

Stand der Kenntnisse und Technik bezüglich Wasserstoffsicherheit

Thomas Jordan*, Enis Askar, Kai Holtappels, Sabine Deeg, Manuela Jopen, Uwe Stoll, Ernst-Arendt Reinecke, Ulrich Krause, Michael Beyer und Detlev Markus

DOI: 10.1002/cite.202300141

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Die Einführung von Wasserstoff als sicherer Energieträger braucht eine robuste Wissensbasis, darauf aufgebaute Werkzeuge zur Auslegung und Sicherheitsbewertung von Wasserstofftechnologien und ein international harmonisiertes Regelwerk. Viele der innovativen Technologien implizieren Wasserstoff bei hohen Drücken und/oder kryogenen Temperaturen, mit denen in verteilten Anwendungen erstmalig private Nutzer in Kontakt kommen. Um überkonservative, teure Sicherheitslösungen zu vermeiden, gleichzeitig aber die Einsetzbarkeit und Sicherheit von Wasserstoffanwendungen zu demonstrieren und die Akzeptanz für die Technologie aufrecht zu halten, muss auch die Sicherheitsforschung mit den Trends der technologischen Entwicklung Schritt halten, oder sie besser noch antizipieren. So beschreibt dieser Überblicksartikel nicht nur den gegenwärtigen Stand der Kenntnisse und Technik bezüglich Wasserstoffsicherheit, sondern auch ihre Weiterentwicklung.

Schlagwörter: Energieträger, Gefährdungs- und Risikobeurteilung, Gesetze und Normen, Sicherheit, unfallspezifische Eigenschaften, Wasserstoff

Eingegangen: 01. September 2023; akzeptiert: 30. November 2023

State of Knowledge and Technology Regarding Hydrogen Safety

The introduction of hydrogen as a safe energy carrier needs a robust knowledge base, tools for the design and safety assessment of hydrogen technologies built on it, and an internationally harmonised set of rules. Many of the innovative technologies imply hydrogen at high pressures and/or cryogenic temperatures, with which private users come into contact for the first time in distributed applications. In order to avoid over-conservative, expensive safety solutions, while demonstrating the feasibility and safety of hydrogen applications and maintaining acceptance for the technology, also safety research must keep pace with, or better anticipate, trends in technological development. Thus, this overview article describes not only the current state of knowledge and technology regarding hydrogen safety, but also its further development.

Keywords: Accident-specific properties, Codes and standards, Energy carrier, Hazard and risk assessment, Hydrogen, Regulation, Safety

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurden weltweit zahlreiche nationale und regionale Wasserstoffstrategien veröffentlicht [1–3]. In diesen Wasserstoffstrategien wird die Wasserstoffwirtschaft klar als ein Kernelement der Energiewende identifiziert.

¹Dr.-Ing. Thomas Jordan  <https://orcid.org/0000-0002-1903-7490> (thomas.jordan@kit.edu), ²Dr. Enis Askar

 <https://orcid.org/0009-0009-5606-8542>, ³Dr. Kai Holtappels,

⁴Dr. Sabine Deeg, ⁵Dr. Manuela Jopen, ⁶Uwe Stoll, ⁷Dr. Ernst-Arendt Reinecke  <https://orcid.org/0000-0003-1414-9183>,

⁸Dr. Ulrich Krause, ⁹Dr. Michael Beyer

 <https://orcid.org/0000-0001-9189-3948>, ¹⁰Dr. Detlev Markus

 <https://orcid.org/0000-0003-2281-0760>

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit, Kaiserstraße 12, 76021 Karlsruhe, Deutschland.

²Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12200 Berlin, Deutschland.

³Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI), Kurfürsten-Anlage 62, 69115 Heidelberg, Deutschland.

⁴Gesellschaft für Reaktor- und Anlagensicherheit (GRS) gGmbH, Schwertnergasse 1, 50667 Köln, Deutschland.

⁵Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Deutschland.

⁶Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Deutschland.

⁷Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland.

Durch den vermehrten Einsatz von grünem Wasserstoff soll der Anteil an fossilen Energieträgern reduziert und eine nachhaltige Energie-Kreislaufwirtschaft aufgebaut werden. Die Möglichkeiten der Systemintegration von erneuerbaren Energiequellen sowie die Möglichkeiten der Energiespeicherung und des Energietransports können durch den Ausbau der Wasserstoffwirtschaft zum einen deutlich verbessert werden. Zum anderen kann Wasserstoff in verschiedenen Sektoren, zur Wärme- und Stromerzeugung, für die Mobilität und in der Industrie flexibel eingesetzt werden. Schließlich werden bei der Nutzung von Wasserstoff i.d.R. keine Treibhausgase freigesetzt.

Die Sicherheit der eingesetzten Wasserstofftechnologien ist eine Grundvoraussetzung für den Markthochlauf. Studien legen nahe, dass die Akzeptanz von Wasserstofftechnologien grundsätzlich hoch ist [4, 5]. Für viele Menschen ist das Thema jedoch noch so abstrakt, dass sie sich mit dem Einsatz von Wasserstoff in ihrem direkten Umfeld noch nicht detailliert befasst haben. Einzelne Unfälle bzw. Vorfälle können daher eine hohe Auswirkung auf die Akzeptanz haben. Außerdem kann die Sicherheit vom Wegbereiter für den Markthochlauf zum Hindernis werden, wenn sicherheitstechnische Maßnahmen nicht von Anfang an für die jeweiligen Technologien mitgedacht werden und offene Fragestellungen und Forschungslücken erst zu spät adressiert werden.

Vor allem von der kerntechnischen Entwicklergemeinschaft, der NASA [6] sowie vom Netzwerk IA HySafe [7] und deren Mitgliedern gibt es seit vielen Jahren immer wieder Publikationen zu Arbeiten im Bereich der Wasserstoffsicherheit. Grundsätzlich gibt es vor allem in der chemischen und petrochemischen Industrie zwar auch langjährige Erfahrungen zum sicheren Einsatz von Wasserstoff. Allerdings müssen im Zusammenhang mit der Sicherheit die neuen Rahmenbedingungen für großskalige Produktion und neue Transporttechnologien sowie für die Nutzung in verteilten Anwendungen direkt beim Endkunden beachtet werden. Diese Bedingungen können sicherheitstechnisch Herausforderungen darstellen. Um z. B. die Mengen an grünem Wasserstoff zur Verfügung stellen zu können, die in den nationalen Wasserstoffstrategien angestrebt werden, müssen Elektrolyseanlagen hochskaliert werden von Leistungen im einstelligen Megawattbereich bis zu Leistungen im Gigawattbereich. Gefährdungsanalysen und Sicherheitskonzepte müssen dazu entsprechend angepasst werden. Zweitens werden Wasserstoffanlagen zunehmend in nicht-industriellen Bereichen eingesetzt, in denen Sicherheitskonzepte, die für den abgeschlossenen industriellen Bereich entwickelt worden sind, nicht ohne

Weiteres übernommen werden können. Drittens müssen auch vermehrt Prozessbedingungen berücksichtigt werden, bei denen es vor allem in Kombination mit der Hochskalierung weit weniger Erfahrungen gibt. Zum einen wären hier z. B. die zunehmend dynamischen Betriebsbedingungen bei Elektrolyseuren zu nennen, die für die Systemintegration von erneuerbaren Energiequellen zum Tragen kommen. Zum anderen spielen für den effizienten Transport von Wasserstoff hohe Drücke bis zu 100 MPa sowie niedrige Temperaturen bis $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Falle des Transports als Flüssigwasserstoff eine immer größere Rolle. Letztlich müssen Wasserstofftechnologien natürlich auch wirtschaftlich sein, damit sie sich am Markt durchsetzen können. Daher müssen die sicherheitstechnischen Lösungen zwar auf der einen Seite ein gesellschaftlich akzeptiertes Risiko gewährleisten, auf der anderen Seite dürfen Sie nicht überkonservativ und unnötig teuer sein.

Im Vergleich mit anderen gasförmigen Energieträgern, die im großen Maßstab eingesetzt werden, wie Methan oder Propan, weist Wasserstoff einige wesentliche Unterschiede bzgl. der sicherheitstechnischen Eigenschaften auf. In Tab. 1 sind sicherheitstechnische Kenngrößen von Wasserstoff im Vergleich zu Methan und Propan zusammengefasst.

