

Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiterinnen und Leiter der
Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes

Wasserstoff - Leitfaden für Feuerwehren (2025-01)



Fassung Dezember 2025

Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz
und Fachausschuss Einsatz und Taktik
der deutschen Feuerwehren
c/o Branddirektion München
Ltd. BD Dipl.-Ing. (FH) Peter Bachmeier

E-Mail: bfm.vb-leitung.kvr@muenchen.de

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	3
2	Vorwort.....	3
3	Wasserstoff – Eigenschaften	4
4	Wasserstoff – Herstellung, Speicherung/ Lagerung, Transport, Verwendung	6
4.1	Herstellung.....	6
4.2	Speicherung/Lagerung.....	6
4.3	Transport	6
4.4	Wasserstoff und seine Verwendung.....	6
5	Wasserstoff – Gefahren/Risiken/Szenarien	9
5.1	Austritt von Druckgas ohne Entzündung	9
5.2	Austritt Stichflammen/Explosion.....	9
5.3	Explosion/Behälterzerknall	10
5.4	Austritt von tiefkaltem Wasserstoff	10
5.5	Wasserstofffreisetzung in Tiefgaragen und Tunneln	10
5.6	Fahrzeuge mit Wasserstoff	11
6	Empfehlungen zur Gefahrenabwehr	11
6.1	Erkundung	13
6.2	thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtung (TPRD)	15
6.3	Abstände.....	15
6.4	Kennzeichnungen	16
6.5	Wasserstoffspezifische Maßnahmen.....	17
7	Empfehlungen zur Gefahrenvorbeugung und Einsatzplanung	20
7.1	Gaswarnanlagen bzw. Gaswarngeräte	22
7.2	Abnahmen und Stellungnahmen	23
7.3	Einsatzplanung	23
8	Ausbildung der Feuerwehren.....	24
9	Weiterführende Informationen	25
10	Überarbeitung	26
11	Anhänge.....	28
11.1	Wasserstoff Merkblatt	29
11.2	Einsatzhinweise - Zusammenfassung	30
11.3	Leitfragen Gefahrenvorbeugung	32

1 Zusammenfassung

Der Leitfaden für die Feuerwehren „Wasserstoff und dessen Gefahren“ mit dem Bearbeitungsstand Oktober 2008 ist durch aktuelle Entwicklungen deutlich zu überarbeiten. Insbesondere greifen auch DVGW und andere Organisationen darauf zu und daher ist eine Neufassung dringend erforderlich.

Wesentlich für die Neufassung ist die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2020 und der Überarbeitung aus dem Juli 2023, der Europäische Leitfaden für Notfallmaßnahmen HyResponse-Guide (+HyTunnel), sowie die neuesten Entwicklungen zur Speicherung von Wasserstoff.

2 Vorwort

Die Anwendungen von Wasserstoff sind so vielseitig wie das Element selbst. Wasserstoff wird zum Beispiel in der Industrie bereits lange zur Herstellung von Düngemitteln und zur Raffinierung von Mineralöl verwendet.

Mit der nationalen Wasserstoffstrategie und deren Überarbeitung schafft die Bundesregierung einen Handlungsrahmen für die künftige Erzeugung, den Transport, die Nutzung sowie die Weiterverwendung von Wasserstoff und damit für die entsprechenden Innovationen. Die Energieträger der Zukunft sind – hier genügt ein Blick in die Sicherheitsdatenblätter – leicht entzündbare Gase, die zunehmend häufiger und in größeren Mengen gelagert und transportiert werden. Regenerativ erzeugter Wasserstoff kann einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung und Klimaschutz leisten – als Kraftstoff für Fahrzeuge, Rohstoff für die Industrie oder Brennstoff zur Wärmeerzeugung bzw. Kraft-Wärme-Kopplung. Als vielseitiger Energieträger ist er in verschiedensten Sektoren einsetzbar und übernimmt somit eine Schlüsselfunktion in der Energiewende. In Power-to-Gas-Anlagen wird grüner Wasserstoff CO₂-neutral aus Erneuerbaren Energien gewonnen, die sich großskalig speichern, sowie in Gasnetzen gut und über weite Strecken transportieren lassen.

Der vorliegende Leitfaden basiert auf dem Leitfaden der AGBF „Wasserstoff und dessen Gefahren“ aus dem Jahre 2008 und auf den neuesten Erkenntnissen auf internationaler Ebene. Hier haben in den letzten Jahren Feuerwehren aus vielen Ländern an einem einheitlichen Leitfaden mitgearbeitet und diesen bereits mehrfach aktualisiert und erprobt.

Dieser Leitfaden soll den Einsatzkräften helfen, bei Einsätzen mit Wasserstoff sicher und angemessen zu reagieren. Der Arbeitskreis nimmt gerne Anregungen für eine Fortschreibung des Leitfadens auf. Die Fortschreibung des Leitfadens wird aufgrund der laufend neuen Erkenntnisse nach spätestens 2 Jahren empfohlen.

Die Inhalte dieses Leitfadens wurden erarbeitet von einer Arbeitsgruppe im FA VB/G der deutschen Feuerwehren.

Mit diesem Leitfaden werden keine Gefahren durch die Isotope des Wasserstoffes betrachtet.

3 Wasserstoff – Eigenschaften

Das Wasserstoffatom ist das kleinste und leichteste Element und tritt als Reinstoff als Molekül auf. Durch den einfachen Atomaufbau hat der Wasserstoff viele herausragende Eigenschaften.

Physikalisch

Das Wasserstoffatom und damit auch das zweiatomige Wasserstoffmolekül sind sehr klein und leicht. Dies führt zu einer geringen Dichte des Gases. Unterhalb von -253 °C liegt Wasserstoff als Flüssigkeit vor, die ebenfalls eine geringe Dichte aufweist.

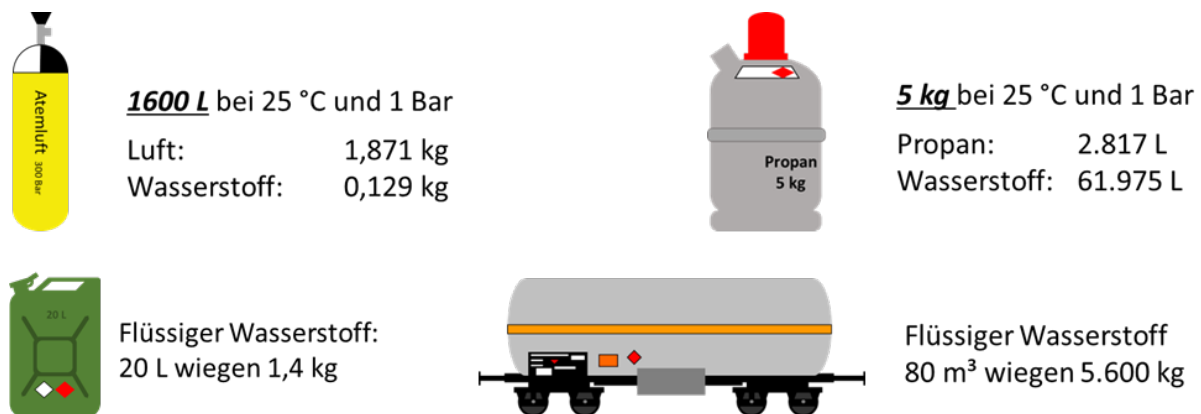


Abb.1: Vergleich von verschiedenen Gasen mit Wasserstoff

Gasförmiger Wasserstoff steigt in Luft schnell auf (ca. 14 x leichter), ist, farb- und geruchslos und nicht toxisch. Er verdrängt aber Sauerstoff und kann in entsprechend hoher Konzentration erstickend wirken. Im Gegensatz zu Erdgas wird Wasserstoff bisher nicht odorisiert. Wasserstoff in der Umgebungsluft ist daher mit den menschlichen Sinnen nicht wahrnehmbar.

Der Auftrieb ist der wichtigste Sicherheitsvorteil von Wasserstoff, d.h. im Normalfall einer Freisetzung steigt er auf und verteilt sich schnell. Die Freisetzung in geschlossenen Räumen bedarf einer besonderen Betrachtung.

Wasserstoff hat ein hohes Diffusionsvermögen. Er kann sich nach dem Austreten schnell mit der Umgebungsluft zu einem explosionsfähigen Gemisch vermischen, durchdringt die Polymerstruktur von Kunststoffen bzw. Bauteile über Poren und Risse im Material. Einige metallische Werkstoffe können unter längerem Einfluss von Wasserstoff verspröden.

Tritt tiefkalter Wasserstoff aus, wird die Flüssigkeit aufgrund der geringen Verdampfungsenthalpie (0,9 kJ/mol) zügig in den gasförmigen Zustand übergehen. Die Dichte von gasförmigen Wasserstoff nach dem Verdampfen unterscheidet sich nur in geringem Maße von der Umgebungsluft, sodass kein ausgeprägtes Schwergasverhalten, wie beispielsweise das von Kohlendioxid, zu erwarten ist.

Wasserstoff weist mit 4-75 Vol.% einen außergewöhnlich weiten Explosionsbereich bei einer sehr geringen Zündenergie auf. Verschiedene Literaturstellen beschreiben, dass bereits die elektrostatische Aufladung des ausströmenden Gases zur Zündung ausreichen können, weshalb bei einer Leckage immer mit einer spontanen Zündung gerechnet werden muss. Die Zündtemperatur liegt mit 585 °C in einem ähnlichen Bereich wie Methan, Propan oder Butan, was der Temperaturklasse 1 (ATEX) entspricht. Bei der Verbrennung erreicht Wasserstoff eine sehr hohe laminare Flammengeschwindigkeit. Insbesondere wenn die freie Ausbreitung des Gases beschränkt wird (z. B. in geschlossenen Räumen) besteht im Vergleich zum

Abbrand von Kohlenwasserstoffen ein wesentlich höheres Risiko für den Umschlag der Verbrennung über die Deflagration in eine Detonation.

Chemisch

Bestimmte Metalle (beispielsweise Platinmetalle) können chemische Reaktionen mit Wasserstoff katalysieren und zu einer spontanen Umsetzung ohne Einwirkung einer Zündquelle führen.

Die Wasserstoffflamme hat ebenfalls ungewöhnliche Eigenschaften. Sie strahlt kaum sichtbares Licht und nur wenig Wärmestrahlung ab, dafür aber UV-Strahlung. D. h. die Ausdehnung einer reinen Wasserstoffflamme ist bei Tageslicht für Einsatzkräfte aus der Distanz kaum wahrnehmbar. Brennen gleichzeitig andere Stoffe mit, ist die Flamme sichtbar.

Stoff/ Verbindung	Wasserstoff	Methan (Erdgas/CNG/LNG)	Propan (Bestandteil von LPG/Flüssiggas/Campinggas)
chemische Formel	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
aussehen	farblos	farblos	farblos
Aggregatzustand bei 20 °C	gasförmig	gasförmig	gasförmig
Dichte bei 0°C atmosphärisch [kg/m³]	0,09	0,718	2,01
Dichte der Flüssigkeit (Siedepunkt) [kg/m³]	71	420	581
Heizwert [kWh/Nm³]	3,00	9,97	25,89
Heizwert [kWh/kg]	33,33	13,9	12,88
Siedetemperatur [°C]	-252,7	-161,5	-42
Zündtemperatur [°C]	585	595	470
Zündenergie [mJ]	0,02	0,28	0,24
UEG in Luft [Vol. %]	4	5	1,7
OEG in Luft [Vol. %]	75	15	10,9
Detonationsbereich [Vol. %]	18 - 59	6,3 - 13,5	2,2 - 9,2

Tabelle 1 - Sicherheitstechnische Werte von Wasserstoff, (Methan), (Propan), eigene Zusammenfassung

4 Wasserstoff – Herstellung, Speicherung/ Lagerung, Transport, Verwendung

4.1 Herstellung

Wasserstoff im industriellen Maßstab wird heute hauptsächlich mittels Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen. Alternativ kann Wasserstoff auch mit Strom im Elektrolyseverfahren erzeugt werden. Dabei wird Wasser mittels Stroms in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Anlagen für die Elektrolyse werden Elektrolyseure genannt.

