

DWV WASSERSTOFF-SICHERHEITS- KOMPENDIUM



DWV WASSERSTOFF-SICHERHEITS-KOMPENDIUM

Reinhold Wurster, LBST
Dr. Ulrich Schmidtchen, DWV

November 2011



ludwig bolkow
systemtechnik

www.lbst.de



Deutscher Wasserstoff- und
Brennstoffzellen-Verband

www.h2de.de

REPORT

Haftungsausschluss

Der Mitarbeiterstab der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) hat zusammen mit dem Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband e.V. (DWV) diesen Bericht erstellt.

Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht ausgedrückt werden, sind jene der Mitarbeiter der LBST und des DWV. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings gibt weder die LBST, der DWV noch irgendeiner ihrer Mitarbeiter, Vertragspartner oder Unterauftragnehmer irgendeine ausdrückliche oder implizite Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses, oder versichert, dass deren Nutzung private Rechte nicht verletzen würden.

INHALT

ABKÜRZUNGEN	IV
EINFÜHRUNG: WARUM IST WASSERSTOFF WICHTIG	V
1 TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFragen	10
1.1 Allgemeines Misstrauen gegen Unbekanntes und nicht Wahrnehmbares	10
1.2 Ist Wasserstoff explosionsfähig?	12
1.3 „Knallgas“	12
1.4 Diffusion von Wasserstoff	13
1.5 Materialversprödung durch Wasserstoff	14
1.6 Wasserstoffautos in Garagen und Parkhäusern	15
1.7 Druckfeste Tanks	16
1.8 Wasserstoffautos im Betrieb und in Unfallsituationen	16
1.9 „Wasserstoffbombe“	18
1.10 Erkenntnisse aus historischen Unfällen	19
1.10.1 Hindenburg	19
1.10.2 Challenger	19
1.10.3 Tempelhofer Feld	19
1.10.4 Hanau	20
1.10.5 Verkehrsunfälle	20
1.11 Sicherer Betrieb existierender Anlagen	22
1.11.1 Tankstellen	22
1.11.2 Chemische Industrie	22
1.12 Schlussfolgerungen	23
2 TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK	24
2.1 Explosionsschutz	24
2.2 Austritt und Ausbreitung von Wasserstoff	25
2.2.1 Wolkenausbreitung	25
2.2.2 Wolke steigt nach oben	25
2.2.3 Unterschied freies Gelände / Gebäude	26
2.2.4 Flüssiger Wasserstoff	26
2.3 Diffusion und Permeation	27
2.3.1 Was ist das, und warum kann es gefährlich sein	27
2.3.2 Was es nicht bedeutet: Gasflasche leer	28
2.3.3 Metalle	28
2.3.4 Verbundwerkstoffe	28

2.4 Negativer JT-Koeffizient	29
2.5 Sicherheitsvorteile von Wasserstoff	29
2.6 Was tun im Falle eines Falles	30
2.6.1 Verkehrsunfall	30
2.6.2 Gasaustritt im Gebäude	31
2.7 Regelwerke	32
2.7.1 Vorschriften	32
2.7.2 Normen	33
 3 LITERATUR.....	 34
 Anhang I – ELEMENTE DER SICHERHEITSTECHNIK – ALLGEMEINER ÜBERBLICK.....	 35
I.1 Gefährliches Wörterbuch	35
I.2 Allgemeines zur Sicherheit.....	36
I.2.1 Absolute Sicherheit unmöglich	36
I.2.2 Höhe des akzeptablen Risikos eine soziale Frage	37
I.2.3 Das größte Risiko ist der Mensch	38
I.3 Allgemeine Sicherheit von Anlagen	39
I.3.1 Dichtheit	39
I.3.2 Erkennung von Austritten.....	39
I.3.3 Vermeidung von Zündquellen	39
I.3.4 Be-/Entlüftung und Warnung	40
I.3.5 Schadensvermeidung und -bekämpfung.....	40
 Anhang II – BEWERTUNG UND EINORDNUNG	 41

ABKÜRZUNGEN

ATEX	Richtlinien auf dem Gebiet des Explosionsschutzes („ATmosphère EXplosible“)
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BZ	Brennstoffzelle
CcH ₂	Cryo-compressed Hydrogen (tiefkalter Wasserstoff unter Druck)
CGH ₂	Druckwasserstoff
CNG	Compressed Natural Gas (Druckerdgas)
CO ₂	Kohlendioxid
C _x H _y	Kohlenwasserstoff
ECOSOC	Wirtschafts- und Sozialrat der Vereinten Nationen (Economic and Social Council)
FC	Fuel Cell (Brennstoffzelle)
GWh	Gigawattstunde
H ₂	Wasserstoff
IEC	Internationales Elektrotechnisches Komitee
ISO	Internationale Normungs-Organisation
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
LH ₂	tiefkalt verflüssigter Wasserstoff (Flüssigwasserstoff)
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas, auch Autogas)
MPa	Megapascal (Druckeinheit; 1 MPa = 10 bar)
N	Nitrogen (Stickstoff)
NI	Normliter
Nm ³	Normkubikmeter
nm	Nanometer (10 ⁻⁹ m)
NO _x	Stickoxid
O ₂	Sauerstoff
PED	Pressure Equipment Directive (Druckgeräterichtlinie)
SCETDG	Sachverständigenunterausschuss für die Beförderung gefährlicher Güter (Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods)
SO _x	Schwefeloxid
THG	Treibhausgas

EINFÜHRUNG: WARUM IST WASSERSTOFF WICHTIG

Wasserstoff ist der Energieträger mit der höchsten gewichtsbezogenen Energiedichte. Derzeit wird insbesondere sein Einsatz als Speichermedium in der Energieversorgung und als Kraftstoff im Verkehr diskutiert. Dieses Sicherheitskompodium beleuchtet die beim Einsatz von Wasserstoff zu beachtenden Sicherheitsaspekte und rückt gleichzeitig weit verbreitete Mythen und Fehleinschätzungen im Zusammenhang mit seiner Verwendung zurecht. Zunächst soll allerdings kurz ausgeführt werden, woher die steigende Relevanz und das wachsende Interesse an diesem Energieträger rühren.

Wir stehen heute einer Energiekrise bisher unbekannten Ausmaßes gegenüber. Bis zum Jahre 2020 muss ein Förderrückgang in Höhe der gesamten Ölfördermengen der Länder Saudi Arabien und Russland durch neue Ölquellen ersetzt werden. Das ist weder in diesem kurzen Zeitraum noch prinzipiell möglich.

Außerdem stehen wir drastischen Klimaveränderungen gegenüber, die wir nicht mehr vermeiden können, aber in ihren Folgen durch schnelles und durchschlagendes Handeln sicherlich noch abschwächen können. Wir müssen dringend die Treibhausgas-Emissionen reduzieren, um die Auswirkungen der Klimaveränderungen zu begrenzen.

Auf beide Anforderungen ist unsere komplexe und wechselseitig hoch abhängige industrialisierte technische Welt schlecht oder gar nicht vorbereitet.



Erneuerbare Elektrizität muss knapper werdende fossile Brennstoffe schnellstmöglich ersetzen und dabei gleichzeitig die Klimagasemissionen drastisch reduzieren helfen. Die Strom erzeugenden erneuerbaren Primärenergien mit hohem Erzeugungspotenzial, in erster Linie Sonne und Wind, machen wegen ihres intermittierenden Charakters neue Energiespeichermethoden erforderlich. Dadurch wird unser zukünftiges Energiesystem strukturell deutlich anders aussehen als das heutige.

Strom muss nicht nur für kurze Zeiträume gespeichert werden, um auf plötzliche Schwankungen zu reagieren, sondern auch um saisonale Unterschiede bei Angebot und Nachfrage ausgleichen zu können.

Im Allgemeinen ist es schwierig und kostspielig, elektrische Energie, vor allem größere Mengen oberhalb einiger GWh, über längere Zeiträume (mehr als 48 Stunden) zu speichern. Es gibt verschiedene Speichermöglichkeiten, die unterschiedliche Leistungs- und Speicherzeiterfordernisse ansprechen, wie z.B. Pumpspeicher, adiabatische Druckluftspeicher, Batteriesysteme und elektrolytische Wasserstoffproduktion mit unterirdischem Kavernenspeicher. Letztgenannte Möglichkeit stellt eine besonders kosteneffiziente Art der Langzeitspeicherung intermittierenden erneuerbaren Stroms dar, zu der es nur wenige Alternativen gibt.

Die Automobilindustrie befindet sich im Übergang vom Verbrennungsmotor zum Elektromotor. Der sich damit gegenwärtig abzeichnende Trend zur Elektrifizierung des Antriebssystems profitiert ganz erheblich vom wachsenden Anteil erneuerbaren Stroms und stellt auch die einzige erkennbare Möglichkeit dar, den Transportsektor nachhaltig zu gestalten.

Nur Wasserstoff in Verbindung mit dem brennstoffzellenelektrischen Antrieb wird die Fähigkeit besitzen, in den nächsten Jahren und Jahrzehnten größere Mengen erneuerbaren Stroms ohne signifikante Einschränkungen für Nutzer auf den Markt für den Individualverkehr zu bringen. Mittelgroße und große Pkws mit hoher Fahrleistung stellen 50 % des Fahrzeugparks und erbringen 75 % der Fahrleistung (also Energieverbrauch, CO₂-Emissionen), während die anderen 50 % vornehmlich im städtischen oder stadtnahen Einsatz fahren und 25 % der Fahrleistung erbringen. Lediglich diese können vermutlich zu einem nennenswerten Teil mit Batteriespeichern betrieben werden, erstere müssen vermutlich Plug-In Hybride und Brennstoffzellenfahrzeuge sein.

Betrachtet man das Angebot von Wasserstoff als Speichermedium und den entstehenden Bedarf an Wasserstoff im Verkehrssektor, dann ergibt sich eine geradezu ideale Übereinstimmung. Wasserstoff kann als Kraftstoff für brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge dazu beitragen, ineffiziente erdölbasierte verbrennungsmotorische Fahrzeugantriebe sehr effizient zu ersetzen, und dies mit viel deutlicherem Wirkungsgradgewinn im Gesamtsystem als es beim Ersatz bereits effizienter konventioneller Energiewandler im stationären Bereich möglich wäre. Für den Antrieb von Straßenfahrzeugen gibt es nur wenige saubere Alternativen.

Als Kraftstoff im Straßenverkehr und als Speichermedium in Energiesystemen mit einem zunehmenden Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien wird Wasserstoff also eine immer wichtigere Rolle spielen. Dass er gleichzeitig ein sehr sicherer Energieträger ist und was man bei seinem Einsatz beachten muss, wird im vorliegenden Kompodium dargelegt.

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.1 Allgemeines Misstrauen gegen Unbekanntes und nicht Wahrnehmbares

Im Jahr 1783 war Gonesse ein friedliches Dorf in der Île de France, etwa 15 km nordöstlich von Paris. Aber am 27. August jenes Jahres wurden die Dorfbewohner jäh von ihren Arbeiten aufgeschreckt. Ein unbekanntes Ding war vom Himmel gefallen! Es zappelte, fauchte und stank nach Schwefel. Kein Zweifel: Auch wenn es vom Himmel gekommen war – es stammte geradewegs aus der Hölle.

Unter Führung der örtlichen Geistlichkeit griffen die wackeren Dorfbewohner das unheimliche Gebilde an und hatten es bald vollständig besiegt.

Das unheimliche Gebilde war der erste Wasserstoffballon der Geschichte. Jacques Alexandre Charles hatte ihn kurz vorher vom Pariser Marsfeld aufsteigen lassen. Den Wasserstoff besorgte er sich an Ort und Stelle durch eine Reaktion von Eisenspänen mit Schwefelsäure, daher der Schwefelgeruch. Da er keine Vorkehrung vorgesehen hatte, um bei Bedarf Gas abzulassen, wurde das Druckgefälle beim Aufstieg in die dünnere Luft immer größer. So barst die Hülle nach einer Weile und bot den Leuten von Gonesse die Gelegenheit, ihren Mut und ihre Gottesfurcht zu beweisen.



Abbildung 1: Wasserstoffballon in Gonesse (zeitgenössische Darstellung aus Wikipedia)

Das war nicht das erste Mal, dass man neuen und unbekannten Technologien mit Misstrauen begegnete und ihre Gefahren überschätzte, und auch nicht das letzte Mal. Andererseits neigen wir dazu, die Gefahren bereits bekannter und gewohnter Verfahren zu unterschätzen.

Seit dem 19. Jahrhundert gab es Gas in Europa in erster Linie als Stadtgas, also als Kokereigas, und damit immer lokal begrenzt. Erst als im 20. Jahrhundert das Erdgas eingeführt wurde, was in Deutschland in den 1960er Jahren begann, wurde Gas großflächiger verfügbar. Bis in diese Zeiten hatte praktisch jeder Haus-



Abbildung 2: Gasbehälter in Berlin Schöneberg

halt bereits mit Gas gekocht, aber noch nicht geheizt. Letzteres wurde erst durch das Erdgas mehr und mehr üblich. Interessanterweise hat dieser Trend nicht dazu geführt, dass in Wohnhäusern auch weiterhin überall mit Gas gekocht wurde. In den Boomjahren des Neubaus der 1960er bis 1980er Jahre wurden in Deutschland die meisten Wohngebäude nicht mit Gaskochstellen, sondern mit elektrischen Herdplatten ausgestattet. Dies war vom haustechnischen Aufwand her kostengünstiger. Es ging also die tägliche praktisch erlebte Erfahrung verloren, wie mit dem unsichtbaren Medium Gas umzugehen ist. Der Gaskessel im Keller wird nicht bewusst und schon gar nicht täglich wahrgenommen. Im Gegensatz zu anderen Gesellschaften, die noch wesentlich mehr mit Gas kochen oder auch mit Gas Auto fahren (z.B. Südeuropa, Lateinamerika), ging in Deutschland der praktisch täglich erlebte Umgang damit verloren. Die Menschen wuchsen ohne eigene Erfahrung im Umgang mit Gas auf und kannten dieses nur vom Hörensagen. Etwas, das man nicht kennt und mit den eigenen Sinnen nicht wahrnehmen kann (hier ‚Gas‘) ist wesentlich weniger leicht einzuschätzen als etwas, das man im täglichen Umgang kennt, auch wenn man es nicht sieht (‚Elektrizität‘). Beide Medien können bei nicht sachgemäßem Umgang gefährlich bis tödlich sein. Wenn Gas bei Undichtigkeiten

entweicht, können explosionsfähige Mischungen entstehen. Mehrmals im Laufe eines Jahres gibt es Meldungen in den Medien, dass eine Wohnung oder ein Haus durch eine Gasexplosion zerstört wurde (heute meist Erdgas oder Flüssiggas, also hauptsächlich Propan). Dieses Phänomen tritt bei Strom nicht auf, er bleibt in der Leitung und ‚leckt nicht heraus‘. Die Gefährdung durch mangelhaft isolierte Leitungen bleibt also unmittelbar räumlich an die Leitung gebunden

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

Wenn man keinen eigenen, auf Erfahrung basierten Vergleichsmaßstab hat, kann man auch die Qualität des Berichteten nur schlecht einschätzen. Dadurch können Unsicherheit oder auch Fehlinformiertheit entstehen bzw. verstärkt werden. Beides wird zuerst zu Vorsicht und dann eventuell auch zu Misstrauen führen.

Viele Menschen haben zwar oft von Erdgas gehört oder heizen ihr Haus damit. Von Wasserstoff haben sie schon deutlich seltener oder gar nicht gehört. Es fehlt ihnen die praktische Erfahrung, und er ist ihnen einfach fremd. Diese Situation erleichtert es sicherlich nicht, in einer Gesellschaft Wasserstoff zu befürworten oder einzuführen. Es muss viel Aufklärung betrieben werden, um Fehlinformiertheit oder Misstrauen abzubauen und Wissen und Vertrauen zu schaffen. Diese Aufklärungsarbeit muss auf nachprüfbaren Fakten basieren, und die Erkenntnisse müssen verständlich und allgemein zugänglich kommuniziert werden.



Einschub: Wie viel Sicherheit kann man verlangen?

Es gibt keine absolute Sicherheit. Alles, was wir im Laufe des Tages tun, jedes Werkzeug, das wir benutzen und jeder Energieträger, ist mit gewissen Gefahren verbunden. Oft haben wir es selbst im Griff, ob diese Gefahren beherrschbar bleiben oder nicht. Meist reicht uns die Einbildung, dass wir Kontrolle über die Gefahren haben.

