sup>	SEL <sup>15</sup>	SELS <sup>15</sup>
		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].

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

**Anhang 2. Französischer Leitfaden zu Überdruckeffekten bei verzögerter Wasserstoffverbrennung [8].**

Scenario of a pipework leak	Tank pressure (bar)	Length of flame (m)	Delayed combustion (fire-ball)			
			Effects of over-pressure (mbar)			
			20	50 (SEI)	140 (SEL)	200 (SELS)
			The distances are in m			
Hose from an articulated trailer	200		13.1	8.2		
0.1 mm		0.2	0.5			
0.2 mm		0.4	1	0.5		
4 mm		7	20	10	6	5
0.1 mm	525	0.4	1	0.5		
0.2 mm		0.8	2	1		
2.3 mm		7	18	9	6	5
4 mm		12	32	16	9	8
5.16 mm		15	42	21	12	10
0.1 mm	450	0.3	0.8	0.4		
0.2 mm		0.7	1.4	0.7		
4 mm		11	30	15	9	7
5.16 mm		14	38	19	11	9
0.1 mm	700	0.5	1	0.5		
0.2 mm		0.8	2	1		
2.3 mm		8	22	11	6	5
4 mm		14	38	19	11	9

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

Lektion 6: Schadenskriterien für Personen und Sachen

**Anhang 3. 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	