Für den häuslichen Gebrauch als Energieträger sind zwei verschiedene Systeme gängig:

Einige Firmen (z. B. Viessmann und Buderus) bieten Brennstoffzellenheizungen an, die über einen integrierten Reformator den Wasserstoff unmittelbar in der benötigten Menge aus Erdgas darstellen. Andere Systeme (z. B. Picea von HPS), für eine autarke Energieversorgung von Gebäuden, wandeln mit einem Elektrolyseur den Strom einer PV-Anlage in Wasserstoff um, der in Stacks (Bündel zu 12 Gasflaschen) gespeichert wird und in der Zeit, in der die PV-Anlage nicht ausreichend elektrische Energie für das Gebäude liefert, über eine Brennstoffzelle zu Stromerzeugung genutzt werden. Dieses Prozessprinzip kann auch in größerem Maßstab als Containeranlage, für die Versorgung von Quartieren bzw. mit Anbindung an großflächige PV-Anlagen oder Windparks angewendet werden.

4.2 Speicherung/Lagerung

Wasserstoff wird im Wesentlichen entweder gasförmig in Druckbehältern (Flaschen, Flaschenbündel, Flaschenkörbe) bei bis zu 1000 bar oder in flüssiger Form bei -253 °C in isolierten Behältern (Kryostaten) gespeichert. Tendenziell wird bei mobilen Anlagen mit temporärem Verbrauch (z. B. als Kraftstoff für Kfz) eher mit Druckbehältern gearbeitet, bei stationären Anlagen mit kontinuierlichem Verbrauch werden auch Kryostaten verwendet.

Zur Lagerung großer Mengen Wasserstoffgas laufen Versuche in Kavernen. Weitere Möglichkeiten Wasserstoff zu speichern bestehen durch die Anwendung von Zeolithen, Hydriden (Metallhydride, Ammoniak) oder LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers), diese Systeme sind aber noch nicht in der breiten technischen Anwendung, sondern eher im Prototypen- oder Technikums-Maßstab in der Erprobung.

4.3 Transport

Der Transport von Wasserstoff findet in entsprechenden Behältern mit allen Verkehrsträgern statt. Aktuell sind Sattelaufleger bzw. 40'-Container die größten Gebinde, die regelmäßig verkehren. Spezielle Güterwaggons oder Schiffe für den ausschließlichen Transport von Wasserstoff gehören noch nicht zum Standard.

Der rohrleitungsgebundene Transport erfolgt teils in eigenem Gasnetz, teils in bestehenden und geeigneten Gasnetzen. Eine Qualifizierung bzw. Ertüchtigung des vorhandenen Erdgasnetzes (Nahversorgungsnetz und Fernleitungen) für die Umwidmung auf Wasserstoff findet derzeit statt.

4.4 Wasserstoff und seine Verwendung

Die Wasserstofftechnologie wird aktuell mit der Perspektive für einen universellen, klimafreundlichen, wirtschaftlich einsetzbaren Energieträger weiterentwickelt. Vielfältig wird er bereits dort eingesetzt, wo Energie benötigt wird oder überschüssig zur Verfügung steht (regenerative/erneuerbare Energien). Konkrete Anwendungen gibt es in der Gebäudeversorgung, Mobilität und Transport (primär Züge und schwere Nutzfahrzeuge, aber auch PKW, Luftfahrt-Anwendung ab 2030 angekündigt). In der chemischen Industrie wird Wasserstoff beispielsweise zur Ammoniak-Synthese, in der Mineralölveredelung und zur Fetthärtung eingesetzt. Geplant ist der Einsatz in der Stahlverhüttung anstelle von Koks.

4.4.1 Mobilität und Wasserstofftankstellen

Die Bereitstellung von Wasserstoff für die Mobilität erfolgt an öffentlichen oder nichtöffentlichen Wasserstoff-Tankstellen (HRS - hydrogen refilling stations). Sie können als feste Anlagen, als Containeranlagen oder mit einem Sattelaufleger als Wasserstofftank realisiert werden. Es werden üblicherweise ca. 400 kg Wasserstoff bei mittlerem Druck zwischengespeichert. Für den Tankvorgang werden Teilmengen auf Drücke bis zu 1000 bar verdichtet. Die Zapfpunkte sind nur im Betankungsfall mit Brennstoff bis zu einem Druck von bis zu 875 bar bei bis zu -40 °C versorgt und im Ruhezustand drucklos.

In Deutschland existieren zwei Druckniveaus für die Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff. Schwere Nutzfahrzeuge und Züge werden üblicherweise mit 350 bar, leichte Fahrzeuge, wie PKW werden meist bei einem Druck von 700 bar betankt. Es existieren für den Vorgang verschiedene Betankungskonzepte mit unterschiedlicher Technik. Die Tanksäule und die Schnittstelle zum Fahrzeug sind standardisiert.

Um eine schnelle Betankung (z. B. Pkw < 5 Minuten) zu realisieren, muss der hochverdichtete Wasserstoff vorgekühlt werden (typischerweise auf bis zu -40 °C, „Cold Filling“) um die zulässige Betriebstemperatur des Fahrzeugtanks bei der Entspannung des Gases während des Tankvorgangs nicht zu überschreiten.

Der Wasserstoffantrieb von Fahrzeugen beruht in der Regel auf folgenden Konzepten:

- H₂-System mit einem 700-bar-H₂-Speichertank und mit Brennstoffzelle und Akkumulator als Zwischenspeicher
- Hybrid-Elektrofahrzeuge, die primär über einen Lithium-Ionen-Akkumulator mit Energie versorgt werden und einen H₂- Range-Extender mit einem H₂-Speichertank besitzen
- Fahrzeuge die mit Wasserstoff aus einem H₂-Speichertank über einen modifizierten Verbrennungsmotor angetrieben werden.

Die Betankung von Fahrzeugen mit kryogenem Wasserstoff ist relativ aufwändig und derzeit Experimentalfahrzeugen vorbehalten.

Druckbehälter für Wasserstofffahrzeuge sind häufig aus Verbundwerkstoffen (CFK-umwickelte Liner aus Metall bzw. Kunststoff) aufgebaut, die empfindlich auf thermische Belastung reagieren (Typ 2, 3 oder 4- Behälter), bzw. durch Brandzehrung geschwächt werden können. Tanks für Lagerung, Transport und Umschlag von Wasserstoff im Bestand bestehen meist aus metallischen Werkstoffen (Typ 1-Behälter). Diese sind weitgehend unempfindlich gegenüber einer Beflammung. CFK-umwickelte Kunststoffbehälter (Typ 4-Behälter) gewinnen allerdings zunehmend an Bedeutung.

Während in Druckgasbehältern auf Transportfahrzeugen weder Druckentlastungsventile noch eine Schmelzsicherung integriert sind, haben Druckbehälter für Wasserstofffahrzeuge in der Regel sowohl Druckentlastungsventile (Berstscheibe) als auch eine temperatúrausgelöste (ca. 110 °C) Schmelzsicherung (TPRD). An langen Behältern z. B. von schweren Nutzfahrzeugen, können auch zwei TPRD verbaut sein. Die Abströmöffnung wird in der Regel bei PKW nach unten und bei schweren Nutzfahrzeugen meist nach oben, seltener nach unten gerichtet sein. TPRDs sind darauf ausgelegt, den Tank innerhalb von kurzer Zeit (~Minuten) zu entleeren und setzen dementsprechend große Gasmengen in die Umgebung frei.

Zurzeit fehlt Praxiserfahrung, wie sich Druckbehälter von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen innerhalb eines realen Brandereignisses bzw. nach Einwirkung eines Unfalls verhalten. Insbesondere ist nicht geklärt, welche Umstände das Behälterversagen ohne Auslösung der Sicherheitseinrichtungen begünstigen können.

Fahrzeug	Brennstoffmasse	Speicherart	Druck
PKW	Ca. 5 kg	Druckgas	700 bar
LKW	Ca. 15 bis 100 kg	Druckgas	350 oder 700 bar
Züge	Ca. 150 bis 200 kg	Druckgas	350 bar
Wasserfahrzeuge	In der Entwicklung	Druckgas oder Metallhydrid	-
Luftfahrzeuge	In der Entwicklung	Druckgas oder tiefkalt	-

Tabelle 2: typische Wasserstoffmengen in Fahrzeugen

4.4.2 Brennstoffzellen/Elektrolyseur

Die Funktionsweise einer Brennstoffzelle ist der umgekehrte Prozess der Elektrolyse. Sie erzeugen durch eine kontrollierte Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff (katalytische Verbrennung) in erster Linie elektrische Energie. Die Brennstoffzelle erreicht abhängig von der verwendeten Brennstoffzellentechnologie Temperaturen von üblicherweise bis zu 80 °C. Stationäre Anwendungen arbeiten teilweise auch mit Brennstoffzellen die 600 °C Betriebstemperatur überschreiten können.

Das in Reihe schalten von mehreren Brennstoffzellen, in sogenannten Stacks, dient der Erzeugung von höheren Spannungen und somit der universellen Nutzbarkeit der erzeugten elektrischen Energie.

Elektrolyse ist ein Prozess, bei dem durch die gezielte Verwendung von elektrischem Strom eine chemische Reaktion ausgelöst wird. Sie hat viele verschiedene Anwendungen in der chemischen Produktion. Bei der Elektrolyse von Wasser wird an der Kathode Wasserstoff erzeugt, während an der Anode Sauerstoff entsteht. Um unerwünschte chemisch-physikalische Hemmnisse zu unterbinden, wurden verschiedenen Verfahrensprozesse entwickelt.

Einige der bekanntesten Verfahren sind:

- **Alkalische Elektrolyse:** Alkalische Elektrolyse ist ein Verfahren, bei dem ein elektrischer Strom durch eine alkalische Lösung geleitet wird, um Wasserstoffgas zu erzeugen.
- **Protonenaustauschmembran-Elektrolyse:** Protonenaustauschmembran-Elektrolyse ist ein Verfahren, bei dem ein elektrischer Strom um eine ionenleitende Protonenaustauschmembran geleitet wird, um Wasserstoffgas zu erzeugen.
- **Festoxid-Elektrolyse:** Festoxid-Elektrolyse ist ein Verfahren, bei dem ein elektrischer Strom um ein ionenleitendes Festoxid geleitet wird, um Wasserstoffgas zu erzeugen.

Jedes dieser Verfahren hat seine eigenen Vor- und Nachteile und wird bei der Wasserstoffproduktion verwendet.

4.4.3 Entwicklung

In den Medien und Forschungsberichten werden aktuell viele weitere Projekte und Anwendungsbereiche vorgestellt, die in Zukunft an Relevanz gewinnen könnten, wie die Versorgung von Quartieren mit angeschlossener Produktion, Speicherung und Verwendung zur Energieerzeugung (elektrisch und thermisch), diverse Mobilitätskonzepte (Flugzeuge, Schiffe), der Transport über Pipelines und für industrielle Großabnehmer (Stahlindustrie, Betonherstellung, etc.).

Power-to-Gas (PtG) ist in diesem Zusammenhang eine Schlüsseltechnologie der Energiewende. Sie wandelt überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien in speicherbare Gase um, vor allem Wasserstoff (H_2) und Methan (CH_4). Herzstück ist die Elektrolyse, bei der Wasser mithilfe von Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Elektrolyseure sind in verschiedenen Größenordnungen (von kleinen Einheiten bis zu großen Industrieanlagen) verfügbar. Der Wasserstoff kann mit Kohlendioxid (CO_2) zu Methan umgewandelt werden, einem Hauptbestandteil von Erdgas. Die Gase lassen sich in

bestehenden Erdgasnetzen speichern und für verschiedene Anwendungen wie Wärmeversorgung, Industrieprozesse, Mobilität (Tankstellen, Brennstoffzellen- und Gasmotoren) und Rückverstromung nutzen. PtG-Anlagen tragen zur Sektorenkopplung bei, indem sie Strom-, Wärme- und Gassektor verbinden. Sie ermöglichen die langfristige Speicherung großer Energiemengen und können unter anderem zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen.

5 Wasserstoff – Gefahren/Risiken/Szenarien

Wasserstoff ist ein nichttoxisches, hochentzündliches Gas, dass tiefkalt verflüssigt oder unter Druck gelagert wird. Bei der Verbrennung von Wasserstoff mit dem Sauerstoff aus der Luft bei Temperaturen bis zu 3.000 °C entsteht primär Wasser, Stickoxide als Nebenprodukt sind möglich.