Obwohl es jedes Jahr über 2 Millionen Verkehrsunfälle in Deutschland gibt, bei denen im Jahr 2010 rund 3700 Menschen starben, fahren wir mit dem Auto, lassen uns mit Verkehrsmitteln transportieren oder gehen zu Fuß auf die Straße. Wir hantieren mit Erdgas

oder Flüssiggas, obwohl in Deutschland alle paar Wochen ein Haus in die Luft fliegt; und die Verwendung von Strom ist auch nicht ungefährlich.

Welche Gefahren wir akzeptieren wollen und welche nicht, ist eher eine individuelle oder soziale als eine technische Frage. Ein absolutes Maß ist nicht zu definieren.

Somit muss die korrekte Frage lauten: Wie gefährlich ist Wasserstoff im Vergleich zu anderen, etablierten Energieträgern wie etwa Kohle, Öl, Erdgas oder Uran? Sind die Risiken unzumutbar hoch, oder kann man sie bewältigen? Wie groß ist der Nutzen im Verhältnis zum Risiko?

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.2 Ist Wasserstoff explosionsfähig?

Die meisten Menschen verbinden mit Wasserstoff dessen Explosionsneigung. Diese Vorstellung bzw. Wahrnehmung wird vermutlich durch das bekannte ‚Knallgasexperiment‘ aus der Schule erzeugt und evtl. durch einige Unfälle, an denen Wasserstoff beteiligt war. Dazu unten mehr.

Wasserstoff allein kann nicht explodieren (wie z.B. Sprengstoff). Damit es eine Explosion unter Beteiligung von Wasserstoff geben kann, müssen zwei weitere Zutaten zur Verfügung stehen: ein Oxidator, also z.B. Luft, reiner Sauerstoff oder Stoffe wie etwa Chlor, und eine Zündquelle, z.B. ein Funke aus einer elektrostatischen Aufladung. Sobald in einer Luftatmosphäre unter atmosphärischen Bedingungen etwa 4 % Wasserstoff eingemischt sind, kann dieses Gemisch mit einer Zündquelle angezündet werden und zu brennen anfangen. Ab etwa 75 % ist eine Zündung des Gemischs wegen Sauerstoffmangels nicht mehr möglich.

1.3 „Knallgas“

Im Chemieunterricht in der Schule wird die „Knallgasprobe“ zum Nachweis von Wasserstoff durchgeführt. Im eigentlichen Sinne wird hier der Luftgehalt eines H_2 -erzeugenden Gerätes geprüft. Man lässt typischerweise H_2 -Gas in ein unten offenes Reagenzglas strömen und hält dann einen Kienspan, Bunsenbrenner, Feuerzeug oder eine andere Feuerquelle daran. Wenn beim Zünden das Gas nur abbrennt oder mit einer leichten Entspannungsreaktion umgewandelt wird, dann war kaum Sauerstoff im Reagenzglas; H_2 reagiert mit der Umgebungsluft und brennt einfach ab. Brennt das Gas mit pfeifendem Geräusch ab, dann war in dem Reagenzglas eine H_2/O_2 -Mischung.

Die Summenreaktionsgleichung des Vorgangs ist: $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$

„Knallgas“ ist definiert als ein Gemisch von Wasserstoff mit reinem Sauerstoff, bei dem das Mengenverhältnis genau 2:1 beträgt. Beim Austritt von Wasserstoff in Luft kann es nicht entstehen, weil immer eine Menge Stickstoff anwesend ist. Vom unvorsichtigen Umgang mit Wasserstoff/Luft-Gemischen ist aber ebenfalls abzuraten, da bezüglich der Auswirkungen einer möglichen Explosion kein großer Unterschied besteht.

Einschub: Wann zündet ein Wasserstoff-Luft-Gemisch?

Eine chemische Reaktion benötigt in aller Regel eine gewisse Aktivierungsenergie, damit sie anläuft. Oberhalb von 560 °C („Selbstentzündungstemperatur“) genügt dafür bei Wasserstoff/Luft-Gemischen die thermische Energie der Gasmoleküle, dagegen muss bei Normalbedingungen die Energie durch eine Zündquelle zugeführt werden. Es gibt viele mögliche Zündquellen. Besonders wirksam sind elektrische Funken. Aber auch mechanisch erzeugte Funken (durch Schlag oder Reibung), heiße Oberflächen oder hohe Druckstöße können zünden. Anteile anderer Substanzen im Gasgemisch (Wasserdampf, andere Brenngase, Staub) können die Zündfähigkeit allerdings deutlich beeinflussen. Eine Explosion ist als eine nach der Zündung sich von selbst ausbreitende Verbrennung, begleitet von einer Druckwelle definiert. Insbesondere vorgemischte H_2 /Luft-Systeme können nach der Zündung schnelle Flammen mit entsprechend hohen Druckwirkungen erzeugen. Für die Flammenbeschleunigung sind jedoch hohe Turbulenzgrade im unverbrannten Gemisch notwendig, wie sie insbesondere durch Strömungshindernisse erzeugt werden können.

Verbrennung von Wasserstoff

Wenn Wasserstoff aus einer Düse oder einer anderen Öffnung austritt und sofort verbrennt, liegt keine Explosion vor, weil es keine vorherige Durchmischung gegeben hat.

Eine Wasserstoffflamme ist sehr fahl und im hellen Tageslicht kaum sichtbar. Man kann eine vermutete Wasserstoffflamme nachweisen, indem man mit einer Wärmebildkamera den entsprechenden Bereich untersucht oder z.B. Papier in den fraglichen Bereich hält. [CEP 2007]

Brennender Wasserstoff erzeugt nur eine relativ geringe Wärmestrahlung und emittiert hauptsächlich im nahen UV-Bereich (direkt an das sichtbare Licht angrenzender Bereich). Die Energie wird also eher auf die Verbrennungsprodukte übertragen. Benachbarte Gegenstände fangen daher weniger leicht Feuer, und für Menschen, die sich in der Nähe aufhalten, ist die Gefahr geringer, Verbrennungen zu erleiden.

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

Abbildung 3: In hellem Tageslicht kaum sichtbare Wasserstoffflamme oben rechts



Einschub: Unterschied zu anderen Brennstoffen

Wasserstoff ist nicht explosionsfähig, selbstentzündlich, zerfallsfähig (wie. z.B. Acetylen) oder oxidierend (brandfördernd). Er ist weder giftig, noch ätzend oder radioaktiv. Er ist auch nicht übel riechend. Auch gefährdet er das Wasser nicht. Er ist nicht Frucht schädigend oder Krebs erregend.

Sein nennenswertes Gefährlichkeitsmerkmal ist seine Brennbarkeit. Außerdem kann er erstickend wirken, wenn er den Sauerstoff verdrängt.

In einem Wasserstofftank befindet sich kein Sauerstoff, mit dem der Wasserstoff verbrennen könnte. Darin unterscheidet er sich von einem Benzintank, in dem die verbrauchte Flüssigkeit durch Luft ersetzt wird. Bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff entstehen reines Wasser und Wärme weitestgehend ohne Abgabe von Luftschadstoffen (C_xH_y , NO_x , SO_x , Partikel). Da er keinen Kohlenstoff enthält, erzeugt er kein CO_2 und kaum Infrarotstrahlung.

1.4 Diffusion von Wasserstoff

Immer wieder hört man, dass Wasserstoff „durch alles hindurchdiffundiert oder -wandert“, Wasserstoff „kann nicht eingeschlossen werden“ oder „Wasserstoff bleibt nicht im Tank“.

Diese Aussagen halten einer Nachprüfung jedoch nicht stand.

Wasserstoffmoleküle sind sehr klein, so dass prinzipiell eine hohe Diffusivität zu erwarten ist.

Seit einem Jahrhundert jedoch wird Wasserstoff in Stahlflaschen bei 20 MPa und mehr von den Industriegasfirmen gespeichert, transportiert, beim Kunden abgeliefert und dort gespeichert, ohne dass es dabei zu Problemen kommt.

Im Dezember 1998 fand man bei Abrissarbeiten auf dem Gelände einer Chemiefirma bei Frankfurt zwei große Gasflaschen mit Wasserstoff, die seit den 1930er Jahren dort gestanden hatten. Von dort aus waren nämlich die Zeppeline auf dem Frankfurter Flughafen mit Wasserstoff versorgt worden. Als nach dem Hindenburg-Unglück von 1937 kein Gas mehr gebraucht wurde, hatte man die beiden Behälter offenbar total vergessen. Sie waren immer noch voll. Bei Metallbehältern ist das Problem der Diffusion durch die Behälterwand ohne jede praktische Bedeutung, weil die Geschwindigkeit dieses Prozesses viel zu gering ist. Die Strukturoberflächen können passiviert werden, was das Eindringen von Wasserstoff verhindert.

Bei modernen Verbundmaterialflaschen, also Tanks, die einen Kunststoffkern, einen sogenannten „Liner“ und um diesen herum gewickelt Kohlenstofffasern haben und die Betriebsdrücke von 70 MPa erlauben, liegen die Diffusionsraten grundsätzlich höher als bei Metallen. Sie sind aber immer noch in der Praxis vernachlässigbar. Andernfalls würden diese Tanksysteme gar nicht zugelassen. Es gibt zudem neue Entwicklungen auf der Basis von Duroplasten, die über übliche Nutzungszeiträume selbst von Jahren keine solch erhöhten Diffusionen mehr erwarten lassen. Für 70 MPa Verbundmaterialflaschen mit Metallliner kann man von einem Zeitraum jenseits von hundert Jahren ausgehen, bis dieser sich durch Diffusion ganz entleert haben würde. Eine Pressluftflasche aus Verbundmaterialien kann schon nach einem halben Jahr leer sein, da sie nicht für die jahrelange Aufbewahrung von Luft ausgelegt ist.

Einschub: Das kleinste Molekül

Das Wasserstoffmolekül ist mit einem Durchmesser von 0,276 nm das kleinste Molekül. Methan hat einen Durchmesser von 0,324 nm, Wasser einen von 0,289 nm und Sauerstoff einen von 0,293 nm. Ionisierter Wasserstoff hat einen Durchmesser von 0,106 nm.

Aufgrund der kleinen Molekülgröße hat Wasserstoff eine sehr geringe Viskosität und damit potenziell eine hohe Leckrate. Als Gas-molekül diffundiert er schnell in jede Richtung (auch nach unten, obwohl H_2 leichter als Luft ist). Wegen seiner geringen Größe kann er sogar leichter als andere Substanzen in feste Stoffe hinein- oder durch sie hindurchdiffundieren.

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.5 Materialversprödung durch Wasserstoff

Wasserstoff diffundiert besonders schnell in andere Gase wie zum Beispiel Luft. In Rohrleitungen und auch Speicherbehältern kann es zudem vorkommen, dass auf katalytisch wirksamen Oberflächen auch H^+ -Ionen entstehen, also ionisierter Wasserstoff, der dann noch kleiner ist als das Molekül und so relativ einfach in Metalle hinein diffundieren und in bestimmten Stählen und bei besonderen Bedingungen Versprödungen hervorrufen kann. In den weltweit in Betrieb befindlichen mehr als 2.000 km H_2 -Industriepipelines hat dieser theoretisch mögliche Effekt aber bisher nie zu Problemen geführt. Man legt diese Systeme für H_2 -Gas geeignet aus, damit sie bei gegebenem Druckniveau sicher betrieben werden können.

Die Versprödung von Metallen oder Metalllegierungen durch Wasserstoff ist ein in der Wissenschaft seit mehr als hundert Jahren untersuchtes Phänomen. Es tritt auf, wenn ionisierter Wasserstoff in das Kristallgitter eines Metalls eindringt und den Zusammenhalt des Gitters schwächt. Insbesondere an Orten erhöhter Spannung im Material kann dieser Effekt zu beschleunigtem Risswachstum und zu Materialversagen führen. Die Anfälligkeit für wasserstoffinduzierte Korrosion hängt von verschiedenen Randbedingungen ab: Art des Kristallgitters (z.B. raumzentriert, flächenzentriert), Oberflächengüte des Metalls (z.B. Fehlstellen, Brüche, Schweißnähte) und Belastung (z.B. Druck, Spannung, Temperatur, Wechselbelastung).

Die potenzielle Alterung durch Wasserstoff wird in der Praxis über die Materialwahl und die Auslegung für die Lebensdauer einer Komponente berücksichtigt, minimiert oder weitestgehend ausgeschlossen.

Einschub: Mechanismen der Versprödung

Wasserstoffversprödung tritt auf, wenn auf der Metalloberfläche ionisierter Wasserstoff entsteht, der schneller in den Werkstoff diffundiert, als er sich an der Werkstoffoberfläche zu Molekülen zusammenfügt. Ein Teil des Wasserstoffs wird dabei in das Metallgitter eingelagert. Er kann zu Hydriden reagieren oder sich an Fehlstellen oder Korngrenzen ablagern. Das Resultat ist in beiden Fällen eine Versprödung des Metalls. Andere bevorzugte Stellen sind Risspitzen oder andere Orte hoher Spannung; hier schwächt der Wasserstoff den Zusammenhalt des Gitters, wodurch bei Vorliegen von statischen oder zeitlich wechselnden mechanischen Zugspannungen Risse induziert werden bzw. vorhandene Anrisse zum Rissfortschritt veranlasst werden (schnelleres Risswachstum).

Für den möglicherweise ablaufenden Schädigungsprozess ist die Dissoziation des molekularen, adsorbierten Wasserstoffs an der Metalloberfläche von besonderer Bedeutung, da dies einen Chemisorptionsvorgang voraussetzt, der nur an einer sauberen aktiven Oberfläche stattfinden kann, wie sie beispielsweise bei plastischer Verformung entsteht. Für die Praxis bedeutet dies, dass eine Dissoziation des Wasserstoffs an Stahloberflächen nur bei wechselnden Beanspruchungen mit der Folge plastischer Verformung an Kerben oder Risspitzen möglich ist. Beeinflusst wird die Wahrscheinlichkeit

einer möglichen Schädigung z.B. durch Höhe und Art der Schwellbeanspruchung, Frequenz, Oberflächenrauigkeit (wachstumsfähige Keime), H_2 -Druck, Temperatur und Festigkeit des Stahles. [Wasserstofftechnologie 1986]

Polymere Werkstoffe sind nicht betroffen. Zwar diffundiert Wasserstoff auch in solche Werkstoffe hinein oder durch sie hindurch (Permeation), doch ist damit keine Schädigung oder sonstige Veränderung der mechanischen oder chemischen Eigenschaften verbunden.

Für die Sicherheit von Wasserstoffsystemen ist es wichtig, dass man Probleme wie die Versprödungsgefahr schon im Entwurf berücksichtigt. Das geschieht durch die Auswahl von Werkstoffen, die unter den zu erwartenden Beanspruchungen geeignet sind.

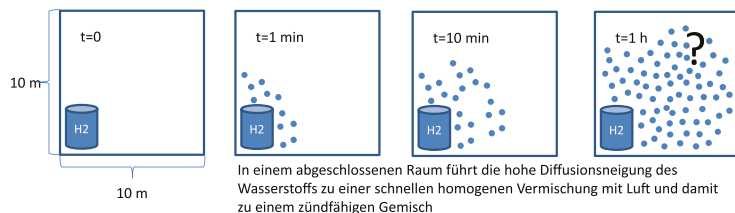
Mindestens so wichtig wie die Wahl des Werkstoffs ist die Betrachtung der Betriebsbedingungen, denn wenn die im Material auftretenden Spannungen gewisse Grenzen nicht überschreiten, kann auch ein im Prinzip anfälligerer Werkstoff seinen Zweck erfüllen. „Geeignet“ oder „ungeeignet“ sind niemals Eigenschaften eines Materials an sich, sondern hängen immer davon ab, welche Anforderungen man stellt.

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.6 Wasserstoffautos in Garagen und Parkhäusern

Verschiedentlich werden Besorgnisse hinsichtlich der Sicherheit von Wasserstofffahrzeugen in Garagen geäußert. Da es sich bei Einzelgaragen um abgeschlossene Räume handelt, die nur eine bestimmte natürliche oder vorgegebene künstliche Be- und Entlüftung haben, ist diese Sorge prinzipiell verständlich. Insbesondere da sich Wasserstoff, wenn er als Gas freigesetzt ist, durch seine hohe Diffusionsgeschwindigkeit in jede Richtung schnell ausbreitet und rasch mit Luft mischt.