Die untere Explosionsgrenze von Wasserstoff ist mit 4,0 Mol-% ähnlich wie bei Methan relativ hoch, d. h. es müssen bei einer Freisetzung von Wasserstoff im Vergleich zu Propan oder anderen Kohlenwasserstoffen größere Stoffmengen freigesetzt werden, damit sich explosionsfähige Gemische in Luft bilden können. Aufgrund der im Vergleich mit Kohlenwasserstoffen hohen oberen Explosionsgrenze sind Wasserstoff-Luft-Gemische aber in einem sehr großen Konzentrationsbereich explosionsfähig. Gleichzeitig ist die Sauerstoffgrenzkonzentration sehr niedrig, d. h. für eine Inertisierung von wasserstoffhaltigen Gemischen müssen große Mengen an Inertgas zugeführt werden. Anders als bei vielen anderen Brenngasen werden im Falle von Wasserstoff wesentliche Druckeffekte bei der Verbrennung erst dann erreicht, wenn die untere „Explosionsgrenze“ deutlich überschritten wird.

Tabelle 1. Sicherheitstechnische Kenngrößen von Wasserstoff im Vergleich zu Methan und Propan [8].

| Sicherheitstechnische Kenngröße | Wasserstoff | Methan | Propan |
|--|-------------|--------|--------|
| Untere Explosionsgrenze (UEG) [Mol-%] | 4,0 | 4,4 | 1,7 |
| Obere Explosionsgrenze (OEG) [Mol-%] | 77,0 | 17,0 | 10,8 |
| Sauerstoffgrenzkonzentration (LOC) [Mol-%] | 4,3 | 9,9 | 9,3 |
| Mindestzündtemperatur (AIT) [$^{\circ}\text{C}$] | 560 | 595 | 470 |
| Mindestzündenergie (MIE) [mJ] | 0,017 | 0,29 | 0,24 |
| Grenzspaltweite (MESG) [mm] | 0,29 | 1,14 | 0,92 |
| Maximaler Explosionsdruck p_{max} [bar] | 8,3 | 8,1 | 9,4 |
| KG-Wert [bar m s^{-1}] | 990 | 69 | – |
| Flammgeschwindigkeit [m s^{-1}] [9] | 3,1 | 0,4 | 0,5 |

Für eine Entzündung von explosionsfähigen, wasserstoffhaltigen Gemischen durch heiße Oberflächen bei atmosphärischem Druck sind im Vergleich zu vielen anderen gasförmigen Energieträgern relativ hohe Temperaturen erforderlich. Dementsprechend wird Wasserstoff für den praktischen Explosionsschutz entsprechend der ATEX Regulatorik (siehe Abschn. 5.1) der niedrigsten Temperaturklasse T1 zugeordnet. Wasserstoff wird aber der „kritischsten“ Explosionsgruppe IIC zugeordnet, weil es andererseits eine sehr niedrige Mindestzündenergie bzw. ein sehr niedriges Zündstromverhältnis (MIC) hat. Daher müssen bei einer Sicherheitsbewertung in vielen Fällen auch Zündquellen berücksichtigt werden, die bei anderen gasförmigen Energieträgern wie Methan meist keine Rolle spielen, wie z. B. mechanische Schlagvorgänge [10], Stoßwellen im Zusammenhang mit schlagartiger Freisetzung bei hohem Druck (Shock Diffusion Ignition) [11] oder exotherme Reaktionen an katalytisch wirkenden Oberflächen wie Platin oder Palladium [12].

Die maximalen Explosionsdrücke, die bei Entzündung von wasserstoffhaltigen Gemischen auftreten können, unterscheiden sich i.d.R. nicht wesentlich von denen für andere gasförmige Energieträger. Allerdings sind die Flammgeschwindigkeit und auch der maximale zeitliche Druckanstieg in geschlossenen Systemen sehr hoch. Daher kann sich bei einer Explosion in ungünstigen Fällen die Flamme so stark beschleunigen, dass die Flammgeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit überschreitet und somit ein Umschlag von einem deflagrativen zu einem detonativen Verlauf auftritt [13, 14]. In diesem Fall kann der maximale Explosionsdruck, der bei einer Deflagration auftritt, um ein Vielfaches überschritten werden.

Neben den sicherheitstechnischen Kenngrößen müssen auch die physikalischen Eigenschaften für die Auslegung von sicherheitstechnischen Maßnahmen berücksichtigt werden. Diese unterscheiden sich in einigen Aspekten stark von vielen anderen gasförmigen Energieträgern, wie in der folgenden Tab. 2 zu erkennen ist.

Vor allem durch die sehr geringe Molmasse des Wasserstoffs ergeben sich wesentliche Unterschiede zu anderen gasförmigen Energieträgern. Zum einen sind Wasserstoffanlagen dadurch empfindlicher gegenüber Leckagen, andererseits ist Wasserstoff durch die resultierende sehr geringe Gasdichte und den gleichzeitig hohen Diffusionskoeffizienten sehr leicht flüchtig und sammelt sich i. d. R. nicht so leicht an, wie z. B. Propan.

Durch den hohen Diffusionskoeffizienten kann Wasserstoff darüber hinaus leichter in Werkstoffe eindringen. Bei einigen metallischen Werkstoffen kann es dadurch unter bestimmten Bedingungen zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften sowie einer wasserstoffinduzierten oder wasserstoffunterstützten Rissbildung bis hin zum Materialversagen kommen, s. Abschn. 3.1. Bei nicht-metallischen Werkstoffen, die z. B. als Dichtungsmaterialien eingesetzt werden, kann infolge des Eindringens von Wasserstoff unter bestimmten Bedingungen ein Aufquellen bis hin zum Materialversagen verursacht werden, wenn keine ge-

Tabelle 2. Physikalische Eigenschaften (bei Normalbedingungen) von Wasserstoff im Vergleich zu Methan, Propan und Luft [15–18].

| Physikalische Eigenschaft | Wasserstoff | Methan | Propan | Luft |
|--|------------------------|------------------------|--------|------|
| Molmasse [g mol ⁻¹] | 2 | 16 | 44 | 29 |
| Gasdichte [g m ⁻³] | 82,7 | 660 | 1841 | 1189 |
| Diffusionskoeffizient in Luft [m ² s ⁻¹] | 0,61 · 10 ⁴ | 0,16 · 10 ⁴ | | – |
| Wärmeleitfähigkeit [mW m ⁻¹ K ⁻¹] | 183,3 | 33,3 | 17,8 | 25,5 |
| spezifische Wärmekapazität [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹] | 14,3 | 2,2 | 1,7 | 1,0 |
| spezifische Wärmekapazität [kJ mol ⁻¹ K ⁻¹] | 28,8 | 35,7 | 73,6 | 29,1 |
| Joule-Thomson Koeffizient [K MPa ⁻¹] | –0,3 | 4,5 | 18,0 | 2,4 |
| max. Flammtemperatur in Luft [K] | 2318 | 2148 | 2198 | – |
| oberer Brennwert [kJ g ⁻¹] | 141,9 | 55,5 | 50,4 | – |
| oberer Brennwert [kJ mol ⁻¹] | 286 | 891 | 2200 | – |
| Siedepunkt [K] | 20,4 | 111,6 | 231,1 | 79,8 |

eigneten Materialien eingesetzt werden. Das Schwellen und Schrumpfen beim Aufnehmen und Abgeben von Wasserstoff muss auch bei der sicheren Auslegung von Festkörperspeichern, insbesondere den Metallhydriden, berücksichtigt werden. Auch beim schlagartigen Entspannen von nicht-metallischen Materialien bei hohem Wasserstoffdruck (explosive Dekompression) kann es zu einer Schädigung des Materials kommen [19].

Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffs im Vergleich zu Kohlenwasserstoffen haben letztlich auch zur Folge, dass die Ausdehnung, Temperatur und Strahlung von Wasserstoffflammen, unter sonst gleichen Freisetzungsbedingungen, unterschiedlich ist, wodurch z. B. Sicherheitsabstände anders ausgelegt werden müssen. Darüber hinaus sind Wasserstoffflammen farblos und bei Sonnenlicht nicht sichtbar. Sie müssen daher mit Hilfsmitteln, wie z. B. Wärmebildkameras detektiert werden.