Es ergeben sich im Zusammenhang mit Wasserstoff folgende Risiken:

- Druckgase / Druckbehälterzerknall
- Tiefkalte Flüssigkeiten / Erfrierungsgefahr
- Verdrängung von Sauerstoff durch freigesetztes Gas bzw. Wasserdampf als Verbrennungsprodukt, mit dem Risiko der Anoxie bei deren Freisetzung in geschlossenen Räumen
- herabgesetztes Risikoempfinden aufgrund mangelnder Wahrnehmbarkeit von Wasserstoff in der Umgebungsluft
- Explosionsgefahr bei Gasfreisetzung, besonders in geschlossenen Räumen
- Abbrand von Druckgas mit langer Flamme und erheblicher Geräuscentwicklung, infolge des hohen Lagerdruck, abgeleitet hieraus:
 - herabgesetztes Risikoempfinden bezogen auf die Wirkung der Flamme, da sie atypisch eine geringe Energieabstrahlung im Vergleich mit kohlenstoffhaltigen Brennstoffen zeigt.
 - herabgesetzte Kommunikationsmöglichkeit mit Personen in der Nähe des Druckgaslecks

Die Kennzeichnung von Anlagen, die Wasserstoff enthalten, ist in Anlage 1 dargestellt.

5.1 Austritt von Druckgas ohne Entzündung

Im Freien wird unverbrannter Wasserstoff schnell aufsteigen. Der gefährdete Bereich bleibt eng begrenzt. Bereits Überdachungen (z. B. Tankstellendächer) oder Vordächer können jedoch, aufgrund des großen Explosionsbereiches von Wasserstoff, die Bildung eines explosionsfähigen Gemisches fördern.

In geschlossenen Räumen bildet sich ein explosionsfähiges Gemisch beginnend von der Decke. Auch benachbarte Räume können betroffen sein, da sich Wasserstoff durch Risse und Spalten in Bauteilen ausbreiten kann. Die Gefahr durch die sauerstoffverdrängende Wirkung des Wasserstoffs erscheint untergeordnet.

5.2 Austritt Stichflammen/Explosion

In der Regel wird Wasserstoff brennend aus einem Leck austreten. Besonders der heiße Wasserdampf kann mit einer Wärmebildkamera sichtbar gemacht werden und somit zur Abgrenzung des Gefahrenbereichs herangezogen werden. Die Flamme sollte nach Möglichkeit nicht gelöscht werden.

Beim Brand eines Wasserstoffdruckbehälters mit Sicherheitsventil besteht das Risiko, dass es zu einem kontrollierten Abblasen des Wasserstoffs kommt, was mit einer langen Stichflamme verbunden ist. Die Auswirkung auf Einsatzkräfte hängt von deren Reaktion ab: Eine Stichflamme tritt unvermittelt und unter lautem Zischen auf, bei einer sofortigen Flucht dürften nur geringe Verletzungen zu erwarten sein.

5.3 Explosion/Behälterzerknall

Der Behälterzerknall von Tanks oder Leitungen unter einem typischen Druck von 700 bar kann zu schweren Verletzungen aufgrund der Druckwelle (Gasfreisetzung, Explosion) oder umherfliegende Trümmer führen. Es besteht Lebensgefahr im Nahbereich.

5.4 Austritt von tiefkaltem Wasserstoff

Flüssiger Wasserstoff wird in der Regel bei ortsfester Lagerung im Bereich von Industrie und Forschung eingesetzt. Die Kühlung unter den Siedepunkt erfolgt meist unter Nutzung der Verdunstungskälte. Hierbei ist zu beachten, dass ständig gasförmiger Wasserstoff freigesetzt wird (Boil off) der entweder ins Freie abgeleitet oder direkt oxidativ umgesetzt wird. Diese Freisetzung darf nicht durch ein Verschließen der Abströmöffnung unterbunden werden, da sonst in Folge eines Druckanstiegs ein Behälterversagen erfolgen kann. Mischformen aus Kryo- und Überdrucklagerung werden experimentell erprobt.

Der Bereich, in dem sich ein explosionsfähiges Gemisch bilden kann, ist immer sehr viel größer als beim Austritt von Druckgas, da das kalte Gas aufgrund höherer Dichte langsamer aufsteigt.

Hautkontakt mit flüssigem Wasserstoff oder Gegenständen, die sich durch den Kontakt mit Wasserstoff abgekühlt haben, führt zu Kälteschäden (Kälteverbrennungen). Schmuck aus Metall (Ringe, Ohrschmuck) kann aufgrund des Wärmeleitverhaltens vieler Metalle zu einer erhöhten Gefährdung führen. Aufgrund der Stoffeigenschaften und der aktuell zu erwartenden Lagermengen ist eine ausgeprägte Lachenbildung in Folge einer Wasserstofffreisetzung bis zum Eintreffen der ersten Einsatzkräfte unwahrscheinlich. Verflüssigter Wasserstoff wird zügig verdampfen und aufsteigen. Es kann sich aber ein kaltes, explosionsfähiges Luft-Wasserstoff-Gemisch in Form eines Nebels eine gewisse Zeitspanne (~Minuten) am Boden halten.

5.5 Wasserstofffreisetzung in Tiefgaragen und Tunneln

Eine Wasserstofffreisetzung in umschlossenen und teilumschlossenen Räumen von Verkehrsanlagen führt zu einer Verschärfung der Gefahrenlage bezüglich einer Explosion bzw. der Brandausbreitung.

Trotz -in der Regel- geschützten Einbaus können Wasserstofftanks durch einen Verkehrsunfall zum Bersten gebracht werden oder undicht werden und Freisetzungen verursachen. Die unmittelbare Gefahr durch einen Behälterzerknall in Folge der Unfalleinwirkung ist für Einsatzkräfte sekundär, sofern die Behälter nicht im Fortgang der Einsatzmaßnahmen selbst beschädigt werden.

Brennt freigesetzter Wasserstoff nicht unmittelbar ab, sind die Bedingungen für die Bildung eines lokalen, zeitlich begrenzten explosionsfähigen Gemisches günstig. Die Ausbreitung einer Druckwelle in einem umschlossenen Raum stellt ein besonderes Risiko dar.

Eine Druckwelle, die sich gerichtet (z. B. durch massive Wände) in nur eine Raumrichtung ausbreitet, setzt sich mit fast unverminderter Wucht bis zu einer Entlastungsöffnung fort und kann damit auch noch in großer Entfernung zum Entstehungsort wirken; in diesem Bereich besteht Lebensgefahr. Kommt es zu einer Detonation in einem Tunnel, setzt sich daher die Druckwelle (Überdruck mehrere Bar) mit nahezu unverminderter Energie bis zu den Portalen fort. Damit ist der gesamte Tunnel, die Querschläge und die Umgebung der Portale als Gefahrenbereich einzustufen. Bei Tiefgaragen kann die Standsicherheit durch die Energie einer Druckwelle beeinträchtigt werden.

Kommt es in Folge eines Fahrzeugbrandes in einer Tiefgarage oder einem Tunnel zur Auslösung einer Sicherheitseinrichtung (TPRD) an einem Wasserstofftank, wird durch die erhöhte Zufuhr von Brennstoff eine erhebliche Steigerung der Brandintensität herbeigeführt. Aufgrund der mangelnden Möglichkeit der Wärmeabfuhr besteht eine hohe Ausbreitungsgefahr. Wie sich Gasdruckbehälter in Folge dieser Beflammung verhalten (Eigenbeflammung oder Auswirkung des Brandes eines benachbarten Fahrzeuges) ist noch

nicht hinreichend untersucht. Eine Ausweitung des Schadensereignisses erscheint jedoch plausibel.

Beim Brand eines Wasserstoffdruckbehälters besteht das Risiko, dass es zu einem kontrollierten Abblasen des Wasserstoffs kommt, was mit einer langen Stichflamme verbunden ist. Die Auswirkung auf Einsatzkräfte hängt von deren Reaktion ab: Eine Stichflamme tritt unvermittelt und unter lautem Zischen auf, bei einer sofortigen Flucht dürften nur geringe Verletzungen zu erwarten sein.

Die z. Zt. am schwierigsten einzuschätzende Auswirkung ist das Bersten eines beflamten Druckbehälters mit sofortiger Zündung in einem teilverbauten Raum, da Realversuche hierzu nur sehr aufwändig durchzuführen sind.

5.6 Fahrzeuge mit Wasserstoff

Fahrzeuge werden in Ihrer Konstruktion immer stabiler und komplexer. Um damit einhergehenden Risiken entgegenzuwirken, gewinnt die Bereitstellung standardisierter und unkompliziert verfügbarer Informationen über den Aufbau eines Fahrzeugs an Bedeutung. Aus diesem Grund stellen Automobilhersteller "Rescue Sheets" (Rettungsdatenblätter) zur Verfügung. Kombiniert mit einer Kennzeichenabfrage, beispielsweise über das Kraftfahrtbundesamt, für ein verunfalltes Fahrzeug können Einsatzkräfte mit Hilfe des Rettungsdatenblattes bereits auf der Anfahrt wichtige Informationen über mögliche Gefahren erlangen und Gegenmaßnahmen vorbereiten.

Der Internationale Feuerwehrverband (CTIF) empfiehlt die Rettungsblätter der Hersteller "Euro Rescue".

Eine Besonderheit bei Bränden bilden die TPRDs. Bei Fahrzeugtanks, die mit einem TPRD ausgestattet sind, könnte das zur Brandbekämpfung oder bei Kühlmaßnahmen eingebrachte Wasser das TPRD stärker abkühlen als die Druckgasbehälter, somit das TPRD in der Funktion einschränken und einen Druckbehälterzerknall begünstigen. Das Bersten eines 350-bar-Behälters mit anschließender Explosion nach Schwächung der Verbundwerkstoffhülle in einem Feuer wurde experimentell dargestellt. Der Radius des Trümmerfeldes betrug ca. 100 m. Ob in Folge des Behälterversagens unmittelbar eine Detonation möglich ist, bedarf weiterer Forschung.

6 Empfehlungen zur Gefahrenabwehr

Wie die vorigen Abschnitte zeigen, ist Wasserstoff sehr vielseitig einsetzbar. Für die Gefahrenabwehr ergibt es Sinn Synergieeffekte zu nutzen und Interdisziplinär zu denken.

Dieser Leitfaden richtet sich an ausgebildete Einsatzkräfte, denen als Basiswissen die Einsatztaktik im Umgang sowohl mit brennbaren Gasen, unter Druck stehenden Gasen als auch tiefkalten Gasen grundsätzlich bekannt ist. Daher beziehen sich die Empfehlungen zur Gefahrenabwehr daher auf Maßnahmen, die beim Umgang mit Wasserstoff hervorzuheben sind.

Wichtige Informationen für die Gefahrenabwehr können beispielsweise Feuerwehreinsatzplänen oder anderen Unterlagen, wie den Rettungsdatenblättern für Fahrzeuge, Ladepapiere etc. entnommen werden. Darüber hinaus wird für technische Anlagen in der Regel eine sachkundige Beratung gem. FwDV 500 für die Einsatzvorbereitung und –durchführung erforderlich sein. Ebenso entbindet dieser Leitfaden nicht von der in der FwDV 500 festgeschriebenen Verpflichtung, Feuerwehr- und Einsatzpläne für besondere Objekte aufzustellen, die im speziellen Einzelfall zu einer abweichenden Gefährdungsbeurteilung kommen können.

Bei den derzeit angebotenen Gasmessgeräten können jeweils Sensoren, die auf katalytischer Wärmetönung basierend explosionsfähige Gemische detektieren oder elektrochemische Kohlenmonoxidsensoren zum Spüren geeignet sein. Sensoren, die auf Infrarotmesstechnik basieren, sind entsprechend der Hinweise aus der FBRCI-030 zum

Einsatz von Gaswarngeräten zur Messung von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen in Umgebungsluft in der Regel für die Messung von Wasserstoff ungeeignet. Dies sollte jedoch anhand der Bedienungsanleitung oder im Gespräch mit den Herstellern verifiziert werden.