Abgeschlossener Raum:



Belüfteter Raum:

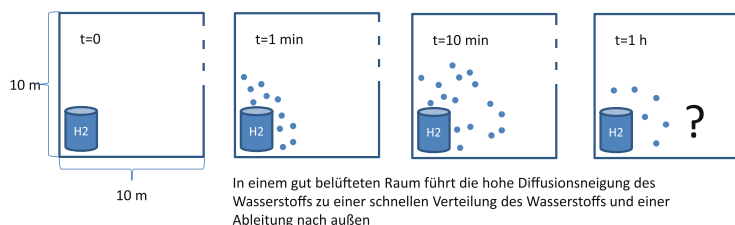


Abbildung 4: Wasserstoffausbreitung in abgeschlossenem und belüftetem Raum

und im umgebenden Feuer mit verbrannt wird, bevor er eine explosionsfähige Mischung bilden kann. Die Mengen an gasförmigem Wasserstoff, die bei einem Flüssigwassertank durch den unvermeidlichen Wärmeeintrag im Normalzustand oder die durch das Spülen einer Brennstoffzelle entstehen können, werden normalerweise katalytisch zu Wasser umgewandelt. Sollte dieser Wasserstoff jedoch direkt in die Garage eingeleitet werden, würden die gesetzlich geforderten Luftwechselraten ausreichen, um keine gefährlichen Gemische entstehen zu lassen.

Flüssigwasserstoff als Speicherlösung an Bord von Fahrzeugen wird heute von keinem Fahrzeughersteller mehr angestrebt. Aus Kryo-Druckspeichern, die noch von einigen Herstellern verfolgt werden und die den Wasserstoff auch als Druckgas bei bis zu 35 MPa speichern, würde kein Wasserstoffgas nach außen abgegeben.

Es gibt in keinem Bundesland gesetzliche Regelungen, die die Nutzung von Parkhäusern oder Garagen mit Wasserstoff-Fahrzeugen verbieten. Nur für Gase, die schwerer als Luft sind, insbesondere für Flüssiggas („Autogas“), gibt es mancherorts Beschränkungen. Allerdings steht es jedem privaten Betreiber frei, eigene Regeln aufzustellen. Versicherungsrechtliche Aspekte mögen hier eine Rolle spielen. Jedoch hat man den Eindruck, dass die oft zu sehenden Schilder „Für Fahrzeuge mit Gasantrieb verboten“ einfach schon seit Jahrzehnten dort hängen und niemand sie abgenommen hat.



Abbildung 5: Daimler BZ-Fahrzeuge an Bord einer Fähre (Quelle: Daimler AG, 2011)

Einschub: Vergleich zu anderen Kraftstoffen

Wasserstoff ist im Gegensatz zu Benzin oder Flüssiggas nicht schwerer, sondern wie Methan leichter als Luft. Wasserstoff hat von allen Brennstoffen die höchste Energiedichte pro Masse (33,33 kWh/kg – Methan: 13,9 kWh/kg – Benzin: 12 kWh/kg) und eine der geringsten Energiedichten bezogen auf das Volumen (3,0 kWh/Nm³ – Methan: 9,97 kWh/Nm³ – Benzin: 8.800 kWh/m³). In beiden Eigenschaften unterscheidet er sich deutlich von flüssigen Kohlenwasserstoffen und Erdgas oder Methan.

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.7 Druckfeste Tanks

Da Wasserstoff als Gas nur unter sehr hohem Druck einigermaßen kompakt gespeichert werden kann, müssen die Drucktanks dafür sehr stabil ausgelegt sein. Sie werden typischerweise mit Sicherheitsfaktoren von über 2 bzgl. des Betriebsdruckes ausgelegt und haben daher gegen mechanische Einwirkungen, wie sie bei einem Verkehrsunfall auftreten können, durch die Wahl festerer Materialien hohe Sicherheitsreserven. Bereits bei Tanks für Erdgas unter Druck (CNG) aus Stahl oder Verbundmaterialien mit 20 MPa Betriebsdruck ist der Effekt der deutlich höheren Festigkeit zu beobachten. Bei den mehr als drei Mal so hohen Drücken in H₂-Fahrzeugtanks aus Verbundmaterial von bis zu 70 MPa-Betriebsdruck kann von einer noch höheren Festigkeit ausgegangen werden.

Bei Unfällen mit Wasserstofffahrzeugen sind bis heute keine Tankbeschädigungen oder gar ein Tankversagen beobachtet worden. Wegen der äußerst geringen Zahl an Fahrzeugen hat dies jedoch keine statistische Relevanz. Bei CNG-Fahrzeugen hingegen ist die Zahl der Fahrzeuge und ihre Verwicklung in Unfälle in Ländern mit hoher Fahrzeugdichte (z.B. Argentinien, Brasilien, Iran, Pakistan) statistisch aussagekräftig. Aus Argentinien, einem Land mit einem hohen Anteil erdgasbetriebener Fahrzeuge, sind z.B. keine höheren Schadensfolgen bekannt als bei konventionellen Fahrzeugen, insbesondere keine Explosionen in Folge von z.B. Feuer oder Aufprall.



Abbildung 6: 70 MPa Druckwasserstofftank Typ IV (Quelle: Quantum Technologies)

Einschub: Vorkehrungen für den Fall eines Unfalls

Um für einen Verkehrsunfall mit mechanischer Deformation gut vorbereitet zu sein, werden verschiedene vorsorgende Auslegungskriterien verfolgt. Die bevorzugte Einbaustelle für Drucktanks in Fahrzeugen ist der Unterboden (z.B. Sandwichboden bei der Mercedes A- oder B-Klasse) bzw. der Raum zwischen den beiden hinteren Radkästen (weit weg von der hinteren Stoßstange und seitlich geschützt durch die Räder) oder bei Stadtbussen die Dachintegration (einerseits um Niederflurcharakteristik sicherzustellen, andererseits aber auch so weit wie möglich weg vom Kollisionsbereich wie auch an der höchsten Stelle, was bei evtl. auftretenden Undichtigkeiten vorteilhaft ist). Alle Tanks werden mit Druckentlastungseinrichtungen und Schmelzsicherungen ausgestattet, die auf Druck respektive auf Temperatur ansprechen. Die Regelarmatur schließt ein Druckreduktionsventil ein, das den Gasdruck vom Speicherdruckniveau (70 MPa) auf das Druckniveau der Gasförderleitung zur Brennstoffzelle oder zum Motor reduziert (0,2-0,3 MPa). Dies hat wesentliche Sicherheitsvorteile, falls bei einem Aufprall die Leitung vom Tank abgerissen wird, weil dann nur der deutlich verminderte Druck in der Förderleitung ansteht.

Manche Hersteller sehen auch noch einen gehäuseartigen Prallschutz um das Ventil herum vor oder integrieren das Ventil in den Druckbehälter. Auch versucht man mit so wenig Tanks wie möglich auszukommen, um die Zahl der Ventile so gering und die Längen der Rohrleitungen so kurz wie möglich zu halten. Die Rohrleitung sollte prinzipiell geschweißt sein. Der Einbauraum der Wasserstofftankgruppe wird belüftet und vom Fahrzeuginneren gasdicht abgeschlossen. Ferner sehen die Fahrzeughersteller im Innenraum an der höchsten Stelle sowie im Motorraum und auch über der Drucktankgruppe Wasserstoffsensoren vor, die bei einem Ansprechen umgehend Signal geben und die Funktionen des Fahrzeugs geordnet herunterfahren. Die Druckentlastungsleitung des Tanküberdruckventils wird meist unter den Wagen geführt, damit es im Falle eines äußeren Feuers den durch die damit verbundene Druckerhöhung abblasenden Wasserstoff gezielt dort freisetzt und abbrennen lässt, ohne vorher noch eine explosionsfähige H₂/Luftmischung herbeizuführen (dies ist ein Ergebnis von Brandversuchen).

1.8 Wasserstoffautos im Betrieb und in Unfallsituationen

Verschiedentlich werden Bedenken geäußert, dass Fahrzeuge mit Hochdrucktanks (also z.B. CNG-Fahrzeuge oder auch CGH₂-Fahrzeuge) nicht so sicher seien wie konventionelle Fahrzeuge. Insbesondere für Unfallsituationen wird diese Vermutung geäußert.

Mit Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeugen waren in den letzten 30 Jahren weltweit vermutlich fast 10 Millionen Kilometer ohne größere Unfälle gefahren worden. Auch die Brennstoffzellenfahrzeuge der neuesten Generation der letzten Jahre haben weltweit bereits viele Millionen Kilometer unter Alltagsbedingungen absolviert, zum Teil wurden sie von ganz normalen Bürgern gefahren. Auch Wasserstoffbusse

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

sind seit Mitte der 1990er Jahre im öffentlichen Stadtbusbetrieb als Prototypfahrzeuge bzw. in Demonstrationsflotten im Einsatz. Auch hier sind die Erfahrungen sowohl auf Seiten der Fahrgäste (z.B. Umwelt, Fahrgefühl, Geräusch) als auch der Betreiber (z.B. Image, Akzeptanz) positiv.

Die Unfälle, die es bisher gab, liefen ohne größere Schäden für die Beteiligten oder für Unbeteiligte ab (siehe Kapitel 1.10.5). Das gilt auch für die Wasserstoff-Transporter, die jeden Tag auf unseren Straßen unterwegs sind.

Sowohl für die Brennstoffzellen-Pkws wie auch für Brennstoffzellen-Stadtbusse wird ab 2014/15 in Deutschland die schrittweise Serieneinführung stattfinden.

Nicht nur Wasserstoff ist leicht, sondern auch seine Gemische mit Luft, so dass ein zündfähiges Gemisch nur eine kurze Aufenthaltszeit hat, in der es sich in der Nähe bodennaher Zündquellen befindet. Dies unterscheidet Wasserstoff von Benzin und Flüssiggas (Propan/Butan), die beide schwerer als Luft sind, beim Austritt am Boden verweilen und dort wegen der längeren Aufenthaltszeit eine höhere Wahrscheinlichkeit haben, sich zu entzünden.

Dass Wasserstoff bei einem Unfall überhaupt in großen Mengen freigesetzt wird, bedarf eines massiven Unfalls, vermutlich mit Totalschaden. Wasserstoffdrucktanks sind konstruktionsbedingt wesentlich widerstandsfähiger als herkömmliche Kraftstofftanks für Benzin oder auch für Flüssiggas. Sie müssen sehr hohe Drücke aushalten – bei 70 MPa CGH₂ rund 3,5 Mal so viel wie bei einem CNG-Tank mit 20 MPa. Sie haben daher sehr hohe Sicherheitsreserven. Bei einer Beschädigung von Ventilen an den Drucktanks werden Schadensfolgen u.a. dadurch eingegrenzt, dass diese Druckreduktionsventile den Druck von 70 MPa außerhalb des Tanks bereits auf sehr niedriges Druckniveau des Verbrauchers, z.B. Brennstoffzelle, reduziert haben.

Es lassen sich immer Unfallsituationen für Fahrzeuge oder Tankstellen konstruieren, die zu verheerenden Schadenseffekten führen können, für Benzin-, Erdgas-, Flüssiggas- und Druckwasserstofffahrzeuge. Eine potenzielle Gefahrensituation auch an freier Luft kann z.B. entstehen, wenn das Fahrzeug auf der Seite liegt und eine Flamme etwa aus einem abgerissenen oder beschädigten Tank(ventil) im Unterboden des Fahrzeugs seitlich herausschießt und diese Flamme im Tageslicht möglicherweise nicht oder nur schwer sichtbar ist. Dennoch sehen die Feuerwehren im deutschsprachigen Raum Wasserstoff nicht als gefährlicher an als andere Kraftstoffe. Man muss die Eigenarten verstehen, Gefahren vorab erkennen und ansprechen und sich in der Behandlung darauf einstellen.

Die Kunst der Fahrzeugauslegung besteht darin, möglichst alle realistisch vorkommenden und abfangbaren Unfallkonstellationen zu antizipieren und konstruktiv zu berücksichtigen. Das absolut sichere Verkehrsmittel dagegen gab es schon zur Postkutschenzeit nicht, und daran hat sich bis heute nichts geändert.

Einschub: Wasserstoffspeicher

Wasserstoff lässt sich auf unterschiedliche Weise speichern. Die häufigsten industriell praktizierten Speicherungsverfahren sind Druckspeicherung und tieftalige Flüssigspeicherung. Druckwasserstoff lässt sich in Behältern aus Stahl oder Verbundmaterial speichern, und zwar in Mengen wie sie z.B. in Fahrzeugen, bei Lkw-Transporten oder bei der stationären Speicherung an Tankstellen oder bei Industrie und Gewerbe eingesetzt werden. Hier sind Druckniveaus zwischen 20 und 90 MPa zunehmend üblich. Für die Speicherung von Wasserstoff in Fahrzeugen hat sich die Automobilindustrie heute auf die Verwendung von Drucktanks (ähnlich wie in erdgasbetriebenen Fahrzeugen) festgelegt.

Auch die Speicherung unter sehr geringem Überdruck (0,0022 MPa) in Gasometern ist prinzipiell möglich. Sehr große Mengen Wasser-

stoff speichert die chemische Industrie seit mehreren Jahrzehnten in Salzkavernen von zwischen 70.000 und 600.000 m³ geometrischem Volumen.

Kleinere Mengen werden in sogenannten Metallhydriden gespeichert. Hierbei handelt es sich um chemische Verbindungen von Wasserstoff in Metallen oder Metalllegierungen.

Bei allen diesen Verfahren handelt es sich um Verfahren, mit denen man langjährige, teils jahrzehntelange Erfahrung hat. Weitere Verfahren, wie etwa die Speicherung in komplexen Hydriden oder die Physisorption (oder physikalische Adsorption) von Wasserstoffmolekülen auf porösen Materialien beschränken sich auf spezielle Nischenanwendungen oder befinden sich noch in der Grundlagenforschung.

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.9 „Wasserstoffbombe“

In unterschiedlichen Umfragen zu Wasserstoff in den letzten zwei Jahrzehnten wurde von den Befragten nur selten die *Hindenburg*-Katastrophe (max. 2 % der Nennungen) genannt, deutlich häufiger dagegen die Wasserstoffbombe (im Mittel etwa 15 % der Nennungen). Letztere hat nun mit der energetischen Anwendung des Wasserstoffs z.B. im Verkehrssektor gar nichts zu tun. Dieses Antwortverhalten deutet auf eine Fehlwahrnehmung bestimmter Aspekte des Wasserstoffs hin. Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger beruht auf chemischen Reaktionen, also Vorgängen in der Elektronenhülle. Die Energiefreisetzung einer Wasserstoffbombe dagegen basiert auf der Fusion von Atomkernen wie sie im Innern der Sonne geschieht – die hierfür erforderlichen extremen Bedingungen können im alltäglichen Wasserstoffgebrauch unter keinen Umständen erreicht werden.

Einschub: Sicherheitstechnische Kenngrößen

In diesem Text ist häufig von „sicherheitstechnischen Kenngrößen“ die Rede, wie etwa Explosionsgrenzen, Zündenergien usw. Sie liefern nützliche Informationen für die Beurteilung der Gefährlichkeit einer Substanz.

Wer damit umgeht, muss sich aber darüber im Klaren sein, dass es sich bei diesen Größen nicht um wissenschaftlich wohldefinierte Eigenschaften des Stoffs handelt. Vielmehr sind es Vergleichsgrößen, die immer mit einem ganz bestimmten, genau festgelegten

Messverfahren unter genau definierten Bedingungen (Druck, Temperatur, Luftfeuchte usw.) verbunden sind. Andere Messverfahren liefern andere Ergebnisse, und eine Unfallsituation ist wieder ganz anders.

Welchen Sinn haben diese Kenngrößen dann überhaupt? Sie dienen dem sicherheitstechnischen Vergleich und der Charakterisierung verschiedener Stoffe. Es wäre aber riskant, sie bis auf die Nachkommastelle zur Beurteilung einer Gefahren- oder Unfallsituation zu verwenden.



Abbildung 7: Daimler BZ-Fahrzeuge bei Tunneldurchfahrt (Quelle: Daimler AG, 2011)

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.10 Erkenntnisse aus historischen Unfällen

1.10.1 Hindenburg

Immer wieder wird der Unfall des Zeppelins LZ129 *Hindenburg* am 6. Mai 1937 in Lakehurst (New Jersey, USA) mit einer Explosion, ausgelöst durch Wasserstoff, in Verbindung gebracht. Dies entspricht aber nicht den Tatsachen. Aus den Zeugenaussagen oder den Fotos und Filmen lassen sich keine Hinweise auf eine Explosion ableiten. Man erkennt kein Zeichen für eine Druckwelle. Das Schiff sinkt vielmehr allmählich auf den Boden und wird zwar durch das Feuer verzehrt, nicht aber durch eine Druckwelle zerfetzt. Hätte es eine Explosion gegeben, dann wäre eine solche Druckwelle freigesetzt worden, dass im nahen Umkreis die Trommelfelle oder gar die Lungen vieler Menschen zerstört gewesen wären. Es hätte also keine Fotos, Filme oder Live-Berichterstattungen gegeben.