Erhebliche Unterschiede ergeben sich auch beim Umgang mit flüssigem, kryogenem Wasserstoff im Vergleich zu flüssigem Erdgas (LNG) oder Flüssiggas (LPG), weil der Siedepunkt um ca. 100 K bzw. 200 K niedriger ist. Unter anderem muss daher bei einer Freisetzung z. B. eine mögliche Verflüssigung der Luft bzw. die Bildung von flüssigem Sauerstoff und Gemischen mit erhöhter Sauerstoffkonzentration berücksichtigt werden.

Defekt einer Dichtung eines Hochdruckbehälters wurde nicht rechtzeitig erkannt, so dass es zu einem Versagen der Dichtung und einer starken Freisetzung kam. Vermutlich über Druckstöße oder aufprallende Kieselsteine wurde die hochturbulente Mischung gezündet und es kam zu einer Explosion, welche die Schutzwände nach außen schleuderte und noch Fahrzeugaubags in einer Entfernung von ca. 100 m auslöste.

Viele der Phänomene der Ereignisketten von Unfällen mit Wasserstoff sind tatsächlich gut verstanden. Ausnahmen hiervon bilden die Zündphänomene und Vorgänge mit flüssigem oder kryogenem Wasserstoff.

Obwohl in HIAD mittlerweile mehr als 700 Unfälle mit Wasserstoff dokumentiert sind, ist die statistische Basis für quantitative Risikoanalysen nicht ausreichend. Mit Hilfe solcher Datenbanken können jedoch auch untypische Szenarien in einer abdeckenden Gefährdungsanalyse berücksichtigt und mit geeigneten Gegenmaßnahmen ähnliche Unfälle vermieden werden. Diese „lessons learnt“ stehen daher eher im Fokus des Einsatzes von Unfalldatenbanken, wie auch bei den US Department of Energy (DoE) unterstützten Aktivitäten, welche auf der Webseite h2tools.org [21] zusammengetragen sind.

Besondere Szenarien stehen zumeist im Zusammenhang mit besonderen oder neuen Anwendungen oder besonderen Umgebungen. Ein Beispiel hierfür ist die Kerntechnik, wo Wasserstoff im Wesentlichen unbeabsichtigt durch Radioolyse in Siedewasserreaktoren oder während schwerer Unfälle durch Oxidation von Metallen im überhitzten Dampf produziert wird. Der Störfall im Kernkraftwerk Fukushima im Jahr 2011 hat gezeigt, dass es bereits unter atmosphärischen Bedingungen und Wasserstoff-Inventaren in der Größenordnung von 100 kg zu katastrophalen Wasserstoff-Explosionen kommen kann [22]. Zudem legte dieser Unfall offen, wie wichtig dedizierte Ventilierungsstrategien für umschließende Räume sind. Die Radioolyse- bzw. Knallgas-Explosionen im Kernkraftwerk Brunsbüttel und im japanischen Hamaoka im Jahr 2001 [23] demonstrieren, dass selbst für kleine Mengen an stöchiometrischen Mischungen aus Wasserstoff und Sauerstoff bei erhöhtem Startdruck die Bewegung eines Ventils als Zündquelle ausreicht und die sich anschließende Verbrennung schnell in eine Detonation umschlägt, welche eine Rohrleitung auf einer Länge von 2,7 m zerstören kann. Die aus diesen Unfällen gewonnenen Erkenntnisse bezüglich katalytischer Reinigung, bzw. Entfernung von Sauerstoff, sicherer Auslegung von kritischen Rohrleitungssystemen und passivem Schutz von sensitiven Anlagenteilen lassen sich zumindest teilweise auch auf Szenarien mit Elektrolyse übertragen.

3 Sicherheitsaspekte der Wasserstoffspeicherung

Wasserstoff besitzt zwar eine hohe massenbezogene Energiedichte von ca. 33,3 kWh kg⁻¹, die beispielsweise um den

Faktor 3 über dem entsprechenden Heizwert von Erdgas liegt. Allerdings muss die sehr geringe volumetrische Dichte von 0,0899 kg m⁻³ unter Normalbedingungen zum Speichern und für die meisten Anwendungen deutlich erhöht werden. Für den Transport in transportrechtlich zugelassenen Behältern wird Wasserstoff z. B. durch eine Druckerhöhung auf 30 MPa verdichtet; an Wasserstofftankstellen muss zur Betankung von Fahrzeugen mit 70 MPa Tanks Wasserstoff bei Drücken bis zu 100 MPa vorgehalten werden. Die Option der Verflüssigung, welche noch deutlich höhere volumetrische Dichten ermöglicht, wird bisher nur für den großskaligen Transport oder für die Raumfahrt genutzt. Die sichere Herstellung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff in der komprimierten als auch in der verflüssigten Form erfordern geeignete Technologien, wobei die hohen Mengen in den Speichern i. d. R. die größten technischen Risiken repräsentieren. Im Folgenden werden daher die Speichertechniken und deren spezifischen Sicherheitsaspekte detailliert beschrieben.

3.1 Druckwasserstoff

Die Speicherung von Wasserstoff bei hohen Drücken impliziert insbesondere Gefährdungen in Form von Leckagen, Leitungsabbrissen und Behälterbersten.

3.1.1 Druckspeicher

Auch wenn gemäß den Ausführungen der Gestis Stoffdatenbank [24] alle üblichen Werkstoffe für Gasflaschen und Ventile auch für den Einsatz von Wasserstoff geeignet sind, werden in der Praxis aufgrund der Gefahr einer „Wasserstoffversprödung“ üblicherweise einige Einschränkungen vorgenommen. So werden beispielsweise vergütete Legierungsstähle nur unter Beachtung der geforderten maximalen Festigkeitswerte von 950 MPa verwendet oder nahtlose Gasflaschen aus Chrom-Molybdän-Stählen eingesetzt, die einen maximalen Festigkeitswert von 950 MPa nicht überschreiten. Auch bei Edelstählen für Ventilmembranen und Federn ist auf das Vorhandensein einer positiven Betriebserfahrung hinsichtlich einer sicheren Nutzung zu achten, da auch diverse Edelstahllegierungen anfällig für Wasserstoff sein können [25].

Bei dem umgangssprachlich als „Wasserstoffversprödung“ bezeichneten Komplex von Phänomenen wird molekularer Wasserstoff an den Oberflächen von metallischen Werkstoffen, insbesondere von Stählen, adsorbiert und dort über katalytische Prozesse dissoziiert. Insbesondere hoher Druck und hohe Wasserstoffreinheit fördern diese initiale Phase. Der atomare Wasserstoff diffundiert dann in das Gefüge des metallischen Werkstoffs ein und rekombiniert dort insbesondere an Gitterstörstellen zu molekularem Wasserstoff. Hieraus resultieren lokale Druckerhöhungen, die innere Verspannungen und Versprödung des Werkstoffes nach sich ziehen. Bei den Stählen bilden austenitische Edeltähle (z. B.

CrNi-Stähle) eine Ausnahme. Diese sind weitgehend unempfindlich gegen Wasserstoffversprödung und gehören zu den Standardwerkstoffen der Wasserstofftechnik.

Die von den in Deutschland beheimateten Gaslieferanten angebotenen Gasflaschen haben in der Regel ein Volumen von bis zu 50 L. Solche Flaschen können in Abhängigkeit von ihrem Prüfdruck mit 20 oder 30 MPa befüllt werden. Wie für alle entzündlichen Gase haben auch die Ventile für Wasserstoff ein Linksgewinde.

Entsprechend der thermodynamischen Eigenschaften von Wasserstoff lässt sich die Speicherdichte weiter verringern, indem der Druck erhöht wird. Diesen Umstand möchte man technisch beim Einsatz in wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen nutzen, um so in beengten Platzverhältnissen eine möglichst große Energiemenge in einem Fahrzeug mitführen zu können. Höhere Drücke erfordern proportional höhere Wanddicken mit entsprechend steigenden Behältergewicht. Die Dichte steigt jedoch wegen Realgas-effekten nicht weiter proportional mit dem Druck an. Durch diese Abweichung vom idealen Gasverhalten und die zunehmenden Aufwände zur Verdichtung sind Drücke über 100 MPa technisch nicht sinnvoll. Der Nenndruck für Tanks für Lastkraftwagen/Nutzfahrzeuge liegt daher üblicherweise bei 35 MPa und bei Personenkraftwagen bei 70 MPa. Damit Wasserstoff auf ein Druckniveau von 70 MPa gebracht werden kann, wird beim Komprimieren ca. 15 % des Energieinhaltes des Wasserstoffes eingesetzt. Um Behälter beim schnellen Befüllen nicht zu überhitzen, muss der Hochdruckwasserstoff auf $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder sogar auf $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgekühlt werden, was einen noch höheren Energieaufwand bedeutet.