Neben den allgemeinen Verhaltensgrundsätzen für den Umgang mit brennbaren Druckgasen sind folgende Maßnahmen beim Risiko für den Austritt von Wasserstoff unter Druck grundsätzlich geboten:

Ein Leck eines Druckgasbehälters oder einer Leitung mit relevanter Größe wird in der Regel auch aus der Distanz deutlich hörbar sein. Einsatzkräfte, die sich der Leckstelle nähern tragen vollständige PSA mit Atem- und Gehörschutz, sind in die besondere Gefahrenlage eingewiesen und haben einen eindeutigen Einsatzauftrag, da bei Annäherung an die Leckstelle aufgrund der Geräuschkulisse unter Umständen keine verbale Kommunikation möglich ist.

Grundsätzlich wird ein Löschangriff aufgebaut, um die Umgebung eines Brandes kühlen und Sekundärbrände löschen zu können. Die notwendige Wasserabgaberate ergibt sich aus dem Gefahrenpotenzial an der Einsatzstelle und ist nicht allgemein festzulegen. Als Richtwert kann ein Wert von 15 l/m² bei Beflammung und 1,5 l/m² für Kühlmaßnahmen in der Umgebung angenommen werden.

Da austretender Wasserstoff wahrscheinlich brennend austritt, wird die Einsatzstelle mit einer Wärmebildkamera erkundet und überwacht, der Wirkbereich der Gasflamme wird festgelegt.

Unabhängig davon, ob der Wasserstoff tatsächlich brennend austritt, wird für den Fall, dass auch unverbrannter Wasserstoff freigesetzt wurde, insbesondere in Gebäuden, immer mit Hilfe von geeigneten Messgeräten oberhalb der Austrittsstelle großflächig erkundet.

Neben den allgemeinen Verhaltensgrundsätzen für den Umgang mit brennbaren, tiefkalten Gasen sind folgende Maßnahmen beim Risiko für den Austritt von tiefkaltem Wasserstoff geboten:

Nur ein sehr massives Leck aus einem großen Reservoir wird zu einer Lachenbildung außerhalb einer Anlage führen, die auch beim Eintreffen von Einsatzkräften noch ein Volumen umfasst, dass zu einsatztaktisch gesondert zu würdigen ist.

Auch -253 °C kalter Wasserstoff ist hochentzündlich, die Wahrscheinlichkeit für die Freisetzung ohne Zündung ist aber ungleich höher als beim Austritt von Druckgas, weshalb insbesondere in Gebäuden hohe Explosionsgefahr herrscht.

Es sind ebenfalls Wärmebildkamera und Gasmessgerät zur Erkundung einzusetzen.

Aufgrund physikalischer Eigenschaften wird kryogen gelagerter Wasserstoff zunächst über einer Lache eine für die Freisetzung tiefkalter Flüssigkeiten charakteristische, explosionsfähige Gas-Nebel-Wolke bilden, die dann zeitnah aufsteigen wird.

Die sichtbare Nebelwolke muss nicht identisch mit der Wasserstoffwolke sein. Sie kann aber die Sicht auf die Einsatzstelle behindern und das sichere Bewegen in der Einsatzstelle durch Verdecken von Hindernissen erschweren.

Eine Ausbreitung des Gases nach unten, z.B. in die Kanalisation oder Arbeitsgruben, ist nicht zu erwarten. Transportfahrzeuge, die kryogenen Wasserstoff transportieren, sind mit Sicherheitsventilen ausgestattet. Löst das Sicherheitsventil aufgrund direkter Beflammung aus, besteht höchste Gefahr für einen Bleve, weil der Öffnungsquerschnitt des Ventils nicht geeignet ist, um den Tank ausreichend schnell zu entleeren. Sofortige Deckung in sicherer Entfernung ist dringend geboten.

Nachfolgend werden allgemeine Hinweise zur Erkundung, zu Abständen und Sicherheitseinrichtungen (TPRD) gegeben sowie bei den Einsatzmaßnahmen die Szenarien Wasserstoffaustritt brennend, nicht brennend und tiefkalt betrachtet.

6.1 Erkundung

Aufgrund der wasserstoffspezifischen Eigenschaften ist es besonders wichtig festzustellen, ob Wasserstoff an der Einsatzstelle vorhanden ist bzw. austritt. Dazu sollten die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Art des Austritts (brennend, nicht brennend, Fahrzeugtank, ausgelöste Sicherheitseinrichtung, abgerissene Wasserstoffleitungen usw.)
- Eine Abfrage zu verwendeten Energieträgern sollte schon im Rahmen der Notrufabfrage erfolgen. (Hinweis auf Brennstoffzelle bedeutet auch Wasserstofftank)
- Bei Fahrzeugen Anwendung der AUTO-Regel, bei Pkw sind die Tanks unter dem Fahrzeug, bei Bussen oben und bei Lkw unten oder hinter der Kabine stehend angebracht.
- Raumkennzeichnung für Lagerorte von brennbaren Gasen im gewerblichen Bereich
- Festverlegte Leitungen für Wasserstoff sind gelb mit Zusatzfarbe Rot gekennzeichnet, Beschriftung schwarz
- Kennzeichnung von Gasflaschen, Fahrzeugen und von Lagerbehältern beachten
- Typisches Aussehen von Transportfahrzeugen
- Fahrzeugdatenblätter Beförderungspapiere Gefahrzettel
- Fahrzeugtechnik: Rettungskarte, Crash Recovery System (CRS) nutzen.
- Zur Erkundung immer eine Wärmebildkamera einsetzen.
- Auf untypisches Geräusch oder Geräuschentwicklung achten!
Bei Bedarf Gehörschutz anordnen!
- Nicht durch vermutete Gaswolken laufen und fahren.
- Zur Erkundung und Überwachung mit Wasserstoffmessgerät, einem geeigneten Explosionsgrenzenwarngerät, oder einem geeigneten Mehrgasmessgerät messen.
- Grundsätzlich Windrichtung beachten! Annäherung mit dem Wind! Einschätzung durch den Einsatzleiter möglichst bereits vor dem Ausrücken, damit die Anfahrt möglichst gefahrlos erfolgt, wenn schon durch den Notruf oder Einsatzdokumente bekannt ist, dass Wasserstoff vorhanden ist.
- Festlegen der Gefahrenzone, solange Explosion nicht ausgeschlossen werden kann.
- Prüfen, ob Zündquellen in der Nähe sind.
- Prüfen, ob die Gaszufuhr unterbrochen werden kann.
- Prüfen, ob eine automatische Abschaltung oder Notaus-Einrichtungen vorhanden sind.
- Prüfen, ob anlagenseitige Messeinrichtungen vorhanden sind.
- Prüfen, welche Menge Wasserstoff gelagert ist und welche Lagerbehälter vorhanden sind.
- Prüfen, ob der Einsatz von Lüftungsgeräten / -installationen möglich ist
- Prüfen, ob Wasserstoff in nicht Ex-geschützte Lüftungseinrichtungen gelangen kann.
- Gefahr der Brandausbreitung auf andere Fahrzeuge / Bauwerke beachten.
- Betreiberseitige Spezialisten heranziehen.
- Feuerwehrplan und spezielle Feuerwehreinsatzpläne beachten.

Beispiele Lagerung/Speicherung und Transport:



Bild: Wasserstoffspeicher an einer Tankstelle



Bild: Wasserstofftransport Trailer

Beispiele wasserstoffbetriebene Fahrzeuge (Pkw, Lkw, Busse)



Bild: ENGINIUS Wasserstoff-LKW, Brennstoffzelle - 700bar



Bild: Mercedes Benz GenH2-Truck, Brennstoffzelle, tiefkalt



Bild: CAETANO Bus mit Wasserstoffantrieb – 350 bar



Bild: Toyota Mirai – Brennstoffzellen PKW – 700 bar



Bild: Opel, Transporter mit Brennstoffzellenantrieb



Bild: Innenansicht Motorraum mit Kennzeichnung

6.2 thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtung (TPRD)

Ein zentrales Sicherheitsmerkmal der Wasserstoffspeichersysteme (sowohl für Kraftfahrzeuge als auch für stationäre Anwendungen) sind *Druckentlastungsvorrichtungen (pressure relief devices, PRD)*, die wie folgt definiert sind: Eine PRD ist eine Sicherheitsvorrichtung, die vor einem Versagen eines Speicherbehälters schützt, indem sie bei hohen Temperaturen, hohem Druck oder einer Kombination aus beidem einen Teil oder den gesamten Tankinhalt freigibt. Im Falle eines Brandes sorgt die *thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtung (TPRD)* für eine kontrollierte Freisetzung des gasförmigen Wasserstoffs.

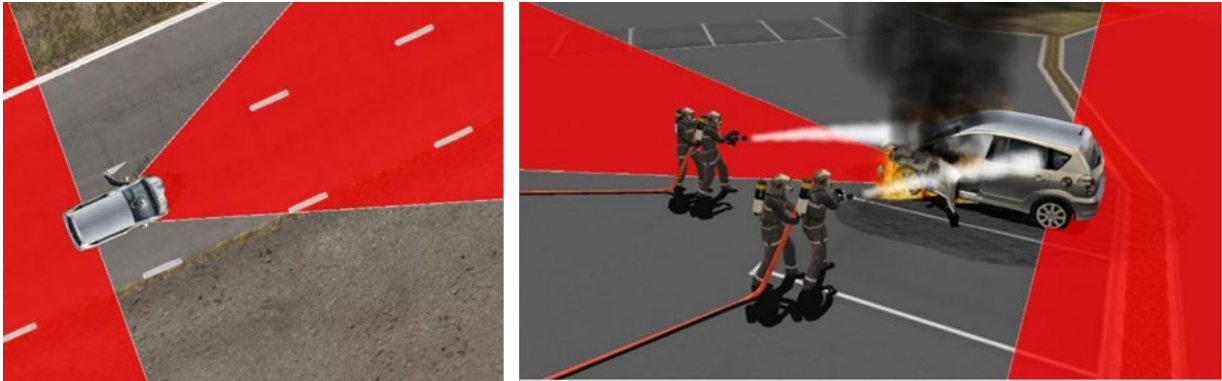


Abb.: Winkel zur Annäherung an ein Wasserstofffahrzeug, Brennstoffzelle, Quelle ERG

Stichflammen aus dem TPRD blasen meist nach hinten/unten/seitlich ab und es sind Längen bis 20 m möglich.

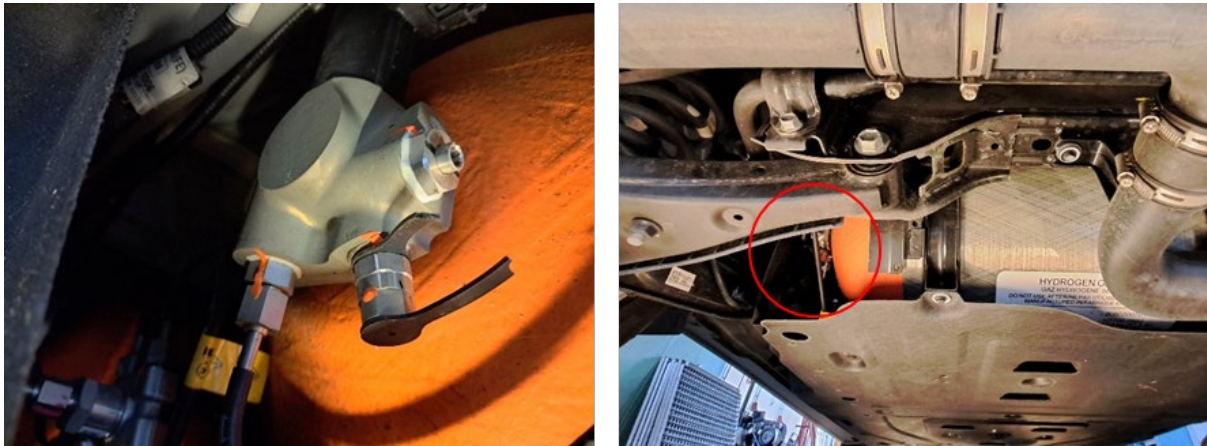


Abb.:Hyundai Nexo, Wasserstofftank mit TPRD

Tanks befinden sich bei Personenkraftwagen meist im Fahrzeugboden, bei Bussen meist auf dem Dach. In anderen Nutzfahrzeugen können sich die Tanks an sehr unterschiedlichen Stellen befinden. Die Entlastungsventile dürfen nicht gekühlt werden. Bei Personenkraftwagen sind die Entlastungsventile kaum zugänglich, bei Bussen und Lastwagen können sie versehentlich getroffen werden. Transportsysteme verfügen in der Regel nicht über ein TRPD.