Die plausibelste Erklärung für den Unfall ist folgende: Das Luftschiff flog den Ankermast nach einem Gewitter an, als immer noch erhebliche Potentialunterschiede zwischen verschiedenen Schichten der Atmosphäre sowie zwischen diesen und dem Boden herrschten. Der Zeppelin nahm das Potential der umgebenden Luft an. Als die Landeseile zur Fixierung des Luftschiffs bei leichtem Regen zum Boden herabgelassen wurden und feucht wurden, fand zwischen Teilen des Luftschiffs und der Erde ein Potenzialausgleich statt. Die vorher zwischen Schiff und Boden herrschende Potentialdifferenz herrschte jetzt also zwischen Teilen des Schiffs. Die hohe Feldstärke kann leicht einen Funken ausgelöst haben. Dieser setzte die metallisierte Farbe der Zeppelhülle in Brand (diese bestand aus einer Materialzusammensetzung, wie sie ähnlich heute bei Feststoffraketen verwendet wird) und diese wiederum das übrige Schiff samt Wasserstoff. Der Rest ist Geschichte.

1.10.2 Challenger

Am 28. Januar 1986 herrschten in Florida am Morgen Minustemperaturen. Das Space Shuttle mit seinen links und rechts angebrachten Feststoff-Hilfsraketen stand auf der Abschussrampe. Die beiden Flüssigtreibstofftanks mit tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff und Sauerstoff waren ebenfalls gefüllt. Als die Temperaturen wieder über den Gefrierpunkt gestiegen waren, erfolgte am Vormittag der Start des Space Shuttles. Die Shuttle/Rocket-Booster-Kombination hob perfekt ab. Nach einer Flugzeit von 73 Sekunden explodierte die Raumfähre. Was war passiert?

Die der Katastrophe nachfolgende Schadensanalyse zeigte, dass durch die nächtliche Kälte ein aus Gummi gefertigter Dichtungsring beschädigt worden war, der die Fuge zwischen zwei der zylindrischen Teile der Hülle einer der Feststoffraketen dichtete. Beim Start ist aus dieser undichten Stelle brennendes Treibstoffmaterial der Feststoffrakete ausgetreten, hat die benachbarten Wasserstoff- und Sauerstofftanks perforiert und in 15 km Höhe eine Explosion ausgelöst. Die Flammen des austretenden brennenden Feststofftreibstoffmaterials sind in den Videoaufzeichnungen zu erkennen. Wasserstoff war nicht der Auslöser der Katastrophe, sondern der Treibstoff der Feststoffrakete.

1.10.3 Tempelhofer Feld



Am Berliner S-Bahnhof Südkreuz findet man eine Straße namens *Ballonfahrerweg*, verbunden mit dem Hinweis: „Ende des 19. Jahrhunderts befand sich hier eine Luftschifferstation mit Versuchsgelände“. Damals war dies der Rand des Tempelhofer Felds, auf dessen größerem Teil nach dem Ersten Weltkrieg der Berliner Zentralflughafen angelegt wurde. Aber schon von 1885 bis 1901 wurde hier Luftfahrt betrieben. Zu dieser Zeit befand sich dort eine Basis der königlich-preußischen Luftschifferabteilung.

Die Soldaten lagerten große Mengen Wasserstoffgas für ihre Ballons. Sie verwahrten etwa 1000 Flaschen in einem Schuppen. Am 25. Mai 1894 barsten ohne ersichtlichen

Grund 400 dieser Flaschen. Der Sachschaden war erheblich. Personenschaden gab es nur deswegen nicht, weil die gesamte Einheit zu einer Übung ausgerückt war.

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

An der Untersuchung des Unfalls war der damals prominenteste deutsche Materialforscher führend beteiligt, Prof. Adolf Martens. Er stellte fest, dass der Werkstoff der Gasflaschen ungeeignet gewesen war. Zur zukünftigen Vermeidung solcher Vorfälle schlug er ein Programm zur ‚Qualitätssicherung‘ vor, wie man heute sagen würde. Dieses gilt als der Ursprung des deutschen Druckbehälterrechts.

1.10.4 Hanau

Ein Glas verarbeitender Betrieb in Hanau bei Frankfurt hatte auf seinem Gelände einen Tank für Wasserstoffgas mit einem geometrischen Volumen von 100 m³ und einem maximalen Betriebsdruck von 4,5 MPa. Am frühen Morgen des 5. Oktober 1991 barst er unvermittelt. Im weiten Umkreis wurden Dächer und Scheiben beschädigt. Durch reines Glück geschah der Unfall an einem frühen Samstagmorgen, so dass es keinen Personenschaden gab, von einigen Kratzern und Schocks beim Werksschutz abgesehen.

Der zylindrische Tank bestand aus mehreren Elementen, die aus jeweils einem Blech gewalzt waren, dessen Enden durch eine Längsnaht miteinander verschweißt wurden. Ausgangspunkt des Risses war eine dieser Schweißnähte gewesen.

Die genaue Untersuchung zeigte fabrikationsbedingte Abweichungen von der Kreisform. Eine sogenannte ‚Aufdachung‘ hatte zu erhöhten Spannungen im Bereich der Schweißnaht geführt. Diese führten früher als normal zu ersten Anrissen, die sich dann auch recht bald in die Schweißnaht ausbreiteten. Eines Tages war in der 22 mm dicken Wand ein an der tiefsten Stelle 20 mm tiefer Riss. Das musste zum Versagen führen.

Als Konsequenz aus dem Unfall wurden die Verfahren zur Überprüfung der Tanks auf Anrisse und die Methoden zur Vorhersage der Restlebensdauer verbessert sowie die Vorschriften für die Fertigung überarbeitet.

1.10.5 Verkehrsunfälle

Beispiel: Unfall eines H₂-Fahrzeugs im Straßenverkehr

Am 22. Februar 2010 schob in Washington D.C., USA, ein Pick-up Truck ein mit Wasserstoff- Brennstoffzellen betriebenes Fahrzeug, den H₂-BZ-Equinox (HydroGen4), in einen weiteren Pick-up Truck. Ergebnis war, dass alle Sicherheitssysteme an Bord des H₂-Equinox wie ausgelegt funktionierten und kein Wasserstoffgas austrat. Das Fahrzeug jedoch war ein Totalschaden.



Abbildung 8: Unfall eines GM H₂-BZ-Equinox in einen Auffahrunfall am 22.02.2010 in Washington D.C. (USA Today 2010)



Abbildung 9: Anordnung der H₂-Sensoren an Bord eines HydroGen4 [Sachs 2010]

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

Beispiel: Unfälle von H₂-Produkttransportern:

So wie andere Gefahrguttransporte trotz hoher Sicherheitsanforderungen beim Betrieb ab und an in Unfälle verwickelt sind, so betrifft dies statistisch auch Wasserstofftransporte. Vermutlich verunglückt in Deutschland im Mittel jedes Jahr ein H₂-Transporter. Aufgrund der hohen Sicherheitsstandards gab es bisher nur begrenzte Unfallfolgen und - soweit bekannt - keine durch den Wasserstoff verursachten Todesfälle.

Vier beispielhafte Wasserstoff-Transport-Trailer-Unfälle in Deutschland und Italien werden im Folgenden dargestellt:

Unfall 07. März.2001

Im Stop-and-Go-Verkehr an der Ausfahrt Köln-Lövenich bemerkte ein Lkw-Fahrer vermutlich zu spät, dass der Gefahrguttransporter vor ihm bremste, und fuhr auf. Der Transporter kippte um, bei dreien der neun mit Wasserstoff gefüllten Tanks wurden die Ventile beschädigt.

Das austretende Gas geriet sofort in Brand, die zwei Meter langen Flammen griffen auf den LKW über.

Dann folgte der Großeinsatz der Rettungskräfte: Über 200 Feuerwehrmänner und 100 Polizisten rückten an, um das Schlimmste zu verhindern - das Bersten eines der Wasserstofftanks. Im Umkreis von 250 Metern wurde das Gebiet rund um die Unfallstelle evakuiert.

Mit 20 Tanklöschfahrzeugen aus Köln, dem Erftkreis, Bonn und dem Kreis Rhein-Sieg versuchte die Feuerwehr, die neun röhrenförmigen Behälter zu kühlen. Hätte sich einer der Tanks so erhitzt, dass er versagt hätte, wäre der Inhalt schlagartig freigesetzt geworden, was zu ernstesten Folgen geführt hätte. Sechs dicke Schläuche wurden zur Unfallstelle verlegt, weil das Wasser der Löschfahrzeuge nicht ausreichte. Wegen der Berstgefahr übernahm ein unbemannter Wasserwerfer die permanente Kühlung.

Am späten Nachmittag war das Gas in den Behältern im Wesentlichen verbrannt und die verbliebenen Flammen so klein, dass die Feuerwehr für die Anwohner keine Gefahr mehr sah. Dennoch blieben die Einsatzkräfte die ganze Nacht über am Unfallort.

Die zunehmende bessere Abstimmung zwischen Wasserstoffsicherheitsexperten und Feuerwehrspezialisten und darauf aufbauendes Training sowie geeignete Ausrüstung wird in Zukunft zu einem fokussierten und effektiven Einsatz von Löschinstrumenten und -mitteln beim Bekämpfen von Unfällen führen. Überflüssige Störungen des öffentlichen Lebens durch wohlgemeinte, aber nicht fundierte Sicherheitsängste müssen vermieden werden.

Unfall 3. April 2001

Kurz hinter einer Autobahnabfahrt verlor ein Fahrer die Kontrolle über seinen Sattelzug, nachdem er laut eigenen Angaben einem Hasen hatte ausweichen wollen. Der tonnenschwere Lkw kippte um; dabei wurde eine Verbindungsleitung zwischen den Gasbehältern zerstört. Die Feuerwehr sperrte die Unglücksstelle weiträumig ab, ließ das Gas kontrolliert entweichen und spülte die Tanks anschließend mit Stickstoff. Danach konnte der Lkw mit einem Kran aufgerichtet und abgeschleppt werden.

Unfall März 2003 ¹

Unfall eines Röhrentrailers in Cessalto, Veneto, Italien. Verschiedene Fahrzeuge und der Trailer waren in den Unfall verwickelt. Autos waren unter den Trailer geschoben und brannten. Die Feuerwehr konnte mit Infrarotkameras an einer unten liegenden Flasche einen Flammenstrahl erkennen sowie eine deformierte Flasche. Es wurde beschlossen, die Tanks, die nur einen Restdruck von 1,5 MPa hatten, mit Löschwasser zu kühlen und die Flamme ausbrennen zu lassen.

Unfall Februar 2004

Unfall eines Röhrentrailers in Serravalle a Po, Mantua, Italien. Der Trailer kam von der Straße ab und blieb in einem Feld liegen. Als die Feuerwehr mit Hilfe einer Infrarotkamera festgestellt hatte, dass keine Erhitzung vorlag, nur ein Ventil gebrochen war und alle anderen Ventile der 20 MPa Speicher geschlossen und dicht waren, veranlasste sie die Aufrichtung des Röhrenbündeltrailers mit Gurten durch einen Kranwagen. Es war kein Feuer aufgetreten.

¹ Pilo, Munaro, Zanardo., Hydrogen Transport Safety: Case of Compressed Gaseous Tube Trailer, 2004

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.11 Sicherer Betrieb existierender Anlagen - Beispiele

1.11.1 Tankstellen

Weltweit sind mehr als 200 Wasserstofftankstellen auf drei Kontinenten in Betrieb, etwa 130 in der konkreten Planung und für die nächsten fünf Jahre hunderte in der Vorplanung. Die Erfahrungen mit den Tankstellen hinsichtlich ihrer Sicherheit scheinen durchweg positiv zu sein. Es sind keine schwerwiegenden sicherheitsrelevanten Vorkommnisse oder gar Unfälle bei der Nutzung von H₂-Tankstellen durch Autonutzer über die letzten mehr als 10 Jahre bekannt. Ein Unfall ereignete sich an einer 70 MPa-Zapfsäule, bei dem ein Fahrzeug beim Rückwärtsfahren die Zapfsäule mit der Anhängerkupplung unter dem Anfahrerschutz touchierte und um etwa 20cm versetzte. Dies führte zum sofortigen Schließen der doppelseitig abschließenden Ventile und zum Austritt der für diesen Fall vorab als unkritisch ermittelten Wasserstoffmenge. Es kam allerdings bereits zu Unfällen bei der Anlieferung von Wasserstoff mit Trailern und hier beim Umfüllen vom Trailer in die Tankstellentanks zur Freisetzung größerer Wasserstoffmengen. Alle diese Unfälle waren beherrschbar, blieben auf die Anlagen selbst beschränkt und haben nicht zu Personenschäden geführt.



Abbildung 10: Shell-Tankstelle am Sachsendamm
in Berlin, 2011



Abbildung 11: Zero Regio 35 MPa + 70 MPa
H₂-Tankstelle
Frankfurt Höchst, Deutschland

1.11.2 Chemische Industrie

In der chemischen Industrie wird Wasserstoff seit mehr als hundert Jahren mit exzellenten Sicherheits-erfahrungen verwendet. Wie bei allen chemischen Medien, die brennbar oder explosionsfähig sind, geschehen auch bei der Verwendung von Wasserstoff Unfälle. Dennoch gibt es keinerlei Hinweise darauf, dass die Gefährdung durch Wasserstoff höher ist als die durch irgendein anderes vergleichbares brennbares Medium.

Der meiste Wasserstoff wird von der chemischen Industrie produziert und wird auch von dieser vor Ort verbraucht. Jedes Jahr liefert die chemische Industrie (also die Gasfirmen) darüber hinaus in Deutschland etwa 200 Mio. Nm³ Wasserstoff in flüssiger oder in hoch komprimierter Form an Kunden. Auch hier ist die Sicherheitserfahrung exzellent und die Handhabung ebenso sicher wie bei anderen Gefahrstoffen (Benzin, Diesel, Flüssiggas, usw.).

1. TEIL I – WASSERSTOFFSICHERHEITSFRAGEN

1.12 Schlussfolgerungen

Wasserstoff wird als Langzeitspeicher großer Strommengen in einer zunehmend auf regenerativem Strom basierenden Energiewirtschaft sowie als Kraftstoff für Straßenfahrzeuge benötigt.

Wasserstoff selbst ist nicht explosionsfähig und kann nur in Mischungsverhältnissen ab 4 % H₂ in Luft gezündet werden. Detonationen treten in freier Luft praktisch nicht auf, müssen aber in beengten und stark verbauten Räumen durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen verhindert werden.

Wasserstoff kann in Druckspeichern, auch mit hohen Drücken, in Metallhydridspeichern, als tiefkalte Flüssigkeit und in unterirdischen Salzkavernen sicher und ohne Verluste gespeichert und in Pipelines ohne Verluste sicher transportiert werden. Diffusion, Permeation und Versprödungseffekte von Wasserstoff im Zusammenhang mit metallischen Werkstoffen kennt man seit vielen Jahrzehnten und hat diese durch richtige Auslegung und Materialwahl im Griff. Für alle diese infrastrukturellen Einsatzbereiche liegen jahrzehntelange Erfahrungen vor. Der Einsatz von Wasserstoff in Komponenten und Produkten aus Kunststoffverbundmaterialien existiert erst seit ein bis zwei Jahrzehnten, und auch hier gewinnt man zunehmend verlässliche praktische Erfahrung, sodass diese Materialien ebenfalls sicher eingesetzt werden können.

Der Betrieb von Fahrzeugen mit Druckwasserstoffspeichern in Garagen und Tunneln wird als sehr sicher eingeschätzt, da die Zulassungsverfahren sehr streng sind. Die bereits heute in Garagen und Tunneln eingebauten Ventilationssysteme haben für den Normalbetrieb von Wasserstofffahrzeugen völlig ausreichende Luftwechselraten. Ob die Ventilatoren explosionsgeschützt ausgeführt werden müssen, ist bisher noch nicht abschließend geklärt und hängt erheblich von den angenommenen Szenarien ab.