Folgende Druckspeicher-Behältertypen werden unterschieden (die Reihung entspricht abnehmenden spezifischen Eigengewicht):

- Typ I: Metallbehälter: Dieser Behältertyp ist als Einzelflasche oder Bündel mit Drücken von bis zu 35 MPa einsetzbar.
- Typ II: Metallbehälter mit faserverstärktem Kunststoff (FVK): Bei diesem Behältertyp ist der Behältermantel mit faserverstärktem Kunststoff umgeben. Dieser Typus ermöglicht Nenndrücke von bis zu 100 MPa. Durch geringere metallische Wandstärken kann ein Gewichtsvorteil erreicht werden.
- Typ III: Metallbehälter mit vollständiger Außenschicht mit FVK: Im Gegensatz zu den Behältern des Typs II, bei denen nur der Mantelbereich verstärkt ist, umgeben beim Typ III carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) den gesamten Behälter.
- Typ IV: Nicht-metallischer Innenbehälter mit vollständiger Außenschicht mit FVK. Der wesentliche Unterschied dieses Typs zum Typ III liegt in der Innenschicht, die aus Kunststoff besteht. Lediglich der Zylinderhals, in den das Zylinderventil montiert wird, besteht aus Metall.
- Typ V: CFK-Behälter ohne Innenbehälter. Der wesentliche Unterschied zu Typ IV ist, dass die Dichtfunktion direkt über den FVK erreicht wird.

Der Stand der Technik, insbesondere für Fahrzeugspeicher, wird durch Typ IV repräsentiert. Das Zylinderventil integriert auch noch eine Temperatur-aktivierte Druckentlastungssicherung TPRD, die über ein Glasbruchelement realisiert wird und im Brandlastfall eine rechtzeitige Druckentlastung der temperaturempfindlichen FVK gewährleisten soll.

3.1.2 Wasserstoffleckagen

Aufgrund der geringen Molekülgröße von Wasserstoff bei gleichzeitig hohen Speicherdrücken können Leckagen ungleich leichter als bei anderen technischen Gasen auftreten. Daher müssen geeignete Dichtmaterialien und Verschraubungen gewählt werden. Für Druckwasserstoff werden typischerweise Kupferdichtungen oder auch O-Ringdichtungen aus geeigneten Kunststoffen verwendet. Darüber hinaus hat sich eine fachkundige Montage und geeignete wiederholte Prüfung insbesondere von geschraubten Verbindungen als sicherheitstechnisch relevant herausgestellt. Die Überprüfung der Dichtigkeit z. B. nach Revisionen oder Umbauten muss bei den betriebsrelevanten Drücken und mit geeigneten Prüfgasen, zum Beispiel Formiergas aus 95 Mol.-% N_2 und 5 Mol.-% H_2 , erfolgen. Eine Überprüfung mit reinem Stickstoff ist nicht verlässlich.

Die typischen Leckagen entstehen dann an kleinsten Öffnungen, flächige Permeation ist bei intakten Behältern nicht zu erwarten. An der Austrittsöffnung entsteht ein Gasstrahl, der sich zunächst bei überkritischen Druckverhältnissen über geometrische komplexe Druckentlastungsstöße an den Umgebungsdruck anpasst. Diese Expansionszone ist mit wenigen charakteristischen Durchmessern der Öffnung relativ kurz. Danach kommt es zu einer selbstähnlichen impulsgetriebenen Einmischung in die Umgebungsluft und danach zu der Bildung einer auftriebsgetriebenen Phase. Dieses Verhalten wird gut über das Integralmodell in [26] beschrieben. In realistischen Szenarien wird diese idealisierte Ausbreitung durch Wechselwirkungen mit benachbarten Wänden gestört. Wird zum Beispiel das Gas horizontal in Bodennähe freigesetzt, ist die Einmischung von unten behindert und der brennbare Bereich erstreckt sich über einen größeren Abstand [27]. Wenig untersucht ist der Vermischungseffekt beim Aufprallen auf eine Wand.

Die Zündung eines quasistationären horizontal ausgebläsen Gasstrahls wurde u. a. in [28] untersucht. Aufgrund der Turbulenz war eine stabile Zündung nur in Bereichen mit mittleren Konzentrationen über 8 Mol.-% möglich. Konservative Zündannahmen beim instationären Ausblasen eines Gasinventars wurden z. B. in [29] untersucht. Die Zündung über das zuvor zitierte Shock Diffusion Ignition Phänomen wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht. Um hinter dem führenden Stoß ausreichend Wärme zur Selbstzündung der nachströmenden Gasgemische zu haben, sind mindestens 25facher Überdruck auf der Speicherseite und eine Mindestlänge des Spalts der freisetzenen Öffnung

notwendig. Gegenwärtig werden komplexere Freisetzungsgometrien hinsichtlich dieses Effekts untersucht.

Sowohl die sichtbare Länge als auch die Wärmestrahlung der sich ausbildenden, quasistationären freien Flamme nach erfolgreicher Zündung lassen sich gut über validierte Korrelationen modellieren [30, 31].

Sollte es nicht zu einer frühen Zündung kommen kann sich das vorgemischte Gas in (teil-)geschlossenen Räumen unter der Decke oder unter Vorsprüngen ansammeln. Die Gefährdung solcher vorgemischten Wolken erfolgt über eine gestaffelte Bewertung mit Kriterien der Zündfähigkeit, der Flammenbeschleunigung und des möglichen Umschlags in eine Detonation (DDT).

Das lokale konservative Kriterium für Flammenbeschleunigung ist

$$\sigma > \sigma_{crit} = 3,75 \quad (1)$$

mit dem als Expansionsverhältnis σ , welches sich aus dem Verhältnis der spezifischen Volumina von verbrannten zu unverbrannten Gas ergibt und eine Funktion des Mischungsverhältnisses und des thermodynamischen Zustands der Mischung ist, und dem kritischen Expansionsverhältnis σ_{crit} welches überschritten werden muss, um in Instabilitäten in der Flammenfront zu resultieren. Dieses Kriterium ist konservativ, da es aus Rohrexperimenten mit Volleinschluss bestimmt wurde. Für Wasserstoff und Standardbedingungen sind so für eine Flammenbeschleunigung mindestens 10,5 % Mol.-% erforderlich.

In den Bereichen, in denen Flammenbeschleunigung möglich ist, kann es zu einem Detonationsumschlag DDT kommen, falls die beschleunigt brennbare Wolke folgende Mindestgröße D einnimmt:

$$D > 7\lambda \quad (2)$$

Mit λ als Detonationszellengröße, wiederum abhängig vom Mischungsverhältnis und dem thermodynamischen Zustand. Für stöchiometrische Mischungen mit Luft beträgt $\lambda = 1,5$ cm.

Eine Erweiterung bzw. Reduktion der Konservativität dieser Kriterien in Hinblick auf nur teilumgeschlossene oder inhomogene Mischungen findet man zum Beispiel in [32].

3.2 Flüssigwasserstoff

Flüssigwasserstoff (LH2) oder tiefkalter, kryogener gasförmiger Wasserstoff hat andere Eigenschaften und damit auch andere potenzielle Gefahren als gasförmiger, komprimierter umgebungswarmer Wasserstoff. Entsprechend müssen Design und Betrieb diesen Eigenschaften angepasst sein, um Sicherheit zu gewährleisten.

LH2 ist eine farblose, leicht viskose Flüssigkeit und hat bei Standarddruck eine Dichte von etwa 70 g L^{-1} . Damit ist LH2 etwa 14-mal leichter als Wasser (ähnliches Dichteverhältnis wie gasförmiger Wasserstoff und Luft) und 75 % dichter als umgebungswarmer Wasserstoff bei 70 MPa. Der

niedere Druck und die relativ leichten Isolationsmaterialien erlauben sehr leichte und relativ kompakte Speichersysteme für massenkritische Transport- und Mobilitätsanwendungen, wie z. B. Luft- und Raumfahrt, aufzubauen.