6.3 Abstände

Bei der Beflammung eines Wasserstoffdruckbehälters von außen besteht die Gefahr eines Behälterzerknalls, sofern die Sicherheitseinrichtung ausfällt.

Wenn größere Mengen Wasserstoff beteiligt sind, sollte dies beim Gefahrenbereich nach Feuerwehr-Dienstvorschrift (FwDV) 500 mitberücksichtigt werden.

Ist bekannt oder wird nach Eintreffen an der Einsatzstelle bekannt, dass die

Sicherheitseinrichtung defekt sein könnte, so werden bei Wasserstoffdruckbehältern Abstände gemäß Emergency Response Guide (Tabelle 3) empfohlen.

Kein Feuer und kein Austritt, Abstand im Regelfall 50 m , auch bei H ₂ -Trailern	
Freisetzung ohne Feuer	Freisetzung mit externer Beflammung
Pkw/Stapler 100 m	Pkw/Stapler 100 m
Bus/Lkw 200 m	Bus/Lkw 200 m
H ₂ -Trailer 100 m	H ₂ -Trailer 500 m
Tankstelle 50 m/100 m	Tankstelle 500 m
Züge 200 m	Züge 200 m

Tabelle 3: Abstandsempfehlungen für Wasserstoffdruckbehälter aus Emergency Response Guide

Bei der Festlegung der Absperr- und Räumungsradien kann der abschirmende Effekt von Objekten/ Gebäuden berücksichtigt werden.

6.4 Kennzeichnungen

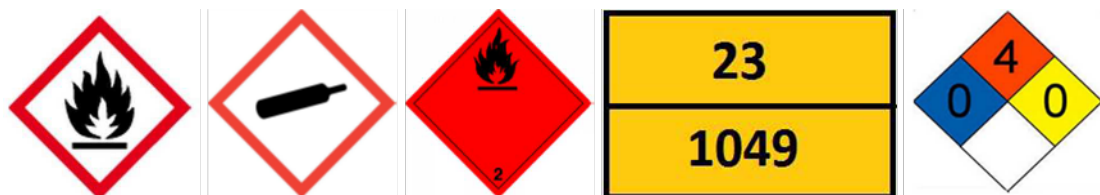
Die nachfolgenden Kennzeichnungen werden im gewerblichen, industriellen und im Transportbereich verwendet.

Übersicht über Gefahrgutkennzeichnungen:

a) Transport- und Lagerkennzeichnungen, verflüssigter Wasserstoff, tiefkalt



b) Transport- und Lagerkennzeichnungen, gasförmiger Wasserstoff



c) Kennzeichnung von Gasflaschen, Rohrleitungen und Warnzeichen



Zusätzlich gibt es noch die Kennzeichnung für ein wasserstoffbetriebenes Fahrzeug nach ISO 17840-4: 2018.



Mit Hinweis-Piktogrammen:

ein Gas leichter als Luft (links),
elektrische Spannung (oben) und
komprimiertes Medium innerhalb eines Druckgasbehälters



Kennzeichnung eines Wasserstofftanks nach ISO 17840-3:2019

Bei Fahrzeugen ist die Kennzeichnung in unmittelbarer Nähe zum Tankdeckel.

Die Kennzeichnung nach ISO 17840-4: 2018 bietet für Einsatzkräfte eine Vielzahl an Informationen und sollte als Standard verwendet werden.

6.5 Wasserstoffspezifische Maßnahmen

Betrachtet werden bei den Einsatzmaßnahmen die Szenarien Wasserstoffaustritt brennend, nicht brennend und tiefkalt.

Das Vorbereiten eines Löschangriffs ist immer notwendig. Dabei ein Strahlrohr zum Kühlen und ein Strahlrohr zum Löschen vorsehen.

Eine Menschenrettung ist unter Beachtung der eigenen Sicherheit (4 A-Regel!) durchzuführen, dabei ist ein Schutzrohr für die eingesetzten Kräfte sicherzustellen.

Es ist immer eine Wärmebildkamera für die eingesetzten Trupps erforderlich.

Für Informationen zum Retten aus PKW/LKW/Bussen und die Brandbekämpfung die Rettungskarten nutzen, dabei das im Regelfall vorhandene Hochvoltssystem beachten.

Die Winkel für die Annäherung an Pkw/Lkw/Busse und Arbeitsmaschinen beachten.

Nur explosionsgeschützte Geräte verwenden.

6.5.1 Austritt nicht brennend

Hinweis: Aufgrund der äußerst geringen Mindestzündenergie von Wasserstoff ist dieser Fall sehr unwahrscheinlich! Ein wesentlicher Faktor für die Gefährdung bei einer eventuellen Zündung ist die Betrachtung der Freisetzung im Freien bzw. in geschlossenen Räumen.

Aufgrund der niedrigen Zündenergie und des weiten Zündbereiches besteht hohe Zündgefahr, in umschlossenen Räumen Explosionsgefahr mit der Tendenz zur Detonation. Nur explosionsgeschützte Geräte verwenden, äußerste Vorsicht beim Umgang mit Metallteilen aller Art.

Im Freien kann abgewartet werden, bis sich der Wasserstoff verflüchtigt hat. Eventuell kann mit Sprühstrahl aus weiter Distanz die Verdünnung beschleunigt werden.

Für „haushaltsübliche Mengen“ (z. B. Füllung eines Kfz-Tanks, >1 kg, <10 kg) wird im Freien ähnlich verfahren, wie beim Leck einer Hausanschlussleitung für Erdgas.

Bei der Freisetzung in geschlossenen Räumen erscheint ein Bereich von 50 bis 100 m um den betroffenen Raum ausreichend. Die Lüftung eines Raumes bzw. eines Gebäudes sollte immer von unten nach oben erfolgen, um die natürliche Auftriebswirkung des Wasserstoffes auszunutzen. Eine Inertisierung eines mit Wasserstoff beaufschlagten Raumes ist aufgrund des großen Zündbereiches nicht sinnvoll.

- Keine nicht Ex-geschützten elektrischen Einrichtungen einschalten!
- Beim Einsatz von hydraulischen Rettungsgeräten akkubetriebene Geräte vermeiden.
- Prüfen, ob Stellen mit erhöhter Temperatur vorhanden sind (150 °C).

- Explosionsgeschützte Gasmessgeräte einsetzen.
- Prüfung ob das TPRD ausgelöst hat.
- Löschangriff zum Schutz der Umgebung vorbereiten!
- Leck schließen, wenn dies gefahrlos möglich ist.
- Bei Großanlagen Inertisierung der Anlage/-teile prüfen.
- Eine natürliche Belüftung, Querlüften herstellen. Auch in Fahrzeugen.
- Über der Austrittsstelle befindliche Bauteile beachten, die die Ausbreitung der Gaswolke nach oben behindern könnten. (Werkstätten, Abfüllstationen, Verbrauchseinrichtungen in Hallen usw.)
- Druckbelüftung und Lüftereinsatz nur nach genauer Risikoabschätzung.
- Das freie Abströmen des Druckbehälterinhalts sollte zur Schadensbegrenzung vermieden werden.

6.5.2 Druckgasaustritt brennend

Die Einsatzmaßnahmen entsprechen dem Basiswissen bei Bränden von Gasen, sofern die Flamme nicht für Sekundärgefahren sorgt. Ein Bersten des Behälters bzw. der Leitung durch die Flamme ist zumindest bei gängigen Behältergrößen im Kilogramm Bereich eher unwahrscheinlich. Drohen benachbarte Behälter durch Beflammung geschädigt zu werden, ist eine umfassende Kühlung notwendig (ca. 15 l/m²). Grundsätzlich lässt man den Wasserstoff abbrennen, schließt die Gaszufuhr und schützt die Umgebung (ca. 1,5 l/m²). Ein Löschen der Flamme (in geschlossenen Räumen) führt sehr schnell zur Bildung eines explosionsfähigen Gemisches. Geht in einem Tank der Wasserstoffvorrat zur Neige, kann es erforderlich sein, den Flammenrückschlag in den Tank zu verhindern. Dies kann wiederum nur durch Ablöschen der Flamme erfolgen. Hierfür wird die Austrittsstelle unter die Zündtemperatur gekühlt und die Flamme vorzugsweise mit Pulver gelöscht. Ein Löschen mit Wasser ist auch möglich, dieses Vorgehen verlangt in der Regel aber praktische Übung. Weitere Gründe eine Wasserstoffflamme zu löschen, bestehen bei einer Menschenrettung oder in der Verhinderung eines schweren Folgeereignisses.

- Prüfen, ob Stellen mit erhöhter Temperatur vorhanden sind (150 °C).
- Explosionsgeschützte Gasmessgeräte einsetzen.
- Prüfung ob das TPRD ausgelöst hat.
- Wasser zur Kühlung und zur Brandbekämpfung bei Umgebungsbrand wegen der Beeinflussung der Druckentlastungseinrichtung nicht auf eine evtl. Austrittsstelle richten.
- Umgebung kühlen/sichern.
- Leck schließen, wenn dies gefahrlos möglich ist.
- Bei Großanlagen Inertisierung der Anlage prüfen.

6.5.3 Wasserstoffaustritt tiefkalt

Der Austritt von kryogenem Wasserstoff ähnelt bezüglich der Explosionsgefahr dem Austritt von nichtbrennendem Druckgas. Allerdings ist er akustisch kaum wahrnehmbar, sodass hier das Risiko besteht, beispielsweise nach dem Öffnen einer Tür zu einem Gefahrstofflager, plötzlich in einer stark angereicherten Atmosphäre zu stehen, ohne dass es zuvor erkennbare Hinweise gab. Während bereits kleine Mengen (<1 kg) beim Kontakt mit der menschlichen Hautoberfläche zu Erfrierungen führen können, erscheint das Risiko für die Schädigung von Bauteilen aufgrund der geringen Verdampfungsenergie und der üblicherweise geringen Lagermenge gering.

Beim Austritt von tiefkaltem Wasserstoff nicht in den Gasstrom greifen, es besteht die Gefahr der Kälteverbrennung von Körperteilen.

Darüber hinaus sind die gleichen Maßnahmen wie im Punkt 6.5.1 anzuwenden.

6.5.4 Unfälle mit wasserstoffgetriebenen Kraftfahrzeugen

Kraftfahrzeuge mit Wasserstoffantrieb sind in der Regel batterieelektrische Fahrzeuge, die im Betrieb bedarfsweise über eine Brennstoffzelle geladen werden. Ähnlich wie bei alleinig elektrisch oder mit Gas angetriebenen Fahrzeugen führen verschiedene Mechanismen zur Herstellung eines sicheren Ruhezustands, bei dem das Hochvoltsystem des elektrischen Teils und das Gassystem des Wasserstoffteils abgeschaltet werden. Dazu zählt das Betätigen des Zündschlüssels, Handbremse und bei Bussen/Staplern des Nottasters neben dem Fahrer oder an der Brennstoffzelle. Bei einem Austritt ohne Zündung sind die Maßnahmen zum Explosionsschutz zu beachten.

Auch wenn der Wasserstofftank in der Regel gut geschützt vor einem Aufprall verbaut wird, sind auch Szenarien denkbar, bei denen ein Tank beschädigt wird. Die Vorgehensweise erfolgt wie zuvor beschrieben. Wichtig ist bei der Planung von einsatztaktischen Maßnahmen, dass der Tank nicht durch Manipulationen während einer technischen Rettung beschädigt wird.

Besondere Aufmerksamkeit gilt dem TPRD. Hat das TPRD bereits ausgelöst, ist davon auszugehen, dass der Tank zumindest teilentleert ist. Strömt der Wasserstoff, beispielsweise aufgrund eines technischen Defektes unverbrannt über das TPRD ab, so ist in der Umgebung immer -zumindest zeitnah zum Zeitpunkt des Abströmens- mit einem zündfähigen Gas-Luft-Gemisch zu rechnen. Dies wiederum ist insbesondere in Tunneln und anderen umschlossenen Räumen (z. B. Tiefgarage, Werkstatt) kritisch für die eingesetzten Kräfte, da die technischen Anlagen innerhalb des Bauwerks in der Regel nicht explosionsgeschützt ausgeführt werden. Strömt Wasserstoff über das TPRD brennend ab, entsteht eine (schlecht sichtbare) Stichflamme, die zu Sekundärbränden und einer schlagartigen Erhöhung der Raumtemperatur führen kann. Beim Löschen und Kühlen während eines voll entwickelten Fahrzeugbrandes ist darauf zu achten, dass das TPRD nicht gekühlt und somit seiner entscheidenden Funktion beraubt wird. Andernfalls wird ein Behälterzerknall deutlich begünstigt. Abhängig von der Tankgröße, liegt der Gefahrenbereich bei einem Fahrzeugbrand mit der Möglichkeit eines Behälterzerknalls bei ca. 100 m Radius in der freien Fläche vor.