Unfallsituationen mit Wasserstofffahrzeugen erscheinen nach heutigen Kenntnissen als nicht gefährlicher als solche mit Fahrzeugen, die mit anderen Kraftstoffen betrieben werden (Benzin, Flüssiggas, Erdgas). Im Einzelfall kann bei der Sicherung der Unfallstelle und bei der Unfallbekämpfung eine andere Vorgehensweise als z.B. bei Unfällen mit Benzinfahrzeugen erforderlich sein. Alle bisherigen Unfälle mit H₂-Kraftfahrzeugen sowie mit CGH₂- und LH₂-Trailern waren beherrschbar bzw. weniger folgenreich als bei anderen brennbaren Gasen.

Weltweit werden bedeutende Mengen von Wasserstoff mit Trailern auf Straßen transportiert. Auch sind bereits über 200 Wasserstofftankstellen in Betrieb. Die bisherigen sicherheitsrelevanten Erfahrungen sind positiv und zeigen, dass diese Technologie im täglichen Einsatz beherrschbar und benutzbar ist.

Der Einsatz von Wasserstoff in der Industrie, aber auch zunehmend im täglichen Leben (Brennstoffzellenfahrzeuge, H₂-Tankstellen) scheint im Vergleich zu anderen Technologien nicht gefährlicher zu sein bzw. die Risiken erscheinen nicht unzumutbar hoch und können ohne besonders aufwendige Maßnahmen bewältigt werden.

Kontinuierliche wissenschaftliche Forschung, technische Weiterentwicklung sowie zunehmend harmonisierte Normung und internationale Regelwerke vereinfachen den Einsatz der H₂- und Brennstoffzellen-Technologien. Dabei kommt es zu Vereinheitlichung, die Technologie wird den täglichen Erfordernissen immer besser angepasst und auf diese Weise praktisch und sicher für den Massenmarkt nutzbar gemacht. Abschließend ist es Sache der Gesellschaft, Nutzen und Risiken einer Technik gegeneinander abzuwägen und sich für ihren Einsatz zu entscheiden oder diesen abzulehnen.

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.1 Explosionsschutz

Beim Explosionsschutz unterscheidet man verschiedene Stufen.

Zum **primären** Explosionsschutz (Vermeidung explosionsfähiger Gemische) gehört, einen Austritt brennbarer Gase möglichst überhaupt zu vermeiden, indem man die Anlagen technisch dicht ausführt, lösbare Verbindungen auf ein Minimum beschränkt usw. Außerdem gehört dazu, einen dennoch auftretenden Austritt von Gas rechtzeitig zu entdecken und das Gas so schnell wie möglich gefahrlos abzuleiten, etwa durch sich automatisch öffnende Fenster oder durch Ventilatoren, bevor die Gemischkonzentration die untere Explosionsgrenze überschreitet. Die dafür erforderlichen Sensoren sollten einerseits in der Nähe der möglichen Austrittsstellen angeordnet sein, andererseits unter Berücksichtigung der Eigenschaften von Wasserstoff an der höchsten Stelle des Raumes oder so hoch wie möglich. Weiter sollte durch rasches Unterbinden der Gaszufuhr die Gasmenge, die austreten kann, auf ein Minimum beschränkt werden.

Zum **sekundären** Explosionsschutz (Vermeidung von Zündquellen) gehört die explosionsgeschützte Auslegung der elektrischen und sonstigen Anlagen in Räumen, in denen die Entstehung eines Gemischs nicht ganz ausgeschlossen werden kann. Wenn möglich, sollten statt elektrischer Komponenten andere verwendet werden (z.B. pneumatische Ventile statt Magnetventilen). Auch die richtige Erdung aller relevanten Teile und leitfähige Fußböden gehören in diesen Bereich.

Darüber hinaus gibt es den **konstruktiven** (manchmal auch „tertiären“) Explosionsschutz. Er besteht darin, die Anlagen und Gebäude, in denen sich eine Explosion ereignen könnte, entweder druckfest auszuführen oder so zu gestalten, dass der durch eine Explosion angerichtete Schaden stark eingeschränkt wird und keine Menschen gefährdet werden (Druckentlastungsöffnungen, Ableitung usw.). Es handelt sich dabei also nicht um die Verhinderung von Explosionen, sondern um die Beschränkung des durch sie angerichteten Schadens.



Abbildung 12: Experiment mit pneumatischen Ventilen und darüber installiertem Gassensor

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.2 Austritt und Ausbreitung von Wasserstoff

2.2.1 Wolkenausbreitung

Freigesetzter Wasserstoff bildet im Gemisch mit Luft ein reaktionsfähiges Gasgemisch, von dem eine Explosionsgefahr ausgeht. Wegen des weiten Explosionsbereichs von Wasserstoff/Luft-Gemischen kann man in aller Regel davon ausgehen, dass zumindest in Teilen des Gemisches die notwendigen Konzentrationen vorliegen. Aufgrund der geringen Größe des Wasserstoffmoleküls und der damit verbundenen hohen Neigung zur Diffusion breitet sich eine solche Wolke rascher aus als andere und erreicht vorhandene Zündquellen schneller.

Die schnelle Ausbreitung einer Wasserstoff/Luft-Wolke hat aber auch eine andere Seite: Die Wolke verdünnt sich dabei. Daher wird die Konzentration schneller die untere Explosionsgrenze unterschreiten als es bei Wolken der Fall ist, die von anderen Brenngasen erzeugt werden.

Die genaue Beurteilung der Gefahren, die mit einem ungeplanten Austritt von Wasserstoff verbunden sind, ist also immer abhängig von den Umständen des Einzelfalls.

2.2.2 Wolke steigt nach oben

Wasserstoff ist das leichteste aller Gase. Ein Gemisch aus Wasserstoff und Luft ist daher immer leichter als Luft. Eine Gemischwolke hat also einen Auftrieb und wird aufsteigen.

Bei einer Freisetzung von Wasserstoff im freien Gelände ist das in der Regel ein Vorteil. Zündquellen befinden sich meist am Boden oder dicht darüber. Durch die Bewegung nach oben vermindert sich die Fläche am Boden, auf der die untere Explosionsgrenze überschritten werden kann. (Zur Freisetzung im Gebäude siehe Abschnitt 2.2.3.)

Es wäre aber ein gefährlicher Trugschluss, zu glauben, dass eine Wasserstoff/Luft-Wolke sich ausschließlich nach oben ausbreitet. Der Auftrieb ist nur eine der Kräfte, die hier wirken. Die andere ist die Diffusion, die die Wolke in alle Richtungen ausbreitet, denn Diffusion wird nicht von Unterschieden der Dichte, sondern von solchen der Konzentration angetrieben. Da nun überall um die Wolke herum die Wasserstoff-Konzentration geringer ist als in der Wolke, erfolgt Diffusion in alle Richtungen, auch abwärts. Meist ist die Bewegung als Folge des Auftriebs schneller als die Ausbreitung durch Diffusion, aber auch hier kommt es auf die Umstände der Freisetzung an.

Zudem darf man die Geschwindigkeit, mit der der Auftrieb wirksam werden wird, nicht allein nach der Dichte des reinen Wasserstoffs unter Normbedingungen abschätzen. Es liegt im Allgemeinen nach der Freisetzung kein reiner Wasserstoff vor, sondern ein Gemisch. Bei einer Konzentration von 20% (ein Wert, der bei einer unfallbedingten Freisetzung nur sehr selten erreicht werden dürfte) beträgt die Gesamtdichte der Wolke immer noch 81% der Dichte von Luft. Falls der austretende Wasserstoff sehr kalt ist (Verdampfung von Flüssigkeit oder Abkühlung durch Entspannung), besteht die Wolke zum Teil aus kondensierter Luftfeuchtigkeit, wodurch sich die Gesamtdichte weiter erhöht. Eine solche Wolke kann durchaus einige Minuten in Bodennähe bleiben, bis sie sich ausreichend erwärmt hat.

Wasserstoff verschwindet also in der Tat schneller als andere Gase nach oben, aber niemand darf glauben, er wäre augenblicklich weg. Dennoch ist seine geringe Dichte sicherheitstechnisch betrachtet ein Vorteil. Man braucht z.B. nicht zu befürchten, dass das an der Erdoberfläche freigesetzte Gas in gefährlichen Mengen in Keller, Tiefgaragen, Gräben, die Kanalisation oder andere tiefer gelegene Räume eindringt und lange dort verweilt.

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.2.3 Unterschied freies Gelände / Gebäude

Bei einer Freisetzung in einem Gebäude liegen die Verhältnisse ein wenig anders als im freien Gelände. Hier ist es durchaus möglich, dass sich Zündquellen oberhalb der Austrittsstelle befinden, z.B. Deckenlampen. Daher müssen in Gebäuden, in denen der Austritt von Wasserstoff oder anderen brennbaren Gasen möglich ist (Werkstätten, Labors), entsprechende Maßnahmen für den Explosionsschutz getroffen werden, zumindest in den Räumen oder Gebäudeteilen, die gefährdet sein können. Welche das sind, ergibt sich je nach Art des Gebäudes und Wahrscheinlichkeit eines Austritts aus den anzuwendenden Regelwerken. Die Verantwortung für deren Einhaltung liegt beim Arbeitgeber bzw. beim Besitzer des Gebäudes.

2.2.4 Flüssiger Wasserstoff

Insbesondere beim Straßentransport größerer Mengen wird Wasserstoff oft in tiefkalter verflüssigter Form transportiert. Grundsätzlich gilt hier das Gleiche wie oben, doch kommt noch die Verdampfung der Flüssigkeit hinzu sowie die Auswirkungen der tiefen Temperatur.

Flüssiger Wasserstoff hat eine Temperatur, die um etwa 270 Grad unter der normalen Umgebungstemperatur liegt. Dieses erhebliche Temperaturgefälle bewirkt einen großen Wärmeeintrag in die Flüssigkeit, was zu einer schnelleren Verdampfung führt als bei höher siedenden tiefkalt verflüssigten Gasen.

Ist die Verdampfung langsamer als der Nachschub an Flüssigkeit, bildet sich eine Lache. Wegen der schnellen Verdampfung ist diese im Fall von Wasserstoff kleiner und verschwindet schneller als im Fall von flüssigem Stickstoff, Sauerstoff oder Erdgas. Die Wärme wird größtenteils dem Boden entzogen. Selbst falls der Wasserstoff brennen sollte, trägt das Feuer nur wenig zur Verdampfung bei, weil brennender Wasserstoff nur wenig Wärmestrahlung erzeugt.

Der Boden unter der Lache wird durch den Kontakt mit der Flüssigkeit extrem kalt. Auch nach dem Verschwinden der Lache dauert es eine Weile, bis er wieder zu seinem normalen Zustand zurückkehrt.

Informationen über einen Feldversuch der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung gibt es als Video unter http://www.bam.de/filme/bam_030/film_030_wasserstoff.htm.

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass sich H₂-Luft-Gemische, die sich über ausgelauftenem tiefkalten Wasserstoff bilden, weniger reaktiv verhalten. Ursachen hierfür sind die niedrigen Temperaturen und der geringere Grad an Turbulenz, der bei den Freisetzungen unter den relativ niedrigeren Drücken erzeugt wird.

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.3 Diffusion und Permeation

2.3.1 Was ist das, und warum kann es gefährlich sein

Diffusion ist ein auf der statistischen Bewegung von Teilchen („Brownsche Molekularbewegung“) beruhender Prozess, der nach genügend langer Zeit zur vollständigen Durchmischung zweier oder mehrerer Stoffe führt, z.B. Wasserstoff und Luft. Wasserstoff hat in Luft einen sehr hohen Diffusionskoeffizienten² von $6,1 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Andere Gase bzw. gasförmige Substanzen wie z.B. Methan und Benzindampf haben in Luft deutlich niedrigere Diffusionskoeffizienten von $1,6$ und $0,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Die Diffusion gleicht Konzentrationsunterschiede aus, nicht Druckunterschiede. Dieser Effekt wirkt insbesondere im Nano- bis Mikrometerbereich, denn darüber überwiegt in Gasatmosphären meist die Konvektion durch Luftströmungen.

Diffusion kann auch durch poröse Strukturen erfolgen; im atomaren Maßstab sind die meisten uns fest erscheinenden Stoffe mehr oder weniger gitterartig, und man spricht bei makroskopisch dichten Materialien wie z.B. Behälterwänden dann auch von Permeation. Gasmoleküle können aufgrund ihrer geringen Größe, wie z.B. bei Wasserstoff, durch Materialien hindurchwandern. Die Permeation wird durch Konzentrationsunterschiede ausgelöst, die bei Drucktanks z.B. durch Druckunterschiede hervorgerufen werden.

Druckwasserstoff in Speicherbehältern wandert umso schneller durch Behälterwandmaterialien je höher der Speicherdruck ist und je höher die Materialtemperatur steigt. Für Tanks mit metallischen Wandmaterialien ist die Permeationsrate wie zuvor beschrieben vernachlässigbar.

Das Projekt HySafe [HySafe 2009] hat Untersuchungen zu zulässigen Permeationsraten vorgenommen bzw. Informationen zusammengetragen und bewertet. Für neue Fahrzeugspeichertanks wurden folgende zulässigen Permeationsraten in Nml/hr/l³ vorgeschlagen: 4,2 Nml/hr/l (bei 10°C), 6 Nml/hr/l (bei 15°C) und 8 Nml/hr/l (bei 20°C). Am Ende des Tanklebens sollten nicht mehr als 90 Nml/hr/l bei einer minimalen Testtemperatur von 55°C je Fahrzeug durch Permeation verloren gehen.

² Diffusionskoeffizient: der Teilchenstrom zwischen Gebieten hoher und niedriger Teilchenkonzentration ist proportional zum Konzentrationsgradient, d.h. zur Stärke der Konzentrationsänderung; die Proportionalitätskonstante ist der Diffusionskoeffizient, der vom diffundierenden Medium (z.B. Wasserstoff) und seiner Umgebung (z.B. Luft) abhängig ist.

³ Nml/hr/l: Milliliter Gasvolumen bei Normalbedingungen je Stunde und je Liter geometrisches Tankvolumen ($1 \text{ ml} = 1 \text{ cm}^3 = 1 „\text{ccm}“ = 1 „\text{cc}“ = 0,001 \text{ l}$)

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.3.2 Was es nicht bedeutet: Gasflasche leer

Obwohl Wasserstoff als Molekül und insbesondere als Atom sehr klein ist und leichter als andere Substanzen durch Materialien wandern kann, wird er bei geeigneter Materialwahl über vorgegebene Auslegungszeiträume nicht in nennenswerter Menge entweichen.

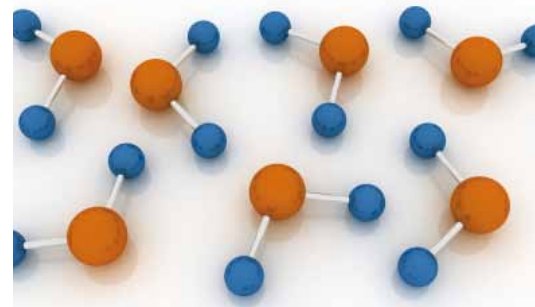
Weitere Informationen dazu siehe 1.4.

2.3.3 Metalle

Die Permeation von H_2 -Molekülen durch metallische Behälterwände ist in praktischen Anwendungen vernachlässigbar (siehe Seite 13, 1.4: 60 Jahre lang in Stahlflaschen eingeschlossener Wasserstoff, gefunden im Chemiewerk im Jahre 1998).

2.3.4 Verbundwerkstoffe

Für Tanks mit nicht-metallischem Liner aus Polymermaterialien (Typ 4) gilt die Aussage vernachlässigbarer Permeationsraten wie im Fall metallischer Liner nicht mehr. Die Permeation von H_2 -Molekülen durch Behälterwände aus Verbundwerkstoffen (z.B. gewickelte Kohlefasern eingebettet in Harz, welche die Innenauskleidung des Tanks umschließen) ist in praktischen Anwendungen nicht vernachlässigbar. Mit hochvernetzten Polymeren als Linermaterial können jedoch beinahe ebenso niedrige Permeationsraten erreicht werden wie mit Aluminiumlinern. Ein wichtiger Unterschied zwischen Metallen und Verbundwerkstoffen bei der Permeation ist, dass der Wasserstoff mit Metallen chemisch und physikalisch reagiert, mit Verbundwerkstoffen hingegen nicht. In Verbundwerkstoffen kann die Permeation des Wasserstoffs bei der Suche nach dem schnellsten Weg durch das Material aufgrund der „gröberen“ Raumstruktur und evtl. vorliegender Hohlräume (im Kohlefaser-Epoxid-Komposit) verlangsamt und bei Druckbetankung und Temperaturzunahme sogar teilweise umgekehrt werden.