3.2.1 Kryostate

LH2 wird sowohl stationär als auch für Transport- oder Mobilitätsanwendungen bei unterkritischen Temperaturen und relativ niedrigen, leicht überatmosphärischen, unterkritischen Drücken in stark thermisch isolierenden Kryostaten gespeichert. Die Speichertemperatur beträgt somit 20 K bis 33 K. Um Instabilitäten zu vermeiden, sollte der Betrieb von Anlagen mit LH2 immer einen gewissen Abstand zum kritischen Punkt einhalten.

Entsprechend dem Stand der Technik sind Kryostaten aus Edelstahl gefertigte, doppelwandige vakuumisolierte Behälter. Der innere Druckbehälter, welcher das Kryogen bei Drücken typisch zwischen 0,11 und 0,5 MPa speichert, ist in einem äußeren Vakuumbehälter aufwändig gelagert, um Spannungen aufgrund thermischer Kontraktion beim Kaltfahren zu vermeiden. Bei großen Kryostaten wird das Vakuum zwischen innerem Druck- und äußerem Vakuumbehälter mit komprimiertem Perlit, einer Schüttung aus anorganischem, amorphem, vulkanischem Glas, als Strahlungsschild gefüllt. Perlit stellt einen guten Kompromiss zwischen Kosten und Isolationseigenschaften dar. Für kleinere Kryostate ($< 100 \text{ m}^3$) wird stattdessen eine mehrschichtige Isolierung (MLI) verwendet. Diese Isolierung besteht aus mehreren Schichten einer metallbeschichteten Kunststoffolie, die durch einen gitterartigen Abstandhalter getrennt sind. Die Wärmeaufnahme für kleinere LH2-Speicher wird so auf typisch 1 W reduziert.

Der verbleibende Wärmeeintrag führt zu einer kontinuierlichen Verdampfung (Boil-off) und zu einem entsprechenden Temperatur- und Druckanstieg. Bei 20 K nimmt der Satttdampf über 50-mal mehr Raum in Anspruch als die Flüssigphase [33]. Über ein Druckbegrenzungsventil wird der verdampfte Wasserstoff aus dem Druckbehälter abgeführt und so der Druck auf den Arbeitsdruck des Kryostaten begrenzt. Das Verdampfen entspricht einem anteiligen Verlust von ca. 1,5 % der gespeicherten Energie pro Tag bei kleinen Kryostaten und entsprechend weniger bei größeren, stationären Speichern.

Die folgenden Maßnahmen des Boil-off-Managements können diese Verluste verhindern oder zumindest verringern, bzw. das mit dem freigesetzten Wasserstoff verbundene Risiko reduzieren:

- kalte Verbrennung des Boil-offs mit Luft in katalytischen Rekombinatoren,
- direkte energetische Nutzung, zum Beispiel in einer Brennstoffzelle.
- Speicherung der Boil-off-Gase in Metallhydriden oder anderen Adsorbentien,
- Rückverflüssigung oder
- aktive Kühlung des gespeicherten Inventars.

Da LH2 zusätzlich eine sehr hohe thermische Expansion aufweist, ist es wichtig, genügend Raum für die Gasphase von etwa 10 % des Gesamtvolumens über der Flüssigphase sicher zu stellen. Eine Überfüllung muss über entsprechende Überfüllöffnungen und Füllstandsmessungen vermieden werden.

Zusätzlich wird der Druckbehälter über ein Sicherheitsventil und eine Berstmembran, sowie der Vakuumbehälter über eine Berstmembran gegen Überdruck abgesichert.

3.2.2 Besondere sicherheitstechnische Herausforderungen mit kryogenem Wasserstoff

In den Jahren 2017 bis 2021 haben das vom europäischen Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking FCH JU kofinanzierte Projekt PRESLHY [34] und das norwegische Projekt SH2IFT [35] umfangreiche Versuchsprogramme durchgeführt, die sich vorrangig mit grundlegenden Fragen im Zusammenhang mit dem unfallbedingten Verhalten von flüssigem oder kryogenem Wasserstoff befassen.

Bei großskaligen Freisetzen der Flüssigphase, insbesondere bei Freisetzen nahe und in Richtung zum Boden, kann es zu einer Pool- und Eisbildung mit anschließendem Abdampfen kombiniert mit Sauerstoffanreicherung kommen. Bei horizontalen Freisetzen mit einem Abstand von mehr als 20 cm vom Boden und Speicherdrücken größer 0,4 MPa erreicht die Flüssigphase aufgrund der intensiven Verdampfung den Boden nicht mehr. Generell sind kryogene Freisetzen weniger impulsgetrieben als beim Druckwasserstoff und die niederen Temperaturen unterdrücken i.d.R. spontane Zündprozesse.

Die Ausbreitung kryogener Pools kann zum Beispiel mit dem Computercode LAUV [36] simuliert werden. Es können die Poolhöhe und die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Zeit und Ort bestimmt werden. Pulsartige wie auch kontinuierliche Freisetzen von LH2 auf festem wie auch flüssigem Untergrund können modelliert werden. Die Wärmeleitung aus dem Boden ist die dominierende Wärmequelle für die Verdampfung des Kryogens. Andere Wärmeströme können auch bei variierenden Wetterbedingungen vernachlässigt werden.

Durch die relativ hohe Dichte kommt es in Abhängigkeit von weiteren Umgebungsbedingungen (Windprofil, Temperaturen etc.) zu Ausbreitungen, welche relativ lange am Boden verweilen. Durch die Einmischung von warmer Luft erreicht das Gemisch bei ca. 80 K die obere Explosionsgrenze. Die Auftriebskräfte bleiben auch bis zum Erreichen der unteren Explosionsgrenze gering, da die Erwärmung des Gemischs im Wesentlichen über das Einmischen warmer, relativ schwerer Luft erfolgt. Die Temperaturänderung und Konzentration von Wasserstoff im Gemisch stehen dabei in einem entgegengesetzt linearen Zusammenhang.

Die sichtbare Wolke, welche durch das Kondensieren von Feuchte aus der Umgebungsluft bestimmt wird, ist i.d.R. nahezu identisch mit der zündfähigen Wolke. Dieser Zusammenhang sollte jedoch nicht sicherheitstechnisch belastet werden.

Die unfallbedingte Zündung von brennbaren Gemischen ist – vermutlich aufgrund der verlangsamten Kinetik – deutlich weniger wahrscheinlich. Im Hinblick auf die Zündung wurden in PRESLHY die Mindestzündenergie MIE und die notwendige Temperatur von heißen Oberflächen zur Zündung von tiefkalten Gemischen bestimmt [37]. In Hunderten von Ausblaseexperimenten wurden keine Selbstentzündungen beobachtet. Die vermutlich durch das Abscheren von Vereisungen generierten elektrostatischen Ladungen nehmen mit dem Druck des abgeblasenen Inventars zu, reichen aber offensichtlich nicht aus, um die freigesetzten und sich vermischenden Inventare zu zünden. Die Variation des Zündortes und -zeitpunktes hat eine Korrelation für die schlimmsten Auswirkungen bei einer vorübergehenden Freisetzung von kleinen Vorräten ergeben.

Im Verbrennungsbereich wurden bestehende Flammengängenkorrelationen auch für den kryogenen Bereich validiert und tatsächliche und kritische Expansionsverhältnisse und die Anlaufstrecke für DDT bei kryogenen Bedingungen bestimmt.

Empirische Tests für schlagartige Verdampfung bzw. Dampfexplosionen (Rapid Phase Transition, RPT) und Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion BLEVE im Rahmen des SH2IFT-Projekts haben gezeigt, dass beide Phänomene unter realistischen Bedingungen mit LH2 auftreten. LH2-Freisetzen auf bzw. unterhalb von Wasseroberflächen zeigten neben dem physikalischen Phänomen einer RPT und den damit einhergehenden, lokal begrenzten Druckwellen, zusätzlich die Neigung zur Entzündung der entstehenden Wasserstoffwolke auf. Die Zündquellen konnten in diesen Untersuchungen nicht identifiziert werden, die Entzündungen selber waren jedoch reproduzierbar und gehen mit den typischen Explosionsauswirkungen einher [38].