7 Empfehlungen zur Gefahrenvorbeugung und Einsatzplanung

Wasserstoff ist auf vielen Gebieten noch Neuland und daher sind wirklich rechtsverbindliche Vorschriften unterhalb der Schwellen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes meist nicht verfügbar. Im Bereich der Genehmigungsverfahren muss zwischen der gewerblichen/industriellen Nutzung und der Nutzung zur Energieversorgung im Gebäudebereich unterschieden werden. Eine umfassende Darstellung der verschiedenen Genehmigungsverfahren ist im Rahmen dieses Leitfadens nicht möglich und es erfolgt soweit möglich, der Verweis auf weiterführende Quellen. In der gewerblichen oder industriellen Nutzung besteht das Erfordernis der Beachtung der Vorschriften aus dem Bereich des Arbeitsschutzes (z. B. TRGS, TRBS, DGUV, ASR).

Unabhängig von der Anwendungsart von Wasserstoff gibt es geltende Vorschriften aus den Bereichen der DVGW-Regelwerke, der TRGS und des Arbeitsschutzes aus denen Anforderungen abgeleitet werden können. Hier ist mit der einreichenden Partei abzustimmen, welche dieser Dokumente herangezogen werden, um den vorliegenden Einzelfall zu betrachten.

Bei der Anwendung von Wasserstoff im Bereich der Energieversorgung der Allgemeinheit wird auf die aktuelle Muster-Feuerungsverordnung (MFeuV, Stand 28.11.2023) verwiesen.

Für Wasserstoffanlagen, Anlagen zur Wasserstoffspeicherung und deren Rohrleitungen, die weder gewerblichen noch wirtschaftlichen Zwecken dienen oder durch die keine Beschäftigten gefährdet werden können, gelten ebenfalls die materiellen Anforderungen und die Festlegungen der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV). Erläuterungen und Hinweise für die Durchführung der Erlaubnisverfahren nach §18 der Betriebssicherheitsverordnung finden sich in der LASI-Veröffentlichung - LV 49 des Länderausschusses für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI).

Darüber hinaus sollten auch die geltenden und aktuellen Normen berücksichtigt werden. Hier sollte der Fokus auf den Sicherheitsdokumenten (Maschinenrichtlinie und Produktsicherheitsgesetz) der Anlagen und einer Gefährdungsbeurteilung vom Hersteller für die Anlage gelegt werden. So kann beurteilt werden, welche Gefährdungen von der Anlage ausgehen und vor welchen äußeren Gefährdungen die Anlage geschützt werden sollte. Im Rahmen einer Verwendung nach der MFeuV ist eine CE-Kennzeichnung erforderlich.

Entsprechend der Tabelle im Anhang 1 der vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV) ist für Anlagen zur Herstellung von Stoffen oder Stoffgruppen durch chemische, biochemische oder biologische Umwandlung in industriellem Umfang zur Herstellung von Gasen wie Wasserstoff (sofern die Herstellung nicht durch die Elektrolyse von Wasser erfolgt) ein Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz erforderlich. Als Hilfestellungen bei der Errichtung, der Inbetriebnahme und dem Betrieb von kommerziell genutzten Power-to-Gas-Anlagen wurde durch den Forschungsverbund PORTAL GREEN für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) zwei Leitfäden erstellt, die auch für andere Anlagen anwendbar sind und als Anleitung, Hilfestellung, Orientierung und Handreichung, welche Verfahren und Gesetze für die Errichtung und den Betrieb zu beachten sind, herangezogen werden können.

Bei einer Produktionskapazität eines Elektrolyseurs von 50 t Wasserstoff je Tag oder einer elektrischen Nennleistung des Elektrolyseurs von 5 Megawatt fällt das Genehmigungsverfahren in den Bereich des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV).

Mit einer Lagerungsmenge von mehr als 3 t Wasserstoff fällt eine Anlage in den Geltungsbereich des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV).

Zudem werden Anlagen ab einer Lagerungsmenge für Wasserstoff von 5 t in den entsprechend der Störfallverordnung (12. BImSchV) als Störfallbereich der unteren Klasse und ab einer Lagerungsmenge von 50 t als Störfallbereich der oberen Klasse eingestuft.

Ausgehend von den vorgenannten Punkten wird eine brandschutztechnische Betrachtung der Anlage oder geplanten Verwendung im Genehmigungsverfahren erforderlich.

Zur Einschätzung der Gefahren, die im Zusammenhang mit der geplanten Verwendung oder Anlage entstehen, sollte eine Gefährdungsbeurteilung erfolgen. Hierbei ist zu klären, ob es im Normalbetrieb bereits zu Austritten (z. B. geregelte Spülverluste oder Druckentlastungen) und Entzündungen kommen kann und wie die Sicherheitsvorkehrungen in Bezug auf die örtlichen Gegebenheiten, wie die Entfernung zur Nachbarbebauung, geregelt sind. Welche Mengen können wie freigesetzt werden.

Um Maßnahmen des Brand- und Explosionsschutzes zu ermitteln und einschätzen zu können, sind die Vorschriften des Ausschusses für Gefahrstoffe (AGS) zu

- Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre TRGS 720 – 724
- Ortsbewegliche Druckbehälter und ortsfeste Druckanlagen TRGS 745 und 746 (TRBS 3145/3146)
- Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen TRGS 751
- Tätigkeiten mit Gasen – Gefährdungsbeurteilung, TRGS 407

sowie die Sicherheitsdatenblätter zu Wasserstoff (z. B. Hersteller) genannt.

Allgemein wird die Erstellung einer Gefährdungsanalyse im Zusammenhang mit einem Explosionsschutzdokument empfohlen, um daraus die erforderlichen brandschutztechnischen Maßnahmen für die geplante Anlage oder Anwendung abzuleiten.

Die Regelungen der TRBS betreffen insbesondere die Lagerungsmengen und Lagerorte. Es handelt sich hierbei um Aussagen zu Betreiberverantwortung und Betreibervorschriften.

Für die Wasserstofflagerung gibt die TRBS 3145 u. a. mengen- und stoffabhängige Mindestabstände sowie Vorschriften für die Durchlüftung vor. Es wird empfohlen, bei genehmigungsfreier Lagerung 4,5 kg Wasserstoff oder 50 Normkubikmeter Wasserstoff nicht zu überschreiten (entsprechend 5 Druckgasflaschen mit 50 Liter bei 200 bar Fülldruck). Dies ist vergleichbar einem Energiegehalt von 11 kg Propan. Entsprechend der MFeuV sind ortsfeste Druckbehälter zur Wasserstoffspeicherung im Freien aufzustellen.

Im Umfeld von ortsfesten Wasserstoffspeichereinrichtungen sind aufgrund der Betriebssicherheitsverordnung ausreichende Sicherheitsabstände festzulegen, da die Flammenlänge von der Höhe des Drucks abhängig ist. Diese sind zwischen Betreiber und Behörden im Einzelfall aufgrund von Gefährdungsbeurteilungen/Exschutzdokument zu vereinbaren, damit brennend austretender Wasserstoff keine Folgebrände verursachen kann oder benachbarte Einrichtungen durch Brandeinwirkung geschädigt werden.

Allgemein ist auf eine Durchlüftung der Räume zu achten, in denen Wasserstoff vorhanden ist. Im oberen Bereich der Räume sollten geeignete Entlüftungsöffnungen vorhanden sein! Bei mechanischer Belüftung muss auf die Eignung der verwendeten Lüftungsgeräte geachtet werden.

Aus dem Projekt HyIndoor lassen sich folgende allgemeine Empfehlungen ableiten: Um eine Ansammlung brennbarer Konzentrationen zu verhindern, sollte ein Raum mit geeigneten passiven Entlüftungsöffnungen ausgestattet sein. Bei der Verwendung von zwei (oder mehr) Lüftungsöffnungen sollten diese auf unterschiedlicher Höhe vorgesehen werden, da dies effektiver ist als eine einzelne Belüftungsöffnung oder mehrere Belüftungsöffnungen, die sich nur im oberen Bereich des Raumes befinden, wenn man die gleiche gesamte Belüftungsfläche berücksichtigt. Sollten die Gegebenheiten es im Einzelfall nur zulassen, dass eine Lüftungsöffnung vorhanden ist, sollte diese im oberen Bereich des Raumes angeordnet sein. Dabei sind vertikale Öffnungen in Wänden horizontalen Öffnungen im Dach vorzuziehen. Diese Anforderungen finden sich auch in der MFeuV für Wasserstoffanlagen

(einschließlich Elektrolyseure) und Brennstoffzellen-Heizgeräte wieder. Wird ein bei einer Anlage im Freien ein Witterungsschutz vorgesehen, ist dieser so auszubilden, dass sich im Fall einer Leckage keine Wasserstoffansammlung bilden kann.

Bei Lüftungsleitungen oder einer Verminderung des lichten Öffnungsmaßes durch Gitter oder andere Hindernisse sollte ein Korrekturfaktor berücksichtigt werden, um der Verringerung des Abflusskoeffizienten Rechnung zu tragen. Grundsätzlich sollte das Belüftungssystem, wenn es möglich ist, so ausgelegt sein, dass Konzentrationen über der UEG für realistisch zu erwartende Wasserstofffreisetzungsraten verhindert werden. Bei der Anwendung von Zwangsbelüftungssystemen aus Gründen der Praktikabilität sollte die Ausfallsicherheit berücksichtigt werden.

Wasserstoff-Füllanlagen sind erlaubnispflichtige Anlagen nach BetrSichV, § 18, Nr. 3.1. Für Wasserstofftankstellen können die technischen Anforderungen aus der ISO 19880 Gaseous hydrogen fuelling stations und der DIN EN 17127 Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle sowie dem Merkblatt VdTÜV 514 - Anforderungen an Wasserstofftankstelle abgeleitet werden. Im DVGW Arbeitsblatt G 731 (Entwurf) ist der Stand der Technik als Kompendium verschiedener Technischer Regeln, einschließlich der vorgenannten Normen, für Planung, Bau, Ausrüstung, Aufstellung, Prüfung und Inbetriebnahme von Wasserstoff-Füllanlagen zusammengefasst. Für die Umsetzung des Genehmigungsprozesses wird auf den Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Tankstellen der bundeseigenen NOW GmbH verwiesen.

7.1 Gaswarnanlagen bzw. Gaswarngeräte

Gaswarnanlagen bzw. Gaswarngeräte im Bereich der Energieversorgung dienen in der Regel der Messung von Brenngasanteilen in der Luft zum Zwecke des Explosionsschutzes.

Die wichtigsten der hierfür in Frage kommenden Sensoren sind: Wärmetönungssensoren (katalytische Sensoren, Pellistoren) sind geeignet für die integrale Messung aller brennbaren Gase.

Infrarot-Sensoren (IR-Sensoren) messen nicht integral alle brennbaren Gase, sondern müssen auf die Zielkomponente(n) optimiert sein. Wasserstoff kann generell nicht gemessen werden. Der nicht erfasste Wasserstoffanteil (maximal 10 %) kann aber durch ein Herabsetzen der Alarmschwellen kompensiert werden.

Die verwendeten Gaswarnanlagen bzw. Gaswarngeräte dürfen für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen keine Zündquellen darstellen und müssen hierfür die Anforderungen der Richtlinie 2014/34/EU (ATEX-Richtlinie) erfüllen. Wenn die Gaswarnanlagen bzw. Gaswarngeräte darüber hinaus eine Messfunktion für den Explosionsschutz gemäß Richtlinie 2014/34/EU ausüben, dann ist auch hierfür ein EU-Konformitätsbewertungsverfahren durchzuführen.

Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoffgemische haben - wie auch das reine Erdgas - eine Dichte, die geringer als die von reiner Luft ist. Hieraus ergeben sich in Abhängigkeit der umgebenden Luftströmung und der räumlichen Gegebenheiten 3 Szenarien für die Installation der Gassensoren:

Bei Freisetzung in einer ruhenden Atmosphäre wird sich das ausbildende Brenngas-Luft-Gemisch nach oben bewegen. Die Gassensoren einer Gaswarnanlage sind folglich über der potenziellen Gasquelle zu installieren.

Wird Wasserstoff in einem Raum mit natürlicher Lüftung freigesetzt, so wird sich das Gemisch aus Wasserstoff und Luft in Abhängigkeit von den konkreten baulichen Gegebenheiten (Lüftungsöffnungen), der konkreten Luftströmung und ggf. zu berücksichtigender Temperaturunterschiede zu den Lüftungsöffnungen bewegen. Die Gassensoren sind folglich in der Nähe der Lüftungsöffnungen anzubringen.

Erfolgt die Freisetzung in einem Raum mit technischer Lüftung, so wird das Wasserstoff-Luft-Gemisch entweder direkt am Ort der potenziellen Freisetzungsquelle abgesaugt oder durch Ventilatoren zu vorhandenen Lüftungsöffnungen und ins Freie transportiert. Gassensoren werden in diesen Fall bevorzugt im Bereich der Absaugvorrichtung bzw. in der Nähe der Lüftungsöffnungen installiert.

Diese Szenarien und die zu berücksichtigenden Beurteilungskriterien zu Gaswarneinrichtungen und -geräten für den Explosionsschutz sind der DGUV Information 213-057 und im Merkblatt T 055 der BG RCI ausführlich beschrieben

7.2 Abnahmen und Stellungnahmen

Bei Abnahmen und Stellungnahmen in einem Genehmigungs- bzw. Bauvorhaben in Verbindung mit Wasserstoff sollten durch die Brandschutzdienststelle in Abhängigkeit des Genehmigungsverfahrens (Baugenehmigungsverfahren im Rahmen der landesspezifischen Bauordnung oder Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz) bestimmte Fragen in Bezug auf die Gefährdungen von Wasserstoff betrachtet werden.

Hierbei soll keine Detailprüfung der Unterlagen stattfinden, sondern eine Prüfung auf Vollständigkeit, Nachvollziehbarkeit und Plausibilität der Planung durchgeführt werden. Darunter fällt unter anderem, ob Nachweise geführt wurden und auf Grundlage welcher technischen Regeln diese geführt worden sind oder ob es eine Fachunternehmererklärung zur Errichtung der Anlagen gibt. Zwar liegt die Zuständigkeit hierfür grundsätzlich bei der genehmigenden Behörde, dennoch lässt sich aus diesen Unterlagen erkennen, ob es sich um geregelte und/oder genormte Systeme oder Technologien handelt, woraus die Einhaltung bestimmter Sicherheitsvorkehrungen abgeleitet werden kann.

Es sollte betrachtet werden, ob es eine Belüftung gibt und wie und auf welcher Grundlage diese geplant worden ist und ob hierbei die Lagerungsmengen oder zu erwartende Leckagen berücksichtigt worden sind. Alles unter Berücksichtigung, dass der Entstehung eines explosionsfähigen Gemisches vorgebeugt wird.

Welche Unterlagen liegen vor (Ex-Schutzdokument, Gefährdungsbeurteilung, technische Datenblätter der Anlage, Errichterbescheinigungen, Nachweise zur Übereinstimmung einer Norm oder Erläuterungen zur Funktionsweise der Anlagen), sodass hieraus möglicherweise bereits Sicherheitsvorkehrungen, wie die Dichtheit der Anlage und der Leitungen oder das Erfordernis einer Mess- und Warneinrichtung hervorgeht oder sind organisatorische Maßnahmen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung getroffen worden.

Sind die bauliche Anlage, das Gebäude oder die Räume so ausgebildet, dass sich Wasserstoff ansammeln kann oder dass sich durch den Austritt von Wasserstoff Gefährdungen in Bezug auf die Umgebung ergeben?

Um für diese besser innerhalb einer Abnahme oder Stellungnahme bewerten zu können dient die Anlage 10.3 mit den Leitfragen Gefahrenvorbeugung.

Im Zusammenhang mit besonderen Gefährdungen der Anlagen, Systemen und technischen Einrichtungen ist auf die landesspezifischen Brandschutz- und Feuerwehrgesetze zu verweisen. Über diese besteht die Möglichkeit Eigentümer und Betreiber bei besonderen Gefährdungen vertretbare Auflagen zu erlegen, dies bezieht sich zum Beispiel auf das Erstellen von Feuerwehrplänen.

7.3 Einsatzplanung

In den Brandschutzgesetzen der Bundesländer ist die Erstellung von Alarm- und Einsatzplänen sowie die Erstellung von externen Notfallplänen vorgegeben.

Darüber hinaus sind für besondere Objekte in der FwDV 500 Einsatzpläne zu fertigen. Unter Punkt 1.2.2.2 der FwDV 500 sind die Inhalte dieser Einsatzpläne definiert. Mindestens für die Bereiche der Gefahrengruppen II und III sind Feuerwehrpläne und Einsatzpläne zu erstellen.

8 Ausbildung der Feuerwehren

Das Thema Wasserstoff mit den verschiedenen Anwendungen sollte im Rahmen der Aus- und Fortbildung im Kontext der alternativen Energien betrachtet werden.

Wasserstoff ist nicht mehr oder weniger gefährlich als andere gebräuchliche Brennstoffe, aber er ist anders, hat seine eigenen spezifischen Eigenschaften und damit verbundene Risiken. Ein zunehmender Einsatz erfordert ein Verständnis der Gefahren und Risiken, Sicherheitsmerkmale und -konzepte sowie geschulte Einsatzkräfte, um mögliche Zwischenfälle oder Unfälle sicher zu bewältigen. Es erfordert einen Wandel in der Sicherheitskultur, insbesondere bei den Einsatzkräften, die als erste mit Notfallsituationen konfrontiert werden, in denen unter Druck stehender oder verflüssigter Wasserstoff verwendet wird, sowohl in Innenräumen als auch im Freien, in städtischen Wohngebieten, auf der Straße, auf dem Land und in vielen anderen Bereichen.

Wenn Installationen für wasserstoffaktive Komponenten im Ausrückebereich vorhanden sind, wird empfohlen, dass sich betroffene Einheiten über die lokalen Gegebenheiten und möglichen Einsatzszenarien mit dem Betreiber austauschen.

9 Weiterführende Informationen

<https://hyresponder.eu/e-platform/european-emergency-response-guide/> (Abruf 03/2025)

ist der Europäische Notfalleitfaden als zweiteiliges Dokument mit unterstützenden Anhängen, das akademisches Wissen und operative Taktiken kombiniert.

<https://hyResponder.eu> (Abruf 03/2025)

Europäisches Wasserstoff-Train-the-Trainer-Programm für Einsatzkräfte.

<https://www.bauministerkonferenz.de/> (Abruf 03/2025)

mit Informationen zu bauordnungsrechtlichen Vorschriften

<https://www.bmbf.de> (Abruf 03/2025)

unter dem Stichwort „Wasserstoff“ mit Informationen zur Nationalen Wasserstoffstrategie sowie zur Forschung und Projekten zum Thema Wasserstoff und Power-to-X. (Abruf 03/2025)

<https://www.ffb.kit.edu/385.php> (Abruf 03/2025)

Veröffentlichungen des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zu den Themen alternative Antriebstechnologien, insbesondere der IMK Forschungsbericht Nr. 159 „Besonderheiten und Risiken bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen“

<https://www.kas-bmu.de/kas-publikationen.html> (Abruf 03/2025)

Veröffentlichungen der Kommission für Anlagensicherheit und die Technischen Regeln Anlagensicherheit (TRAS), der Störfall-Kommission und des Technischen Ausschusses für Anlagensicherheit, z.B. Anwendung der Wasserstoff-Technologie

<https://www.vfdb.de/veroeffentlichungen/publikationen/> (Abruf 03/2025)

Merkblätter der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes, z.B. zu Einsätzen an Kraftfahrzeugen mit alternativen Antriebsarten und – kraftstoffen

<https://publikationen.dguv.de/> (Abruf 03/2025)

Regelwerk des Verbandes der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, z.B. zu FBETEM-007 Gefährdungen und Schutzmaßnahmen bei Arbeiten im Bereich von Wasserstoffanlagen und -leitungen, DGUV Information 209-072 Wasserstoffsicherheit in Werkstätten, FBRCI-030 Hinweise zum Einsatz von Gaswarngeräten zur Messung von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen in Umgebungsluft

<https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/> (Abruf 03/2025)

FNB Gas ist der Zusammenschluss der überregionalen Gastransportunternehmen in Deutschland, Verweise auf viele Projekte und Berichte (Abruf 03/2025)

<https://dwv-info.de/publikationen/> (Abruf 03/2025)

Veröffentlichungen des Deutschen Wasserstoffverbandes, Verweise auf viele Projekte und Berichte

<https://www.dvgw.de/> (Abruf 03/2025)

ist eine Informationsseite des DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V mit Forschungsprojekten und Veröffentlichungen zum Thema Energiewende und Wasserstoff

<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/wissenswertes> (Abruf 03/2025)

Grundlagenforschung, Leitprojekte und Informationen zum Thema Wasserstoff des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

<https://www.bundesfeuerwehrverband.at> (Abruf 03/2025)

ÖSTERREICHISCHER BUNDESFEUERWEHRVERBAND ÖBFV-Info 08: Wasserstoff

<https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-s-59-band-1-portal-green-genehmigungsrechtlicher-leitfaden-fuer-power> (Abruf 03/2025)

Genehmigungsrechtlicher Leitfaden für Errichtung und Betrieb von Power-to-Gas und vergleichbaren Anlagen als Anleitung, Hilfestellung, Orientierung und Handreichung, welche Verfahren und Gesetze für die Errichtung und den Betrieb zu beachten sind

https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/03/NOW_Genehmigungleitfaden_H2-Tankstellen.pdf (Abruf 03/2025)

Leitfaden für Gasfüllanlagen für gasförmigen Wasserstoff und den Genehmigungsprozess nach Betriebssicherheitsverordnung

10 Überarbeitung

Die Inhalte dieses Leitfadens wurden erarbeitet von einer Arbeitsgruppe im AK VB/G der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF- Bund).

Teilnehmer der Arbeitsgruppe 2025 zur Überarbeitung		
L. Angler	BF Erfurt	
A. Dyck, Dr.	DLR	
M. Groß	BHFM Technologies GmbH	
O. Schweder, Dr.	BF Oldenburg	
M. Sonnenberg	TU Dresden	
D. Schelb, Dr.	KIT Karlsruhe	
Franz Petter	BF Hamburg und vgbf	informativ

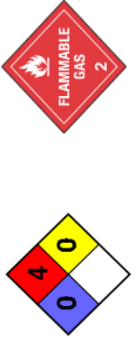






Version	Aktivität	Autor	Bemerkungen
2008	Version 1.0	Feyrer, AG	Ausgangsversion
28.06.2022	Update AGBF Wasserstoff	Petter	Vorschlag
06.03.2025	Version 2.1	AG	Überarbeitung aller Punkte
April 2025	Abstimmung im FA VB/G	Bachmeier	Weitergabe an FA EuT (Hinweis auf Klärungsbedarf zu 6.3 und 11.2 mit möglichem Tätigwerden der Feuerwehren, auch im Kontext zu 8.)

			Tabelle 3 notwendig oder Szenarienbeschreibung ausreichend?
Dezember 2025	Finale Abstimmung der Anpassungen mit der Arbeitsgruppe und dem FA EuT	Bachmeier	

Die Arbeitsgruppe nimmt gerne Anregungen für eine Fortschreibung des Leitfadens auf. Die Fortschreibung des Leitfadens wird aufgrund der laufend neuen Erkenntnisse nach spätestens 2 Jahren empfohlen.