2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.4 Negativer Joule-Thomson-Koeffizient

Der Joule-Thomson-Effekt tritt auf, wenn ein reales Gas oder Gasgemisch durch Drosselung unter der Bedingung konstanter Enthalpie (isenthalpe Entspannung) eine Temperaturänderung erfährt. Es handelt sich um eines der wichtigsten Verfahren bei der Erzeugung tiefer Temperaturen und zur Verflüssigung von Gasen.

Eine Abkühlung tritt allerdings nur ein, wenn das Gas sich vorher schon unterhalb der stofftypischen „Inversionstemperatur“ befindet. Diese beträgt abhängig vom ortho-/para-Anteil für Wasserstoff etwa 190-200 K, also deutlich unter der normalen Umgebungstemperatur. Oberhalb dieser Temperatur führt der Joule-Thomson-Effekt zu Erwärmung. Zuweilen wird behauptet, diese könnte zu einer Zündgefahr führen.

Genauere Betrachtung zeigt, dass selbst unter idealen Bedingungen allenfalls Temperaturanstiege in der Größenordnung 10 K zu erwarten sind. Eine Zündgefahr besteht nicht. Zudem ist zwischen verschiedenen Randbedingungen bei der Entspannung zu unterscheiden. Wasserstoff bei Raumtemperatur z.B. wird beim Joule-Thomson-Prozess wärmer, kühlt sich bei adiabatischer Entspannung dagegen ab. Bei einer ungeplanten realen Freisetzung überwiegt typischerweise der zuletzt genannte Effekt

2.5 Sicherheitsvorteile von Wasserstoff

Wasserstoff hat einen hohen Diffusionskoeffizienten, mischt sich sehr schnell mit Luft und verdünnt sich dabei. Dies hat im Freien entscheidende Vorteile hinsichtlich der schnelleren Verdünnung eines explosionsfähigen Gemisches und seiner kürzeren Lebensdauer. In Innenräumen kehrt sich dieser Vorteil in einen Nachteil um, weil die Wolke nur schwer entweichen kann. In Gebäuden oder Fahrzeugen wird diesem mit Sensoren begegnet, die bei etwa 0,4% H_2 in Luft Voralarm auslösen und bei 1% H_2 in Luft Hauptalarm. Im Normalbetrieb sind Wasserstoffspeicher- und -leitungssysteme prinzipiell als inhärent dicht ausgelegt anzusehen, sodass der Austritt von H_2 sehr unwahrscheinlich ist. In Großgaragen liegt normalerweise eine so hohe Luftwechselrate vor, dass selbst wenn kleinere Leckagen auftreten würden, kein Sicherheitsrisiko entstehen würde. Im Falle eines Feuers brennt Wasserstoff sehr schnell ab. Daher, und auch weil H_2 keinen Kohlenstoff enthält und damit die wärmetransportierende Infrarotstrahlung deutlich niedriger ausfällt als bei allen kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen, ist die Wärmeabgabe zeitlich sehr begrenzt.



2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.6 Was tun im Falle eines Falles

2.6.1 Verkehrsunfall

Bisher waren in Unfälle meist Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotoren und den dazu gehörigen Kraftstofftanks verwickelt. Seit etwa 20 Jahren verändert sich diese Situation bei uns und weltweit schrittweise. Zuerst kamen CNG-Fahrzeuge mit 20 MPa-Drucktanks, in denen das Erdgas gespeichert ist. Dann kamen Flüssiggasautos mit sogenanntem Autogas, einer Mischung aus Butan und Propan, im Tank (1 MPa Druck). Beide Fahrzeugtypen verwenden Ottomotoren als Antrieb. Seit etwa 10 Jahren gesellen sich zu diesen Fahrzeugen Hybridfahrzeuge. Diese haben zwar einen konventionellen Motor, aber auch eine mehr oder weniger große Batterie, die ihren Strom mit hoher Spannung von zwischen 300V und 500V an die Antriebselektromotoren liefert.

Zusätzlich werden ab 2014/15 serienmäßig gefertigte Brennstoffzellenfahrzeuge dazukommen, die Hybridfahrzeuge sind. Sie haben also kleinere Batterien mit an Bord und werden mit hohen Spannungen betrieben. Dazu kommt Wasserstoff in Drucktanks von bis zu 70 MPa.

Alle diese ‚neueren‘ Antriebstechniken der letzten 20 Jahre stellen veränderte Anforderungen an die Rettungskräfte, die als erste am Unfallort eintreffen. Das größte Gefährdungspotenzial bietet zuerst einmal die hohe Spannung von Elektrofahrzeugen aller Art (Hybrid-, Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge). Die anliegende Spannung muss nach einem Unfall durch einen Notausschalter sicher abgeschaltet werden können. Zusätzliches Gefährdungspotenzial bieten die hohen Drücke bei Gasfahrzeugen (insbesondere Druck-Erdgas- und Wasserstofffahrzeuge). Die meisten dieser Fahrzeuge sind von außen nicht als solche erkennbar. Deshalb wird für Wasserstofffahrzeuge eine außen angebrachte Kennzeichnung vorgeschrieben. Im Brandfall ist diese möglicherweise jedoch nicht mehr erkennbar. Auch eine für jeden Fahrzeugtyp existierende Rettungskarte⁴ hilft nur, wenn sie auch noch unter den typischen Unfallbedingungen zugänglich ist. Eine dritte Möglichkeit ist das vermutlich ab 2014 in Europa für Neuwagen vorgeschriebene eCall-System, das im Falle eines Unfalls über ein GSM-Mobiltelefoniesystem automatisch die Rettungsdienste ruft und dabei gleichzeitig die GPS-Koordinaten sowie die Eigenschaften des verunglückten Fahrzeugs angibt. Bei diesen Fahrzeugen wissen die eintreffenden Rettungsteams dann ziemlich genau, um welchen Fahrzeugtyp es sich handelt und ob sie z.B. eine isolierte Rettungsschere benötigen, wie sie für Elektrofahrzeuge erforderlich werden kann, wenn diese nicht vollständig abgeschaltet sind. Ferner wissen sie dann auch, wo in diesem Fahrzeug druckführende Leitungen verlaufen (so wie dies auch aus einer Rettungskarte entnommen werden kann). Die Rettungsdienste sind bereits seit Jahren dabei, sich auf diese veränderte Situation (Hochspannung, Hochdruck) einzustellen und vorzubereiten.

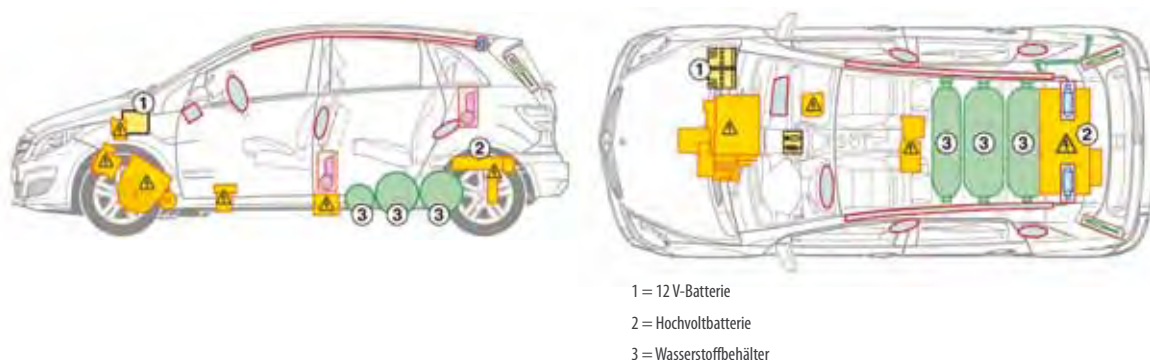


Abbildung 13: Rettungskarte Mercedes B-Klasse F-Cell Typ 245 (Quelle: Daimler AG)

⁴ Rettungskarten: <http://www.adac.de/infotestrat/ratgeber-verkehr/sicher-unterwegs/rettungskarte/default.aspx?ComponentId=32955&quer=rettungskarte>

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.6.2 Gasaustritt im Gebäude

In Deutschland hört man über das Jahr verteilt immer wieder von Unfällen durch Gasexplosionen in Wohnhäusern, seltener in Gewerbebetrieben. Hier handelt es sich vorwiegend um durch Erdgas, manchmal auch durch Flüssiggas verursachte Explosionen. In den meisten Fällen wurde unsachgemäß (und oft absichtlich) an Gasinstallationen hantiert, was dann früher oder später zu Undichtigkeiten führt, zur Freisetzung von Gas und dessen Entzündung durch eine Zündquelle (z.B. Lichtschalter oder überspringender Funke einer elektrostatischen Aufladung). Aber auch kriminelle Machenschaften oder Selbstmordversuche waren schon ursächlich für Gasexplosionen. Keiner dieser Fälle war bisher Anlass für Erwägungen, die Nutzung von Erdgas einzustellen.

Eine geeignete sicherheitstechnische Ausführung von Gasinstallationen sowie deren regelmäßige Überprüfung gewähren ein hohes Maß an Sicherheit. Im gewerblichen Bereich werden Gasendnutzungsgeräte sogar durch Sensoren überwacht, was ein zusätzliches Maß an Sicherheit und Vorwarnzeit ermöglicht.

Bisher wird Wasserstoff in Innenräumen typischerweise in Labors oder in industriellen Einrichtungen verwendet. Hier wird erstens durch geeignete konstruktive Auslegung sichergestellt, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Leckagen auf ein Minimum reduziert wird. Außerdem werden diejenigen, die mit Wasserstoff umgehen, im richtigen Umgang unterwiesen. Ferner sind diese Einrichtungen durch Sensoren überwacht, die typischerweise bei etwa 10% der unteren Zündgrenze, also bei 0,4% H₂ in Luft, einen Voralarm und bei 25% der unteren Zündgrenze also 1% H₂ in Luft den Hauptalarm auslösen. Es bleibt also ausreichend Zeit für Abschaltung, Lüftung und Evakuierung.

Bei einer Nutzung von Wasserstoff durch Privatleute, die meist Laien sind, z.B. in Wohngebäuden, müssen diese Sicherheitsvorkehrungen in vergleichbarem Umfang angewendet werden. Aus diesem Grund werden heute bei Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken, auch wenn diese auf Erdgasbasis arbeiten und Wasserstoffleitungen nur in sehr begrenzter Länge zwischen dem Reformer und der Brennstoffzelle auftreten, neben allen konstruktiven Vorsorgemaßnahmen (dichte Rohrleitungen, Lüftung, usw.) auch Sensoren zur Überwachung eingesetzt, die die Anlage geordnet herunterfahren, falls Undichtigkeiten auftreten sollten.

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.7 Regelwerke

2.7.1 Vorschriften

Allgemeine Hinweise:

Regelwerke oder Vorschriften sind rechtlich verbindlich. Sie beinhalten je nach den physikalischen oder betrieblichen Eigenschaften einer Technologie, eines Produktes oder eines Prozesses Leistungsanforderungen und Grenzwerte, die eingehalten werden müssen bzw. Bestimmungen gegen den Einsatz unzulässiger Komponenten, Systeme oder Ansätze. Während rechtlich verbindliche Regelwerke von politischen Gremien (Parlament, Regierung) beschlossen werden und meist dem Schutz der Beschäftigten, der Bevölkerung allgemein, der Umwelt oder materieller Werte dienen, sind Normen freie, nicht bindende Vereinbarungen, deren Hauptzweck der ungehinderte Austausch von Waren und Dienstleistungen ist.

Wasserstoffspezifische Regelungen:

Der Transport von Wasserstoff auf Straßen wird in Europa durch das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße ADR⁵ („Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route“) geregelt, sein Transport auf Wasserwegen durch das Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen ADN („Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voie de navigation intérieure,“) und auf Eisenbahnen durch die Regelung zur internationalen Beförderung gefährlicher Güter im Schienenverkehr RID („Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises Dangereuses“). Auch die UN hat den Umgang mit Gefahrgut in ihre Empfehlungen („Recommendations on the Transport of Dangerous Goods“) aufgenommen und international geregelt.

Zum Gefahrguttransport auf der Straße (sei es Benzin, Flüssiggas, Wasserstoff oder Chemikalien) muss der Lkw-Fahrer im Rahmen eines Lehrgangs eine auf fünf Jahre befristete ADR-Bescheinigung erwerben. Alle weiteren an der Handhabung und Beförderung von Gefahrgütern beteiligten Personen müssen Sachkenntnisse über die Gefahrgutvorschriften erwerben und nachweisen. Unternehmen, die mit Gefahrguttransporten beschäftigt sind, müssen üblicherweise einen Gefahrgutbeauftragten einstellen, der dem Unternehmen unterstellt ist und bzgl. des vorschriftsgemäßen Transports von Gefahrgütern eine Beratungsfunktion ausübt.

Das ADR-Regelwerk fordert, dass Kraftfahrzeuge, die für Gefahrguttransporte verwendet werden, eine spezielle ADR-Zulassung haben (z.B. Bezettelung nach Gefahrgutklassen, Mitführung geeigneter Löschmittel).

Wasserstoffmotorfahrzeuge der Kategorien M und N (also Pkws und schwere Nutzfahrzeuge/ Busse, die mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellenantrieb ausgerüstet sind und Wasserstoff als Druck- oder als tiefkaltes Flüssiggas mitführen) können in der EU27 seit 2010 eine allgemeingültige Typgenehmigung erhalten. Die beiden Verordnungen, die diese Typgenehmigung regeln, sind EG Nr. 79/2009 i.V.m. EG Nr. 406/2010 vom 14.01.2009 respektive vom 26.4.2010.

Die PED (Pressure Equipment Directive), die EU Druckgeräterichtlinie, ist auf alle Druckgeräte anzuwenden, also auch auf alle Wasserstoffdruckgeräte oder -speicher, die einem Druck von mehr als 0,05 MPa (0,5 bar) ausgesetzt sind.

⁵ ECE/TRANS/215: United Nations Economic Commission for Europe (ECE): European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. ADR applicable as from 1 January 2011.

2. TEIL II – WASSERSTOFFSICHERHEIT – EIN VERTIEFTER ÜBERBLICK

2.7.2 Normen

Allgemeine Hinweise:

Normen sind detaillierte technische Beschreibungen von Komponenten oder Prozessen, um deren Kompatibilität mit anderen technischen Systemen oder Prozessen an den relevanten Schnittstellen sicherzustellen. Normen werden immer leistungsorientiert verfasst und nicht entwurfsspezifisch („performance, not design orientation“). Normen sollen eine freie und effiziente Herstellung, Nutzung und den Austausch von Waren und Dienstleistungen ermöglichen.

Normen sind Vereinbarungen zwischen Industriepartnern und aus sich heraus nicht rechtsverbindlich. Man kann sie durch ein einschlägiges Regelwerk für verbindlich erklären. Aber auch dann folgt die Rechtsverbindlichkeit nicht aus der Norm, sondern aus dem Regelwerk. Im Recht der Europäischen Union kommt eine solche Wechselwirkung häufig vor. Zum Stand der Technik⁶ gehören Normen sowieso, und deshalb sollten sie bereits aus Sorgfaltspflicht in Betracht gezogen werden.

Wasserstoffspezifische Regelungen:

Die Normierung technischer Systeme und Komponenten erfolgt heute im Wesentlichen auf internationaler Ebene (ISO, IEC). Eine Abstimmung zwischen den globalen Normungsgremien der ISO und IEC mit den Vorschriftenorganisationen der UN (UN ECE) erfolgt bedarfsweise, z.B. wenn es um Gefahrguttransport geht (ECOSOC, SCETDG).

Einen global harmonisierten Ansatz verfolgt die ISO (Internationale Normungsorganisation in Genf) in ihrem Technischen Komitee 197. Dort werden für den Wasserstoff wichtige Dokumente wie z.B. die ISO 17268 und die ISO 20100 entwickelt. Die ISO 17268 befasst sich mit der Vereinheitlichung der Anforderungen für die Betankungsschnittstelle von Druckwasserstoff (25, 35, 50 und 70 MPa) für den Einsatz in Straßenfahrzeugen. Die ISO 20100 schlägt harmonisierte Anforderungen für die Auslegung, den Betrieb und die Wartung von Wasserstofftankstellen vor. Ein solchermaßen harmonisierter Anforderungskatalog kann eine von fast 200 Mitgliedsländern akzeptierte Basis für die Genehmigung von Wasserstofftankstellen darstellen, sofern die Genehmigungsbehörden dieser Länder in ihren Vorschriften auf diese Norm verweisen.