Bei Brandversuchen mit drei 1000-L-Kryostaten wurde bei einem Kryostaten mit MLI nach über einer Stunde ein BLEVE beobachtet [39]. BLEVEs galten bis dahin als unwahrscheinliches Phänomen für LH2-Speicher aufgrund des hohen thermischen Schutzes. Es wird vermutet, dass das Ausgasen der MLI den Vakuumpalt überbrückt und so zu einem zu hohen Wärmeeintrag in den Druckbehälter geführt hat.

Ein Teil dieser neuen Erkenntnisse fließt derzeit in eine Überarbeitung des ISO TR 15916 ein und hat Folgeprojekte wie Enhancing Liquid and Vapourised HYdrogen Safety (ELVHYS), ein von der Clean Hydrogen Partnership unterstütztes Projekt, angeregt [40]. ELVHYS wird sich auf den sicheren Transfer von LH2 konzentrieren und ist daher eher anwendungsorientiert.

Neben den zuvor beschriebenen Phänomenen RPT und BLEVE werden folgende Wissenslücken im Zusammenhang mit dem sicheren Umgang mit kryogenem Wasserstoff als wichtig erachtet: Materialkompatibilität mit kryogenem Wasserstoff, insbesondere für nicht-metallische Werkstoffe; verbesserte thermodynamische Modellierung bei mehrphasigen, nicht im Gleichgewicht befindlichen, nahezu kritischen Bedingungen und Reaktionskinetik, Induktionszeiten und Deto-

nationszellengrößen für kryogene Bedingungen. Auch die mehrphasigen Auswirkungen auf die Vermischungsvorgänge im großen Maßstab und die Verbrennungsvorgänge mit Hindernissen und/oder (teilweisem) Einschluss müssen besser verstanden werden. Das bessere Verständnis des grundsätzlichen Verhaltens soll helfen, offene Fragen der Anwendung zu lösen, wie z. B. die ordnungsgemäße Auslegung und Genehmigung von Sicherheitsventilen und Wärmedämmung, und die Qualität der damit verbundenen Risikobewertungen und Minderungsstrategien (Platzierung von Sensoren, Auslegung der Belüftung usw.) verbessern. Weitere offene Fragen sind Aufpralltests von LH2-Tanks und das Abschreckverhalten von LH2-gekühlten Hochtemperatursupraleitern.

4 Methodiken zur Sicherheitsbewertung

Methoden der Sicherheitsbewertung verfahrenstechnischer Prozesse umfassen vier Elemente:

- die Identifizierung zu erwartender Gefährdungen, Schadensszenarien und Ereignisabläufe,
- die Ermittlung der Häufigkeit (auf einen Betrachtungszeitraum bezogene Wahrscheinlichkeit) des Eintretens dieser Schadensszenarien,
- die Abschätzung der Auswirkungen des Schadenseignisses (z. B. Wärmestrahlung, Druckwellenausbreitung, Ausbreitung explosionsfähiger Gemische, Ausbreitung toxischer Gemische, Trümmerwurf),
- die Bewertung des sich aus Häufigkeit und Auswirkung ergebenden Risikos in Bezug auf Akzeptanz- und Toleranzgrenzen.

Die Gefährdungsanalyse beschränkt sich dabei auf das Erkennen möglicher Gefährdungen. Die Methoden der Risikoanalyse lassen sich in qualitative, semi-quantitative und probabilistische Methoden einteilen. Allen Methoden gemeinsam ist, dass auf der einen Seite die Wahrscheinlichkeit des Ereigniseintritts, auf der anderen Seite das zu erwartende Schadensausmaß bewertet werden müssen. Bei den qualitativen Methoden geschieht dies lediglich durch eine Kategorisierung, z. B. für die Eintrittswahrscheinlichkeit mit den Kategorien „selten“, „gelegentlich“, „häufig“, „sehr häufig“ und für das Schadensausmaß mit den Kategorien „gering“, „moderat“, „hoch“ und „sehr hoch“. Auf dieser Kategorisierung beruhen z. B. die in Abb. 3 gezeigte Risikomatrix.

In verschiedenen Quellen erfolgt eine Zuordnung ganzzahliger numerischer Werte zu den Kategorien, so dass sich für das Risiko als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß mindestens ein Wert von 1 und höchstens ein Wert von 16 ergibt. Es sind jedoch auch Risikomatrizen mit anderer als 4x4-Struktur in Anwendung.

In vielen Fällen, insbesondere wenn spezifische Anlagenkonfigurationen sehr detailliert analysiert werden, kom-

| Eintrittswahrscheinlichkeit | gering | mittel | hoch | sehr hoch |
|-----------------------------|------------|-----------------------------|--------------|-----------|
| Schadensausmaß | | | | |
| gering | | | | |
| mittel | | | | |
| hoch | | | | |
| sehr hoch | | | | |
| | | | | |
| | | Vorkehrungen erforderlich ? | | |
| | akzeptabel | | inakzeptabel | |

Abbildung 3. Risikomatrix nach Nohl [40].

men HAZOP-Analysen zur Anwendung. Die Abkürzung HAZOP steht für Hazard and Operability. HAZOP-Studien werden in verschiedenen Phasen der Anlagenplanung, aber auch im Anlagenbetrieb angewendet. Es handelt sich um eine qualitative Methode, d. h. die unterstellten Ereignisszenarien werden nicht mit Wahrscheinlichkeitswerten unteretzt.

Wird eine HAZOP-Studie zum Beispiel in der Detailplanung einer verfahrenstechnischen Anlage eingesetzt, in der schon die Rohrleitungs- und Instrumentierungsfließbilder (R&I) vorliegen, werden diese einer HAZOP-Studie zugrunde gelegt. Die Anlage wird anhand der R&I verfahrenstechnisch sinnvoll in Sektionen eingeteilt, und die HAZOP für diese verschiedenen Sektionen ausgeführt. Beispielsweise kann ein Reaktor, in dem erhöhte Drücke oder Temperaturen oder gefährliche Stoffkonzentrationen auftreten, eine Sektion bilden. An jeder Sektion werden Knoten definiert, die aus Anlagenelementen gebildet sind, die den Zustand des Reaktors bestimmen. Hierzu gehören zum Beispiel Pumpen, Ventile und Mess-, Steuer- und Regelungseinrichtungen.

Die eigentliche Risikoanalyse wird so durchgeführt, dass vom normalen Betriebszustand abweichende Bedingungen an den Knoten einer Sektion untersucht werden. Hierfür werden sogenannte Leitwörter in Kombination mit Betriebsparametern am Knoten verwendet. Die Kombination „No Flow“ würde zum Beispiel andeuten, dass an einem Knoten ein bestimmter Stoffstrom nicht anliegt. Für einen Reaktor in einem chemischen Prozess wäre etwa die Unterbindung der Produktabfuhr ein gefährlicher Zustand, der zur Überschreitung des zulässigen Füllstandes des Reaktors führen könnte.

Eine Kombination „More Temperature“ würde zum Beispiel andeuten, dass die zulässige Reaktionstemperatur überschritten ist. „More Flow“ deutet an, dass an einem Knoten ein zu hoher Mengenstrom in den Reaktor eintritt.

In der HAZOP-Studie werden die Ursachen der möglichen Abweichungen vom Normalzustand ermittelt sowie Gegenmaßnahmen festgelegt. Üblicherweise wird dafür ein Team mit Vertretern der relevanten Zuständigkeitsbereiche

(Planung, Betrieb, Sicherheit, Instandhaltung, Werkfeuerwehr u. a.) gebildet, das von einer unabhängigen Expertin/ einem unabhängigen Experten geleitet wird. Für HAZOP-Studien gibt es eine europäische Norm (DIN EN 61882:2017-02 [42]).

In der verfahrenstechnischen Industrie ebenfalls verbreitet ist die „Layer of Protection“-Analyse (LOPA). Während HAZOP sehr detailliert die gefährdenden Zustände an einzelnen Anlagenkomponenten untersucht, bezieht sich die LOPA eher generell auf das Anlagenkonzept. Es geht dabei darum, Eskalationsstufen der Abweichungen vom Normalbetrieb mit Schutzmaßnahmen auf mehreren Niveaus („Layern“) zu begegnen. Diese „Layer“ reichen von Eingriffen des Prozessleit- und Steuersystems (PLT) über dessen besondere, nur im Bedarfsfall aktivierte Schutzfunktionen, weiter über mechanische Schutzvorrichtungen (Sicherheitsventile) bis zu Maßnahmen des Katastrophenschutzes.