11 Anhänge

11.1 Wasserstoff Merkblatt

Wasserstoff						
Allgemeine Kennzeichnung						
Herstellung		Aus Kohlenwasserstoffen bzw. Biomasse (Kohlevergasung, Dampfreformierung, partielle Oxidation, Fermentation...), aus Wasser (Elektrolyse, Chloralkalielektrolyse, thermische, thermochemische oder photochemische Wasserspaltung). Nebenprodukt der aus Prozessen der chemischen bzw. Grundstoffindustrie (z.B. Gichtgas)				
Verwendung		Energieträger (Brenngas, Brennstoffzelle) in Verkehr, Kraft-Wärme-Kopplung und Schweißtechnik; Roheisengewinnung; organische Synthesen; Hydrocracking; Fetthärtung und Schutzgas (Lebensmittelindustrie), Raketentreibstoff; Zumischung				
Markante, brandschutzrelevante Stoffeigenschaften		Wasserstoff ist ein extrem entzündbares, geruchloses, farbloses und nicht toxisch Gas, das leichter als Luft ist. Der Zündbereich ist groß, zur Zündung reicht die statische Aufladung des ausströmenden Gases häufig aus, es brennt dann mit nahe-zu farbloser Flamme. Die Emission von Wärmestrahlung ist verhältnismäßig gering, bei hohem Reaktionsumsatz kann UV-Strahlung mit relevanter Leistung emittiert werden. Eine Zündung eines Wasserstoff-Luftgemisches kann auch katalytisch				
Verbrennung		Flammpunkt: -240°C	Zündtemperatur: 560°C	(T1)	Flammtemperatur 2050°C	
Zündgrenzen		UEG 4,0 Vol. % = 3,3 g/m³	Detonation ab 18 Vol %		OE 77 Vol. % = 65 g/m³	Zündenergie 0,016 mJ
Gefährliche chemische Eigenschaften		Heftige, exotherme Reaktion mit starken Oxidationsmitteln (Halogene und deren energiereiche Verbindungen, Persäuren, Peroxide...), starken Reduktionsmitteln (z.B. Lithium, Raney-Nickel...) und verschiedenen organischen Verbindungen (z.B.				
Besondere physikalische Eigenschaften		Wasserstoff hat in flüssiger und gasförmiger Form eine sehr geringe Dichte (70 kg/m³ bzw. 0,09 kg/m³), sodass anhand des Gewichtes nicht intuitiv wahrnehmbar ist, ob ein Behälter gefüllt oder leer ist. Selbst an seinem Siedepunkt ist die Dichte von Wasserstoff nur unwesentlich höher als die von Luft bei 0°C (1,34/1,29 kg/m³), sodass Schwergasverhalten in der Regel nicht ausgeprägt ist. Bei Raumtemperatur erwärmt sich Wasserstoff bei der Dekompression um etwa 0,5°C je 10 Bar.				
Speicherform		Komprimiert	23 1049	Kryogen	223 1966	Hydridspeicherung 3468
Anwendung		Transport, Kraftstoff, Lagerung	Spezialanwendungen (Militär)			
		Kennzeichnung als Kraftstoff am Fahrzeug	Kennzeichnung als Kraftstoff am Fahrzeug			
		 ISO 17840 DIN EN 16942	 Im Bestand	 DIN EN 16942	 DIN EN 16942	Nicht vorhanden
Leitmerkmal		Druck 200 bar bis 800 bar	Temperatur -252°C, Boil-off beachten!			
Perspektive		Ein Anstieg der Verwendung in Vielfalt und Tonnage ist zu erwarten, zunächst primär in Form von Druckgas, beispielsweise als Energieträger für Fahrzeuge bzw. stationäre Anlagen und in der Industrie. Neue Speichertechnologien (z.B. LOHC oder CcH2) sind derzeit Gegenstand von Forschung und Entwicklung.				

11.2 Einsatzhinweise - Zusammenfassung

Spezielle Ausrüstung

- Nur explosionsgeschützte Geräte verwenden! Auch Funkgeräte und Wärmebildkamera!
- Immer geeignetes Gasmessgerät bzw. Wärmebildkamera mitführen!

Gefahrenabwehr

- Feuerwehreinsatzplan beachten, sofern vorhanden.
- Einsatzmaßnahmen nach GAMS, Absperren Gefahrenbereich 50 m, Absperrbereich 100 m bis weitere Erkenntnisse eine Anpassung erfordern.
- Immer Vorbereitung eines Löschangriffs, für Lösch- und Kühlmaßnahmen.
- Einordnung nach Szenario 1-5
- Erkundung aus der Distanz, ob Wärmequellen erkennbar sind.
- Bei Annäherung an Tanks bzw. Rohrleitungen oder Anlagenteile auf Indizien für eine Leckage achten
 - Abströmgeräusch (nur Druckgas)
 - Flamme (Wärmebild)
 - Anzeige des Mehrgasmessgerätes
 - Nebelbildung (nur tiefkalte Flüssigkeit)
 - Ausgelöste Alarmierungseinrichtungen
- Abschätzen, ob Wasserstoff als Druckgas oder tiefkalte Flüssigkeit vorliegt
- Vorgehende Einsatzkräfte in die festgestellte Lage einweisen, Handy usw. ablegen.
- Besonderheiten von Tunneln oder Tiefgaragen beachten.

Szenario 1: Ausströmen ohne Brand im Freien

- Kein besonderes Risiko, Explosionsgefahr nur unmittelbar im Bereich des Austritts
- Schutzziel Zündung vermeiden
- Absperren entsprechend eines vergleichbaren Leitungslecks für Erdgas.
- Abschiebern der Gaszufuhr, bei Bedarf durch Anlagenbetreiber ausführen lassen.
- Messung im Bereich der Austrittsstelle zum Eingrenzen des Gefahrenbereichs.

Szenario 2: Ausströmen mit Brand im Freien

- Gefahr durch Besonderheiten der Flamme beachten, Gefahr durch Druckbehälterzerknall möglich, ab Größe Tankstellen/Trailern usw. initiale Absperrung bei 500 m bei Hinweisen auf defekte Sicherheitseinrichtungen
- Schutzziel Schadensausweitung durch Flamme vermeiden
- Erkundung des Wirkbereichs der Flamme mit der Wärmebildkamera, Kennzeichnung und Absicherung des Gefahrenbereichs, Einweisung vorgehender Kräfte
- Gasflamme möglichst weiterbrennen lassen, nur Sekundärbrände löschen, Kühlmaßnahmen durchführen, Flammengröße und –geometrie kann in gewissem Rahmen mit dem Hohlstrahlrohr beeinflusst werden.
- Gaszufuhr abschiebern, Flamme bei Bedarf löschen, um Flammenrückschlag zu verhindern.

Szenario 3 Ausströmen ohne Brand in Räumen

- Sehr hohe Explosionsgefahr, Sauerstoffmangel primär im oberen Teil des Raumes möglich
- Schutzziel Zündung verhindern
- Gefahrenbereich (Ex-Bereich, Weg der Druckwelle und potenzieller Trümmerschatten) kennzeichnen und absperren.

- Personalansatz im Gefahrenbereich minimieren.
- Lüftungsmaßnahmen einleiten, geringe Dichte des Wasserstoffs beachten und nutzen
- Gaszufuhr abschiebern oder Behälter ins Freie bringen (dann s. Szenario 1).

Szenario 4 Ausströmen mit Brand in Räumen

- Gefahr durch Besonderheiten der Flamme beachten, mäßige Explosionsgefahr, erhöhte Gefahr durch Druckbehälterzerknall, Sauerstoffmangel
- Schutzziel Schadensausweitung durch Flamme vermeiden
- Erkundung des Wirkbereichs der Flamme mit der Wärmebildkamera, Kennzeichnung und Absicherung des Gefahrenbereichs, Einweisung vorgehender Kräfte
- Gasflamme möglichst weiterbrennen lassen, nur Sekundärbrände löschen, Kühlmaßnahmen durchführen, Flammengröße und –geometrie kann in gewissem Rahmen mit dem Hohlstrahlrohr beeinflusst werden.
- Bei Bedarf Luftzufuhr sicherstellen herstellen, um unkontrolliertes Verlöschen der Flamme zu unterbinden
- Gaszufuhr abschiebern, Flamme bei Bedarf abschlagen, um Flammrückschlag in einen Behälter zu vermeiden.

Szenario 5 Sonderlage Kraftfahrzeug

- Wasserstofffreisetzung i.d.R. nur in Folge schwerer Unfälle oder Brandeinwirkung realistisch.
- Bei der Erkundung bezüglich Explosionsgefahr Insassenraum und Laderaum als Räume betrachten.
- Abschalten des Fahrzeugs gemäß Rettungskarte. Brennstoffzelle = Hochvoltanlage!
- Wasserstoffanlage bei technischer Rettung nicht beschädigen.
- Annäherung an ein brennendes Fahrzeug nur mit großer Vorsicht (Stichflamme durch TPRD-Auslösung!) und nur seitlich.
- TPRD unter keinen Umständen kühlen
- Druckbehälterzerknall durch Brandeinwirkung möglich, aber wenig wahrscheinlich, Reichweite des Trümmerflugs etwa 100 m.

Abschlussmaßnahmen

Die Einsatzstelle sollte an sachkundige Personen übergeben werden. Dies kann lageabhängig der gewerbliche Anlagenbetreiber, ein Wartungsunternehmen, ein qualifiziertes Abschlepp- und Bergeunternehmen bei Kraftfahrzeugen oder ein Energieversorger sein. Die Feuerwehr ist in der Regel nicht qualifiziert, den sicheren Zustand einer havarierten Anlage zu beurteilen.

11.3 Leitfragen Gefahrenvorbeugung

1	Ist die MLAR und MFeuV, insbesondere § 11 der MFeuV – „Wasserstoffanlagen und Brennstoffzellen-Heizgeräte“, beachtet worden, wenn dies erforderlich ist? Die Muster-Leitungsanlagenrichtlinie (M-LAR) ist uneingeschränkt anwendbar. Es sollte ein Nachweis erbracht werden, dass der Werkstoff der Leitung für Wasserstoff geeignet ist.
2	Bestehen in Bezug auf die Schutzziele der Bauordnung Gefährdungen durch den Wasserstoff hinsichtlich der Anlagentechnik in oder an dem Gebäude bzw. der baulichen Anlage?
3	Welche Menge wird gelagert, zwischengelagert oder produziert? Werden Grenzwerte aus den Bereichen der TRGS/TRBS oder den BImSchV überschritten?
4	Ist das Explosionsschutzdokument, die Gefährdungsbeurteilung und/oder das Brandschutzkonzept in Bezug auf die Wasserstoffanwendung mit entsprechenden Quellenangaben und nachvollziehbar aufgestellt worden?
5	Erfüllen die Anlagen oder Systeme die aufgeführten geltenden Normen?
6	Sind die Anlagen, Systeme und Leitungen nach geltenden technischen Regelwerken hergestellt oder installiert worden?
7	Sind die installierten Anlagen abgenommen worden, von wem und auf welcher Grundlage?
8	Liegen Errichterbescheinigungen zu den ortsfesten Druckbehältern und Leitungen vor?
9	Ist in dem Lagerungsraum eine Be- und Entlüftung vorhanden, die Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches verringert? – Wie ist der Nachweis dazu geführt worden?
10	Besteht in dem Raum aufgrund seiner Größe oder Beschaffenheit eine besondere Gefährdung durch austretenden Wasserstoff? (z.B. Ansammlung in nicht belüfteten Bereichen oder unter Vorsprüngen, Dichtigkeit des Raumes)
11	Gibt es zu den Anlagen (Brennstoffzellensysteme, Elektrolyseuren, Verdichtern und Druckgasbehältern) Unterlagen in Form von Datenblättern oder technischen Datenblättern, die Vorgaben für den Aufstellort oder Betrieb dieser Anlagen machen.
12	Ist im Rahmen der Einsatzplanung der Feuerwehr eine Kennzeichnung des Raumes oder die Erstellung eines Feuerwehrplans aufgrund einer besonderen Gefährdung erforderlich?
13	Gibt es Mess- und Warneinrichtungen für Wasserstoff und welche Maßnahmen sind hierzu im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung oder eines Ex—Schutzdokumentes geregelt?
14	Wie ist die Abführung von ausgetretenem Wasserstoff geregelt? – Öffnung direkt ins Freie sollte vorhanden sein (Fenster, Tür oder spezifische Öffnung an oberster Stelle des Aufstellraumes der Anlage).
15	Kann die Abführung durch Ventilation (mechanisch oder natürlich) unterstützt werden?
16	Welche organisatorischen Maßnahmen sind getroffen worden allgemein und bei Austritt?