Ein VdTÜV-Merkblatt 514 gibt seit dem Jahre 2009 Empfehlungen für die sichere Auslegung von Wasserstofftankstellen in Deutschland.

Für Wasserstoffspeicherung sind insbesondere die ISO-Normen relevant, die in den Technischen Komitees TC58 für Druckgase und TC197 für Wasserstofftechnologien entwickelt wurden. Sie sollen Funktionsfähigkeit, Kompatibilität und Sicherheit gewährleisten. Es gibt bereits über 20 ISO-Normen, die für den Wasserstoffeinsatz relevant sind und genutzt werden können. Dazu kommen viele, zu deren Anwendungsbereich neben anderen Gasen auch Wasserstoff gehört.

In manchen Bereichen, wie z.B. Betankungsprozeduren, haben sich trotz der Bestrebungen, Normen international harmonisiert zu formulieren, doch eher nationale oder brancheninterne Normen als faktisch international akzeptierte Normen etabliert (z.B. SAE J2600, SAE J2601), die nur schrittweise in internationale Normen wie z.B. die ISO 17268 überführt werden.

⁶ Z.B. BREF - The European IPPC Bureau publishes reference documents on the best available techniques (BAT). "Each document generally gives information on a specific industrial/agricultural sector in the EU, techniques and processes used in this sector, current emission and consumption levels, techniques to consider in the determination of BAT, the best available techniques (BAT) and emerging techniques." [EC BREF]. Legislative authorities on national and international level can refer to these and incorporate them in laws and provisions.

3. LITERATUR

- [CEP 2007] Alternative Antriebskonzepte: Neue Anforderungen für Rettungskräfte im Einsatz?, CEP, Fachtagung der Technischen Universität Berlin und der Berliner Feuerwehren, Berlin, 25.+26. Oktober 2007
- [Grams 2001] Timm Grams, Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements. Zuverlässigkeit, Sicherheit, Bedienbarkeit. Vieweg Praxiswissen, Braunschweig, Wiesbaden 2001
- [Grams 2003] Timm Grams, Gesellschaftliche Risikokontrolle, Fulda, 2003
- [Hickson et al. 2007] Allister Hickson, Al Phillips, Gene Morales (2007): Public perception related to a hydrogen hybrid internal combustion engine transit bus demonstration and hydrogen fuel. Energy Policy, 2007, 35, p. 2249-2255.
- [HSE 2001] HSE, Reducing risks, protecting people. HSE's decision-making process, 2001 (HSE WebSite www.hse.gov.uk) [HySafe 2009] ALLOWABLE HYDROGEN PERMEATION RATE FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS, D74 (InsHyde), HySafe, 15 June 2009
- [Krohn 1993] Wolfgang Krohn und Georg Krücken, Riskante Technologien: Reflexion und Regulation – Einführung in die sozialwissenschaftliche Risikoforschung, Suhrkamp, 1993
- [Juilfs 2000] Guido Gerhard Juilfs, Das Diffusionsverhalten von Wasserstoff in einem niedriglegierten Stahl unter Berücksichtigung des Verformungsgrades und der Deckschichtbildung in alkalischen Medien, Dissertation, Hamburg, 2000
- [LBST 2006] LBST – Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH: English Report Template for Word 2002; Munich/Ottobrunn, Germany, 2 July 2009
- [Luhmann 1991] Niklas Luhmann, Soziologie des Risikos, De Gruyter, Berlin, New York 1991
- [Maack et al. 2004] Maria Maack, K.D. Nielsen, H.T. Torfason, S.O. Sverrisson, K. Benediktsson (2004): Assessment of socio-economic factors with emphasis on: public acceptance of hydrogen as a fuel. ECTOS Deliverable 12, 2004.
- [Münch/Renn 2010] Tanya O'Garra (2005): Comparative Analysis of the Impact of the Hydrogen Bus Trials on Public Awareness, Attitudes and Preferences: A Comparative Study of Four Cities. AcceptH2 D6.9, 2005.
- [O'Garra 2005] Erwin Münch und Ortwin Renn, Sicherheit für Technik und Gesellschaft – Theorie und Wahrnehmung des Risikos, Erstellungsjahr 1981 [<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5495/>]
- [Renn] Ortwin Renn, Risiken und ihre Rolle in der Gesellschaft [http://ec.europa.eu/food/risk/session1_1_de.pdf]
- [Sachs 2010] Christian Sachs, Adam Opel GmbH, Safety Aspects of Hydrogen Fuel Cell Vehicles, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, Essen, Mai 2010
- [TRBS2152] Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre, Technische Regeln für Betriebssicherheit 2152 Teil3, September 2009
- [USA Today 2010] Chris Woodyard, GM's hydrogen fuel-cell fleet holds up in crashes, USA Today, 18 May 2010
- [Wasserstofftechnologie 1986] Dieter Behrens (Hrsg.): Wasserstofftechnologie – Perspektiven für Forschung und Entwicklung, DECHEMA, Frankfurt, 1986
- [Zimmer 2010] René Zimmer, Fullsteam ahead? Hydrogen technology from the perspective of the citizen, UFU/ hyTRUST, f-cell 2010, Stuttgart, 28. September 2010

Anhang I – ELEMENTE DER SICHERHEITSTECHNIK – ALLGEMEINER ÜBERBLICK

I.1 Gefährliches Wörterbuch

Risiko: ein Begriff, für den es mehrere Definitionen gibt, qualitative und quantitative. Qualitativ meint man damit eine Situation, die zu unerwünschten Folgen führen kann. Quantitativ bezeichnet man als Risiko das Produkt aus dem Schaden, den ein bestimmter Unfall anrichten würde, und seiner Wahrscheinlichkeit.

Risikoschwelle: die Grenze für das Risiko, das in Kauf zu nehmen man bereit ist. Ihre Festlegung ist in erster Linie ein sozialer Prozess, und die Ergebnisse schwanken erheblich nach den Umständen.

Unfall: unerwünschtes Ereignis (mit oder ohne Schadenfolge), das unerwartet eintritt, ungewöhnlich ist und nicht bewusst herbeigeführt wird, aber deutliche Folgen hat.

Gewissheit: entweder (a) vollkommene Kenntnis ohne Gefahr des Irrtums oder (b) die Abwesenheit von Zweifel. Im technischen Zusammenhang ist gewöhnlich der erste Fall gemeint, der sich nie praktisch realisieren lässt.

Gefahr: eine Situation, in der Leben, Gesundheit, Werte oder die Umwelt bedroht sind, weil das mit der Situation verbundene Risiko die akzeptable Schwelle überschreitet.

Deflagration: einer der beiden wichtigsten Untertypen einer Explosion. Typisches Merkmal der Deflagration im Gegensatz zur Detonation ist, dass die Geschwindigkeit von Flammenfront und Stoßwelle niedriger ist als die Schallgeschwindigkeit. Man unterscheidet weiter zwischen langsamer (laminare Strömung) und schneller (turbulente Strömung) Deflagration; im ersten Fall liegt die Geschwindigkeit der Front deutlich unter der Schallgeschwindigkeit, im anderen kommt sie ihr nahe.

Detonation: einer der beiden wichtigsten Untertypen einer Explosion. Typisches Merkmal der Detonation im Unterschied zur Deflagration ist, dass Flammenfront und Stoßwelle schneller fortschreiten als der Schall. Detonationen erzeugen weit höhere Drücke als Deflagrationen und auch deutlich höhere Druckanstiegsraten, was ihre größere Gefährlichkeit ausmacht.

Explosion: Hier werden nur Gasexplosionen diskutiert. Darunter versteht man eine Verbrennungsreaktion zwischen einem Brenngas und einem oxidierenden Gas (häufig Luft), die sich nach der Zündung von allein auf das gesamte unverbrannte Gasinventar ausbreitet und eine Druckwelle erzeugt. Notwendige Bedingungen sind also die Gegenwart von Brenngas und oxidierendem Gas, ihre Durchmischung, die richtige Konzentration der Mischung (zwischen der oberen und der unteren Explosionsgrenze) und genügend Energie, die von einer Zündquelle geliefert wird.

Explosionsschutz, primärer: Verhinderung der Bildung explosionsfähiger Gasgemische, entweder durch so dichte Ausführung der Apparatur, dass kein Gas entweichen kann oder durch angemessene Nachweis-, Warn- und Lüftungsvorkehrungen, so dass die Konzentration der Mischung außerhalb des Explosionsbereichs gehalten werden kann (gewöhnlich beides).



Anhang I – ELEMENTE DER SICHERHEITSTECHNIK – ALLGEMEINER ÜBERBLICK

Explosionsschutz, sekundärer: Fernhalten von Zündquellen aus Bereichen, in denen eine explosionsfähige Gasmischung auftreten könnte.

Explosionsschutz, tertiärer/konstruktiver: Planung und Bau von Reaktionsgefäßen und Gebäuden derart, dass die Auswirkungen einer Explosion minimiert werden, entweder durch druckfeste Ausführung oder durch die Möglichkeit der Druckentlastung. Die Explosion wird also nicht vermieden, sondern ihre Auswirkungen werden verringert.

Explosionsfähige Atmosphäre: allgemein eine Mischung von mindestens einem brennbaren und einem oxidierenden Gas in einer Konzentration, die eine Zündung erlaubt. Ternäre Mischungen können auch Inertgase enthalten. Der Begriff kann in verschiedenen Zusammenhängen unterschiedliche Bedeutungen haben.

Zündquelle: Eine Explosion erfordert die Gegenwart einer Zündquelle. Deren gibt es viele. Die Zündwirkung elektrischer Funken ist allgemein bekannt (Zündkerze), doch können auch heiße Oberflächen oder mechanisch erzeugte Funken zünden.

I.2 Allgemeines zur Sicherheit

I.2.1 Absolute Sicherheit unmöglich

Absolute Sicherheit ist beim Einsatz und der Nutzung technischer Systeme im täglichen Leben nicht erreichbar. Kein technisches System, das derzeit im Einsatz ist, wurde auf alle denkbaren Unfallszenarien ausgelegt. Es muss in jedem Fall abgewogen werden, welches verbleibende Risiko (Unfallfolgen über die Eintrittshäufigkeit) gespiegelt an der Vorbildung der Nutzer dieses Systems in einer Gesellschaft noch als akzeptabel angesehen wird. Die Globalisierung und die weltweite Verbreitung sind wichtige Variablen in der Risikoanalyse. Es findet ein Transfer von potenziell gefährlichen Technologien und Produkten in Länder statt, die weder über die notwendigen Institutionen noch über die notwendige Sicherheitskultur verfügen, um mit diesen Risiken angemessen umzugehen. Diesem Umstand gilt es besonders beim Umgang mit technisch komplexen bzw. anfälligen Systemen in Entwicklungsländern Rechnung zu tragen.

Einschub

„In this world nothing can be said to be certain, except death and taxes.“

Benjamin Franklin

Anhang I – ELEMENTE DER SICHERHEITSTECHNIK – ALLGEMEINER ÜBERBLICK

I.2.2 Höhe des akzeptablen Risikos eine soziale Frage

Nach Ortwin Renn [Renn] wird Risiko folgendermaßen eingeschätzt und bewertet:

„Risikobewertung“ ist ein wissenschaftlicher Prozess zur Ermittlung unerwünschter Konsequenzen und ihrer Ursachen sowie zur Messung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß.

Bei der „Risikoevaluierung“ handelt es sich um ein Verfahren zur Ermittlung der Akzeptabilität eines bestimmten Risikos. Das Ziel besteht nicht darin, das Risiko auf Null zu reduzieren, sondern es auf ein der Gesellschaft zumutbares Niveau zu senken – wo immer dieses Niveau auch angesiedelt sein mag.

„Risikomanagement“ ist der Prozess, das Risiko auf ein von der Gesellschaft tolerierbares Maß zu senken und für Kontrolle, Überwachung und Kommunikation mit der Öffentlichkeit zu sorgen. In dieser Definition ist die Risikokommunikation mithin ein zentraler Bestandteil des Risikomanagements.

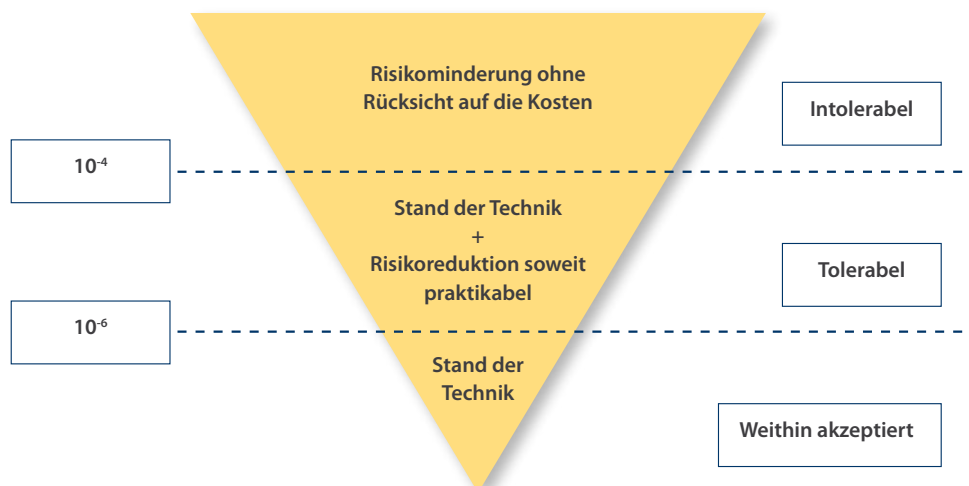
Untersuchungen [Grams 2001] haben ferner gezeigt, dass die Risikoakzeptanz mit den Faktoren

- Bekanntheit einer Gefahr (je bekannter, desto geringer eingeschätzt)
- Freiwilligkeit beim Eingehen eines Risikos (freiwillig und damit subjektiv abschätzbarer), und
- Beeinflussbarkeit des Risikos (beeinflussbar und damit eingrenzbar) wächst.

Nach Luhmann erscheint das Risiko aus Sicht des Entscheiders oder des Betroffenen deutlich unterschiedlich [Luhmann 1999]. Ein Entscheider „übernimmt ein Risiko“, wohingegen einem Betroffenen „Gefahr“ droht. Diese erscheint dem Betroffenen wesentlich realer und bedrohlicher als dem Entscheider, der glaubt, das für ihn abstraktere „Risiko“ berechenbar eingehen zu können.

Die britische Behörde für Arbeitssicherheit [HSE 2001] hat Leitlinien definiert, die einen flexiblen Rahmen von tolerierbaren Risiken abstecken. Risikogrenzwerte dienen als erste Orientierung. Die im Rahmen der Gesetzgebung zu treffenden Entscheidungen hängen darüber hinaus vom politischen Prozess, von den konkreten Verhandlungen mit den Betroffenen und von der Praktikabilität der möglichen Lösungen ab. Im Laufe dieses Prozesses/ Verfahrens werden Präferenzen und Wertvorstellungen auf sehr unterschiedliche Art und Weise kommuniziert, und dies nicht nur in der Terminologie des objektiven Risikos oder der Risikobegrenzung.

Im nachfolgenden Dreieck nehmen die Risiken von unten nach oben zu [Grams 2003]. Ganz unten reicht es aus, sich als Hersteller von potenziell risikobehafteten Technologien an den Stand der Technik (state of the art) zu halten. Techniken mit Risiken im oberen Bereich sind ausgeschlossen. An einer Risikoreduktion führt kein Weg vorbei. Im mittleren Bereich müssen die Hersteller die möglichst weitgehende Risikoreduktion in dem Sinne nachweisen, dass eine weitere Risikoreduktion nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich wäre (utility based gross disproportion criterion). Dieses Prinzip trägt den Namen ALARP (As Low As Reasonably Practicable).



Anhang I – ELEMENTE DER SICHERHEITSTECHNIK – ALLGEMEINER ÜBERBLICK

Auch die Europäische Union folgt seit Mitte der 1980er Jahre bei der technischen Harmonisierung zunehmend dem Denkstil der Risikooptimierung. Das Prinzip einer Vorgehensweise nach dem *einheitlichen Konzept* („new approach“) beschränkt sich auf die Festlegung und Durchsetzung der allgemeinen wesentlichen Anforderungen und schafft so den Rahmen für die Risikooptimierung durch die technischen Institutionen. Im früher verfolgten Ansatz wurde demgegenüber versucht, detaillierte technische Rechtsvorschriften für einzelne Produktkategorien zu beschließen. Der neue Ansatz geht einher mit der Reduktion des direkten Einflusses der Kontrollhierarchien und mit einer Stärkung des Marktindividualismus [Grams 2003].