Die umfassendste Methode, bei der probabilistische Analysen der auslösenden Ereignisse und auch der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Sicherheitsbarrieren vorgenommen werden, wird als Quantitative Risikoanalyse (QRA) bezeichnet. Nicht jede Sicherheitsstudie beruht jedoch auf einer QRA.

Ein maßgebliches Schadensereignis in verfahrenstechnischen Anlagen und Prozessen ist regelmäßig der Verlust des Stoffeinschlusses. Bestehen mehrere Möglichkeiten auslösender Ereignisse für dieses Schadensszenario, zum Beispiel Überdruck, Unterdruck, Abriss von Rohrleitungen und wiederum mehrere Kausalketten für diese auslösende Ereignisse, werden Risikoanalysen schnell sehr komplex und umfangreich. In einer QRA wird unter Zugrundelegung ingenieurtechnischer Erfahrungen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen auslösenden Ereignisses angenommen. In einem weiteren Schritt werden die Sicherheitsbarrieren untersucht, die eingesetzt werden, damit das auslösende Ereignis nicht zum Verlust des Stoffeinschlusses führt. Jede Sicherheitsbarriere entfaltet ihre Wirkung aber nicht mit der Wahrscheinlichkeit 1. Deshalb sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten von Sicherheitsbarrieren zu bestimmen. Häufig geschieht das mit einer Fehlerbaumanalyse, aber auch andere Methoden wie Bayessche Netze sind möglich. Aus Eintrittswahrscheinlichkeit des auslösenden Ereignisses und Ausfallwahrscheinlichkeiten der Sicherheitsbarrieren lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadensereignisses „Verlust des Stoffeinschlusses“ berechnen. Bezieht sich die Betrachtung auf einem bestimmten Zeitraum, beispielsweise ein Jahr, wird die bezogene Wahrscheinlichkeit als Häufigkeit bezeichnet.

Im nächsten Schritt beinhaltet die QRA die Betrachtung der Auswirkungen des Ereignisses auf die Umgebung. Bei Versagen des Stoffeinschlusses in Wasserstoffanlagen kommt es, wie in Abschn. 2 und 3 beschrieben, zur Freisetzung von Wasserstoff und es muss mit der Bildung einer explosionsfähigen Wolke gerechnet werden. Gelangt diese zur Zündung kommt es zu einer Gaswolkenexplosion unter

Auslösung einer Druckwelle und von Wärmestrahlung. Durch mechanische Beschädigung von Strukturen spielt möglicherweise auch Trümmerwurf eine Rolle. Diese Wirkungen können mit mathematischen Methoden analysiert werden. Abb. 4 zeigt als Beispiel die berechneten Wirkungsradien einer Gaswolkenexplosion bei Freisetzung von Wasserstoff aus einem Speichertank in einer (fiktiven) Anlage zur Erzeugung von Wasserstoff aus mit Photovoltaikstrom betriebenen Elektrolyseuren. Dargestellt sind Isorisklinien (Linien gleichen Risikos), die sich aus der Multiplikation der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadensereignisses mit der Wahrscheinlichkeit der Schädigung für ein im Wirkungsbereich befindliches Individuum ergeben.

Während in Deutschland ein auf festen Sicherheitsabständen beruhender (deterministischer) Ansatz in Genehmigungsverfahren bevorzugt wird, ist die QRA in anderen europäischen Ländern weit verbreitet. In der Regel wird dabei eine Risikozahl von $< 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ für die Schädigung eines Individuums durch ein Schadensereignis als „sicher“ angesehen (im Sinne von nicht oberhalb des allgemeinen Lebensrisikos).

5 Vermeiden von Unfällen und Beschränken von Unfallfolgen

Die beschriebenen Unfallsequenzen und die oft damit verbundenen Eskalationen sollen durch den mehrstufigen Explosionsschutz möglichst früh unterbrochen werden. Die potenziellen, negativen Auswirkungen und der Aufwand für den Explosionsschutz selbst können so möglichst gering gehalten werden. So gilt es zuerst über den primären Explosionsschutz explosionsfähige Gemische zu vermeiden, d. h. die Dichtigkeit der Behälter zu gewährleisten oder eine Vermischung mit einem Oxidationsmittel, insbesondere Luft, zu unterbinden. Die Vermeidung der Zündung ist Inhalt des sekundären Explosionsschutzes und der Schutz vor den Explosionslasten wird als tertiärer Explosionsschutz bezeichnet.

5.1 Management

Die gegenwärtigen Hauptanwendungen von Wasserstoff sind industrieller Natur, wie z. B. die Erzeugung von Ammoniak, oder die Entschwefelung und das Hydro-Cracking in der Erdölverarbeitung [43]. In den entsprechenden explosionsgefährdeten Bereichen müssen in der Europäischen Union die Anforderungen der ATEX-Betriebsrichtlinie 1999/92/EG [44] berücksichtigt werden, die national in der Gefahrstoffverordnung umgesetzt sind. Bei Inventaren über 5 t greift darüber hinaus die europäische Seveso Richtlinie (Richtlinie 2003/105/EG), bzw. deren nationale Umsetzung in Deutschland über die entsprechende 12. Bundes-Immissionsschutzverordnung (Störfallverordnung), s. Abschn. 6.1. Wasserstoff ist dabei nur ein Gefahrstoff von vielen.

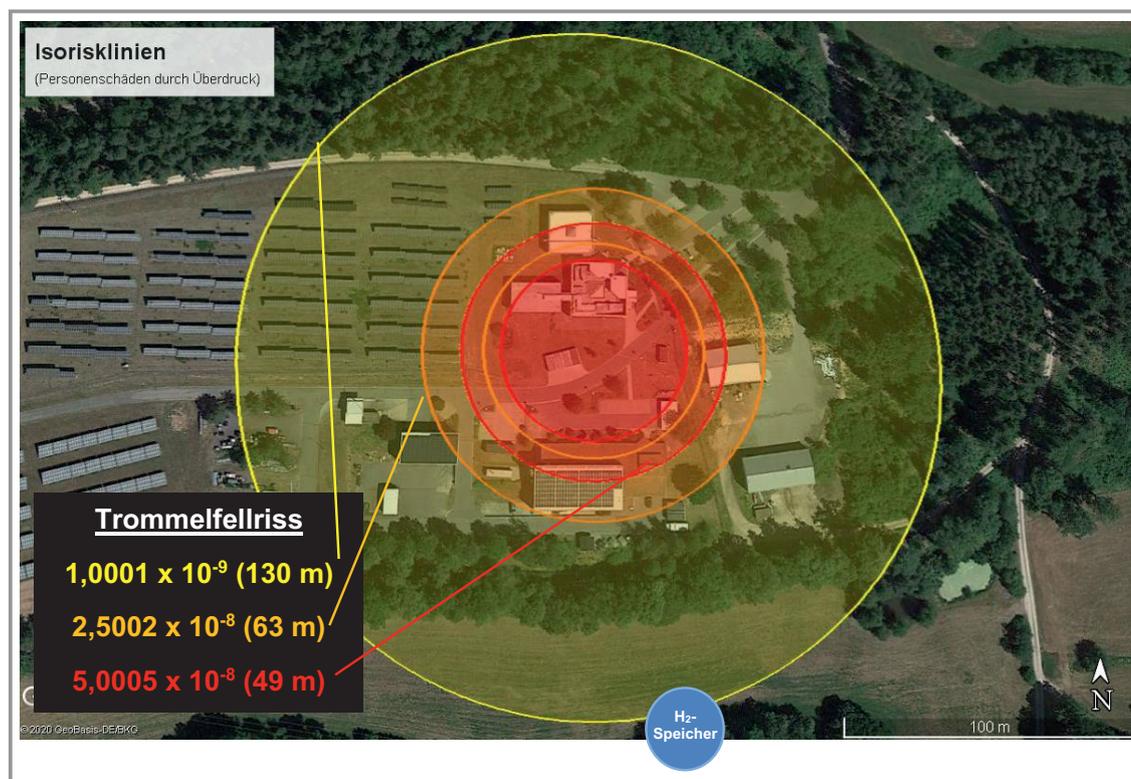


Abbildung 4. Isorisklinien für die Schädigung „Trommelfellriss“ infolge der Druckwirkung einer Gaswolkenexplosion bei Freisetzung aus einem Vorratsspeicher an einer fiktiven Speicheranlage (mit freundlicher Genehmigung des Rechteinhabers).