Einen wesentlichen Einfluss auf die Einschätzung des Risikos hat die *intuitive Risikowahrnehmung*. Ein interessanter Aspekt dieser Wahrnehmung scheint zu sein, dass die Menschen oft die Experteneinschätzungen kennen und diese gar nicht anzweifeln, dass sie diese Informationen aber nicht als ausschlaggebend für ihre eigene Risikobeurteilung bewerten [Münch/Renn 2010]. In der Wahrnehmung von Risiken trennen die Menschen das Risikoausmaß nicht von dem Objekt, von dem das Risiko ausgeht (z.B. ‚Das Auto ist ungefährlich‘ aber ‚das Fahren kann gefährlich sein‘). Im Gegenteil, das Risiko wird erst dann in seiner Abschätzung plastisch durchdacht, wenn das Individuum einen Zusammenhang mit seinen Vorstellungen und Meinungen über das Objekt, von dem das Risiko ausgeht, herstellen kann [Münch/Renn 2010].

Die Determinanten der intuitiven Risikowahrnehmung werden auf folgenden drei Ebenen reflektiert:

- die wahrgenommenen Verlusterwartungen,
- die qualitativen Risiko- und Nutzenmerkmale,
- die Vorstellungen und Meinungen in Bezug auf die Risikoquelle.

Auch bestimmte Persönlichkeitsmerkmale, wie Risikobereitschaft und generelle Einstellung zum technischen Fortschritt haben einen Einfluss auf die Risikowahrnehmung.

Sowohl die Analyse der Begleitumstände, unter denen etwas als riskant eingeschätzt wird, als auch die Abschätzung möglicher Folgen eines/einer als riskant eingeschätzten Vorganges, Prozesses oder Technologie für Mensch und Gesellschaft müssen erfolgen, um die Befürchtungen und Vorstellungen der Menschen über die Auswirkung der betrachteten Quelle oder Technik mit der realen Situation vergleichen zu können. Nur so können eventuelle Fehlentscheidungen vermieden oder korrigiert bzw. vorausschauend abgewendet werden. Nur so kann man zu nachvollziehbaren Entscheidungen kommen, die alle Ebenen der intuitiven Risikowahrnehmung berücksichtigen und wiedergeben und damit eine Chance auf breite Akzeptanz haben [Münch/Renn 2010].

I.2.3 Das größte Risiko ist der Mensch

Unsere komplexen technischen Systeme erfordern eine immer bessere Qualifizierung der Menschen, die mit diesen Systemen umgehen bzw. diese benutzen oder betreiben. Aus diesem Grund werden viele Systeme heute für einen automatisierten oder weitestgehend automatisierten Betrieb ausgelegt. Meist werden in diesen automatisierten Ablauf (Autopilot im Flugzeug, automatisierte Betriebsführung eines KKW, teilautomatisierter Betrieb von Fahrzeugen und Zügen) ausreichend Sicherheiten und Puffer eingebaut. Eine Großzahl der schweren Unfälle der letzten Dekaden sind durch sogenanntes menschliches Versagen (pilot's error) zustande gekommen (viele Flugzeugabstürze, Eisenbahnzusammenstöße und auch Tschernobyl). Ähnliches gilt für die Verletzung von Betriebs-, Wartungs- und Sicherheitsvorschriften (z.B. Deep Water Horizon). In allen diesen Fällen war das ‚menschliche‘ Element ein entscheidender Auslöser für eine nachfolgende Katastrophe. Weder kann man alle technischen Abläufe im Leben voll automatisieren noch kann man den Menschen aus allen technischen Bereichen des Lebens heraushalten. Dieser Zielkonflikt kann nicht prinzipiell gelöst werden, solange man mit komplexen Systemen umgeht, deren innere Interdependenzen kein einzelner Mensch mehr durch- oder voll überblickt. Man kann nur versuchen, die Systeme so einfach und/oder fehlertolerant wie möglich auszulegen und die Menschen so gut wie möglich zu schulen.

Anhang I – ELEMENTE DER SICHERHEITSTECHNIK – ALLGEMEINER ÜBERBLICK

I.3 Allgemeine Sicherheit von Anlagen

I.3.1 Dichtheit

Unter Dichtheit versteht man den völligen Abschluss eines druckführenden Raumes gegenüber seiner Umgebung. Gasleitungen, Verbindungselemente und andere gasführende Komponenten und Anlagen müssen bis zu einer definierten Nachweisgrenze dicht sein. Prinzipiell gibt es absolute Dichtheit genau so wenig wie absolute Sicherheit, aber es darf kein Gas austreten, und es darf sich kein explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch bilden können. Diese Dichtheit muss für alle Betriebszustände gewährleistet werden, für die eine Komponente oder Anlage ausgelegt wurde.

I.3.2 Erkennung von Austritten

Im Rahmen einer Dichtheitsprüfung werden gasführende Einrichtungen, wie z.B. Gasleitungen, Verbindungselemente, Komponenten oder Anlagen überprüft. Als Prüfmedium werden Wasser, Luft oder Inert- bzw. Betriebsgase verwendet. Dabei kann der nicht eintretende Druckabfall (Absinken des Innendruckes in einem Bauteil) nach einer gewissen Zeit oder das äußere Abspüren entweder mit einem aufgetragenen schaumbildenden Testmittel (Bildung von Blasen durch austretendes Gas im Testmittel) oder besser mit einem Lecksuchgerät, z.B. einem wasserstoff-sensitiven Halbleitersensor, die Dichtheit bestätigen. Die Nachweisgrenze bei der elektronischen Lecksuche liegt bei etwa $5 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. Es gibt auch Lecksuchgeräte, die über eine ATEX-Zulassung verfügen und damit in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden können. Im Übrigen können die geeigneten Prüfverfahren der DIN EN 1779 entnommen werden. Die angegebenen Prüfverfahren werden auch bzgl. ihrer Eignung nach quantitativer Messung der integralen Leckagegeräte und nach örtlicher Auffindung (Lokalisation) von Leckstellen unterschieden.

I.3.3 Vermeidung von Zündquellen

In potenziell explosionsgefährdeten Räumen ist Rauchen prinzipiell verboten. Heiße Oberflächen, Flammen und heiße Gase können potenzielle Zündquellen darstellen und müssen in der unmittelbaren Umgebung weitestgehend vermieden werden. Dasselbe gilt für elektrische Ströme, elektrische Potenzialunterschiede, elektrostatische Aufladungen, elektromagnetische Felder, ionisierende Strahlung usw.

Es müssen auf jeden Fall mechanische (Reib-, Schlag- und Abtragsvorgänge) oder elektrisch (elektrische Geräte, Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen) erzeugte Funken vermieden werden. Je nach Gefährdungsbeurteilung und EX-Schutz-Dokument nach BetrSichVO bedeutet dies bei hoher Explosionsgefährdung, dass z.B. Werkzeuge aus Speziallegierungen verwendet werden müssen, die keine Funken schlagen bzw. elektrische Geräte explosionsgeschützt ausgeführt sein müssen. Welches Sicherheitsniveau eingehalten werden muss, hängt vom Ausmaß der Gefahr ab (siehe Kapitel 5 der TRBS2152).

Anhang I – ELEMENTE DER SICHERHEITSTECHNIK – ALLGEMEINER ÜBERBLICK

I.3.4 Be-/Entlüftung und Warnung

Zur Verhinderung größerer Wasserstoffansammlungen in Innenräumen sollte das Überschreiten einer bestimmten Gaskonzentration dadurch verhindert werden, dass die Wasserstoffzufuhr durch redundante Schnellschlussarmaturen sicher unterbrochen wird.

Ausreichende Belüftung ist bei Wasserstoffanlagen in geschlossenen Räumen eine wichtige primäre Sicherheitsmaßnahme. Das erforderliche Belüftungsvolumen ergibt sich aus Untersuchungen möglicher Störfälle wie z.B. Leckagen, Leitungsbrüche oder diffuse Undichtigkeiten. Zumindest für diffuse Leckagen bzw. für etwa beim Anlagenstillstand eingeschlossene Gasmengen sollte eine für die zu erwartenden Freisetzungsvolumina ausreichende Lüftung vorgesehen werden.

Es kann auch erforderlich sein, zwischen explosionsgefährdeten und anderen Räumen für gasdichte Leitungsdurchführungen und Türen oder für Zwangsbelüftung zu sorgen.

Lüftungseinrichtungen sollen bei Gasleckagen die Bildung explosionsfähiger oder toxischer Atmosphären sowie deren Verschleppung vermeiden. Die Zuluft sollte in Bodennähe eingeführt werden und die Abluft an der höchsten Stelle des Raumes angesaugt werden.

Zusätzlich kann der Einbau einer stationären Gaswarnanlage erforderlich oder sinnvoll sein, die Gaskonzentrationen misst, bei Überschreiten der Grenzwerte optisch und akustisch warnt bzw. automatisiert sicherheitstechnische Gegenmaßnahmen ergreift, die die Bildung eines zündfähigen Gemisches sicher verhindern.

I.3.5 Schadensvermeidung und -bekämpfung

Zwischen Medien verschiedener Brennbarkeit können konstruktive Maßnahmen einer präventiven Feuervermeidung bzw. Feuerfolgenminderung ergriffen werden (z.B. feuerfeste oder -hemmende Wände und Türen). Weitere präventive Maßnahmen sind definierte konstruktiv ausgebildete Entlastungsflächen, die im Falle einer Explosion für Druckentlastung sorgen und damit für Schadensbegrenzung an tragenden Teilen Sorge tragen, sowie ausgeschilderte Evakuierungswege.

Anhang II – BEWERTUNG UND EINORDNUNG

Wahrnehmung von Risiken (Aus [Krohn 1993])

Der Ingenieur Chauncey Starr hat als erster eine wissenschaftliche Arbeit zu dem Problem der gesellschaftlichen Akzeptanz neuer technischer Risiken veröffentlicht, die von in einer Gesellschaft historisch nachweisbaren und traditionell akzeptierten Risiken ausging und nicht nur Eintrittswahrscheinlichkeiten und Folgen von Schäden betrachtete. Er erkannte, dass die Erlangung von Akzeptanz für argwöhnisch betrachtete (Groß-)Technologien eine Theorie der gesellschaftlichen Risikoakzeptanz voraussetzte. Er versuchte diese auf den Gewohnheiten aufzubauen, nach denen in einer Gesellschaft für verschiedene Lebensbereiche Kosten und Nutzen ausgeglichen werden. Eine Schlüsselerkenntnis war, dass die Frage „Wie sicher ist sicher genug?“ nicht technologisch beantwortet werden kann, sondern nur psychologisch oder soziologisch.

Starr hatte damit eine Diskussion unter Psychologen angestoßen, die zum psychometrischen Paradigma der Risikoforschung führte. Die psychometrische Risikoforschung nutzte als eine wesentliche neue Komponente zur Erschließung der Akzeptanz die Erhebung der Einstellung zu einem Risiko, also die explizite Erfassung von Präferenzen. Auch wurden verstärkt qualitative anstatt nur quantitativer Merkmale erfasst. Weitere Differenzierungen führten zu der Erkenntnis, dass es nationale, regionale und sogar lokale Unterschiede in Wahrnehmungsmustern gibt. Auch spielte die soziale Situation des Befragten eine Rolle. Ferner wurde entdeckt, dass die Werthaltung Veränderungen unterworfen sein kann. Eine Mischung aus stabilen und instabilen Mustern machte somit längerfristige Akzeptanzprognosen praktisch unmöglich. Eine theoretische Ausgestaltung der sozialen Risikokonstruktion ist auch deswegen schwierig, weil die Wahrnehmung von Ereignissen die Einstellung beeinflusst und Einstellungen wiederum das Handeln beeinflussen. Die hierbei waltenden Wirkungsmechanismen sind jedoch nur unzulänglich bekannt.

Der wichtige Beitrag der psychometrischen Risikoforschung für die öffentliche Diskussion liegt darin, dass die Einstellungen der Betroffenen, die sich nur teilweise am Maßstab der statistischen Risikobestimmung orientieren, von der Politik wahrgenommen und berücksichtigt werden müssen.

Öffentliche Wahrnehmung von Wasserstoff (Aus [Zimmer 2010])

- Relativ hohes Niveau an Akzeptanz hinsichtlich Wasserstofftechnologien und Brennstoffzellen.
- Die Wahrnehmung von Wasserstoff als Kraftstoff ist weitgehend positiv mit 92 %, die diese Nutzung für eine gute oder sehr gute Idee halten [Hickson et al. 2007].
- Die Mehrheit der Befragten (92 %) drückte positive oder sehr positive Reaktionen bzgl. des Wasserstoffbusses aus und 86 % akzeptieren oder akzeptieren weitgehend Wasserstoff als Kraftstoff [Maak et al. 2004].
- Die Haltung gegenüber der Wasserstoffbusdemonstration war weitgehend positiv [O'Garra 2005].



ludwig bölkow
systemtechnik

LUDWIG-BÖLKOW-SYSTEMTECHNIK GMBH

Die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) ist ein Beratungsunternehmen für Energie und Umwelt. Sie unterstützt ihre internationalen Kunden aus Industrie, Finanzsektor, Politik und Verbänden bei Fragen zu Technologie, Strategie und Nachhaltigkeit.

Zwei Jahrzehnte kontinuierlicher Erfahrung des interdisziplinären Teams renommierter Experten bilden die Basis der umfassenden Kompetenz der LBST.

Die LBST bietet ihren Kunden:

System- und Technologiestudien

- Energie- und Infrastrukturkonzepte
- Machbarkeitsstudien
- Technologiebewertung und Due Diligence

Nachhaltigkeitsberatung

- Lebenszyklus-Analysen; Carbon Footprint Analysen
- Bewertung natürlicher Ressourcen (Energie, Mineralien, Wasser)
- Nachhaltigkeitsbewertung (Sustainability Due Diligence)

Strategieberatung

- Produktportfolioanalysen, Identifizierung neuer Produkte und Dienstleistungen
- Marktanalysen

Koordination

- Projektmanagement, -begleitung und -bewertung

Entscheidungsvorbereitung

- Studien, Briefings, Expertenkreise, Trainings

Besondere Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen Energie (erneuerbare Energie, Energiespeicherung, Wasserstoff und Brennstoffzellen) und Verkehr (Kraftstoffe und Antriebe, Infrastruktur, Mobilitätskonzepte), sowie bei umfassenden Nachhaltigkeitsanalysen.

Ein konsequenter Systemansatz ist Kennzeichen aller Arbeiten. Nur dadurch, dass wirklich alle relevanten Elemente einer vernetzten Welt berücksichtigt werden, können wir unseren Kunden eine vollständige Grundlage für ihre Entscheidungen geben.

Auf der Grundlage ihres tiefen Verständnisses gesellschaftlicher und technologischer Entwicklungen sowie ihrer Unabhängigkeit hilft die LBST ihren Kunden mit objektiver und fundierter Information bei der Sicherung ihrer Zukunft.

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)

Daimlerstr. 15 • 85521 Ottobrunn (Munich) • Germany

T +49 (0)89 6081100

E info@lbst.de

W www.lbst.de

DWV WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLEN- VERBAND

Der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV) unterstützt die allgemeine Markteinführung von Wasserstoff als Energieträger und von Brennstoffzellen als effiziente Wandlungstechnologie und bereitet diese vor.

Der DWV bringt die Interessensgruppen (Firmen, Institute, Privatpersonen) zusammen, informiert sie regelmäßig, unterrichtet die Öffentlichkeit sowie die Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik und berät den Regelwerks- und Normungsprozess. Kurz gesagt: Der DWV ist die deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Lobby.

Der DWV kooperiert eng mit dem Europäischen Wasserstoff-Verband und anderen nationalen und internationalen Partnerorganisationen weltweit.

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.

Tietzenweg 85/87, 12203 Berlin

T +49 (030) 398 209 946-0

F +49 (030) 398 209 946-9

E h2@h2de.de

W www.h2de.de



Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.
Tietzenweg 85/87, 12203 Berlin

T +49 (030) 398 209 946-0

F +49 (030) 398 209 946-9

E h2@h2de.de

W www.h2de.de