Im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung ist die Erstellung eines Explosionsschutzdokuments gefordert, in dem neben den sicherheitstechnischen Eigenschaften der Gefahrstoffe auch Gefährdungsbereiche entsprechend der Wahrscheinlichkeit und der Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre dokumentiert werden. Diese Bereiche werden über das sogenannte Zonenkonzept festgelegt. Für brennbare Gase und Dämpfe gemischt mit Luft werden drei Zonen unterschieden. In der Zone 0 ist eine explosionsfähige Atmosphäre ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden, in der Zone 1 gelegentlich und in der Zone 2 selten und nur kurzzeitig. Entsprechend der Zoneneinteilung sind weitere Maßnahmen zur Vermeidung einer Explosion abzuleiten, die ebenfalls im Explosionsschutzdokument beschrieben werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Vermeidung von Zündquellen. Um weitere Gefährdungen auszuschließen, können auch konstruktive Maßnahmen, z. B. Trennung von explosionsgefährdeten Bereichen, ergriffen werden, um so die Auswirkungen von Explosionen zu begrenzen.

Besonderes Augenmerk sollte im Explosionsschutzdokument auch auf den besonderen Betriebszuständen liegen, wie z. B. An- und Abfahren einer Anlage, Revisionen etc. Das Explosionsschutzdokument muss darüber hinaus regelmäßig überprüft und angepasst werden, insbesondere auch nach Modifikationen der Anlage.

Das direkt und indirekt betroffene Personal, wie Betriebsmannschaft, Ersthelfer, Lieferanten etc. müssen, ggf. auch wiederholt, hinsichtlich der Technologie, des sicheren Betriebs wie auch den besonderen Gefährdungen und der Sicherheitseinrichtungen geschult werden. Die Schulungen müssen dokumentiert werden und ggf. zum Nachweis einer Befähigung überprüfbar sein. Bei Anlagen mit großen Inventaren (z. B. > 50 t) empfiehlt sich zusätzlich die Entwicklung eines Krisenmanagement-Plans, der Verantwortlichkeiten definiert und - neben anderen Maßnahmen zur Wiederherstellung des Regelbetriebs - auch die interne und externe Kommunikation steuert. Insgesamt wird die Sicherheit durch ein pro-aktives Management mit dem Bekenntnis zum positiven, lösungsorientierten Umgang mit Problemen, zur offenen Kommunikation und zum Lernen gefördert.

5.2 Technologie

Die Europäische Richtlinie 2014/34/EU beschreibt die Anforderungen an Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen [45]. In Deutschland sind diese Anforderungen durch die 11. Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Explosionsschutzprodukteverordnung – 11. ProdSV) in

nationales Recht umgesetzt. Dabei wird zwischen den Anforderungen des Bergbaus sowie allen anderen Bereichen unterschieden. Die Richtlinie unterteilt die Geräte in drei Gruppen; bei Anlagen in Bereichen außerhalb des Bergbaus sind Geräte der Gerätegruppe II zu verwenden. Die Geräte sind entsprechend der Zonenfestlegung auszusuchen. Um ein einheitliches Schutzniveau zu erreichen, muss mit Zunahme der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Zündquelle abnehmen. Dieses wird durch entsprechende Gerätekategorien gewährleistet, die in Tab. 3 wiedergegeben sind. Geräte der Gerätekategorie I dürfen selbst bei selten zu erwartenden Gerätestörungen keine Zündquelle darstellen. Sie besitzen ein sehr hohes Schutzniveau und dürfen daher in den Zonen 0, 1 und 2 eingesetzt werden. Das Schutzniveau sinkt bei den Geräten der Gerätekategorie 3 so weit ab, dass diese Geräte im normalen Betrieb sicher sind. Daher dürfen diese Geräte nur in Zone 2 verwendet werden.

Die Richtlinie 2014/34/EU folgt dem so genannten „new approach“ der Europäischen Gemeinschaft. In dieser Richtlinie werden daher lediglich die grundlegenden Anforderungen an Gesundheit und Sicherheit festgelegt. Die technischen Details zur Erreichung dieser Anforderungen sind im Wesentlichen in den im Explosionsschutz relevanten Normenreihen IEC 60079 und IEC 80079 beschrieben. Diese Normen sind aber nicht verpflichtend, das von der Richtlinie geforderte Sicherheitsniveau kann auch durch andere Maßnahmen gewährleistet werden. Die IEC/EN 60079-0 definiert verschiedene Geräteschutzniveaus entsprechend der geforderten Gerätekategorie (s. Tab. 3). Entsprechend dieser Normenreihen kann auf verschiedene Art und Weise sichergestellt werden, dass diese Geräte keine wirksame Zündquelle darstellen.

Die Gerätegruppe II ist unterteilt in die Gerätegruppen IIA, IIB oder IIC, basierend auf der maximalen Normspaltweite oder dem Mindestzündstromverhältnis (MIC-Verhältnis) der jeweiligen explosionsfähigen Atmosphäre. Wasserstoff gehört aufgrund seiner sehr kleinen Normspaltweite bzw. dem sehr geringen MIC-Verhältnis zur Gerätegruppe

IIC, in der die höchsten konstruktiven Anforderungen an ein sicheres Gerät zu erfüllen sind. Abschließend muss auch die maximale Oberflächentemperatur der Geräte berücksichtigt werden. Wasserstoff hat eine Zündtemperatur von 560 °C, was der Temperaturklasse T1 der Geräte entspricht. Die Kennzeichnung der Geräte muss neben der Gerätegruppe, der Gerätekategorie und dem Geräteschutzniveau auch die Temperaturklasse angeben.

Die Vermeidung explosionsfähiger Atmosphären kann man durch natürliche oder technische Lüftung unterstützen. Ein sehr wichtiges Konzept ist die Überwachung der Wasserstoffkonzentration durch geeignete Gaswarngeräte. Entsprechend den Vorgaben an den sicheren Betrieb können so schon bei Wasserstoffkonzentrationen deutlich unterhalb der unteren Explosionsgrenze entsprechende Gegenmaßnahmen zur Vermeidung einer Explosion eingeleitet werden.

Aufgrund der hohen Verbrennungsgeschwindigkeit der Wasserstoff/Luft-Gemische finden für dieses Gas Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken, aufgrund der hohen Anforderungen und Kosten nur sehr eingeschränkt Anwendung. Flammensperren werden in Wasserstoffleitungen verwendet, um einen Flammendurchtritt sicher zu verhindern.

Der klassische Explosionsschutz ist auf atmosphärische Bedingungen begrenzt. Wasserstoffanwendungen werden jedoch oft mit höherem Druck, niedrigerer Temperatur oder gar mit höherem Sauerstoffgehalt als in atmosphärischer Luft betrieben. In diesem Fall reichen die genormten Konzepte oft nicht aus und es sind weitergehende Sicherheitsbetrachtungen unter Beachtung der geänderten Kenngrößen [8] notwendig.

6 Gesetze, Verordnungen, Normen und Regelwerke

Es gibt eine Vielzahl von europäischen Richtlinien und Verordnungen, nationalen Gesetzen und Verordnungen sowie technischen Regelwerken und Normen, die bei Errichtung, Inbetriebnahme und Betrieb von Wasserstoffherstellungsanlagen sowie dem allgemeinen Umgang mit Wasserstoff berücksichtigt werden müssen. Die wesentlichen Vorschriften sind in Abb. 5 dargestellt [46].

Mit Blick auf die Sicherheit gibt es drei Pfade zu betrachten:

- Anforderungen an den Arbeitsschutz
- Anforderungen an die Produktsicherheit
- Grundlegende Eigenschaften von Wasserstoff und der Umgang damit

Tabelle 3. Einteilung der Gerätegruppe II für brennbare Gase und Dämpfe.

| Gerätegruppe | Gerätekategorie | Geräteschutzniveau |
|---|--|--------------------|
| Gruppe II Anlagen in Bereichen außerhalb des Bergbaus | 1G Geräte müssen selbst bei selten auftretenden Gerätestörungen das erforderliche Maß an Sicherheit gewährleisten, einsetzbar in Zone 0,1 und 2 | Ga |
| | 2G Geräte müssen selbst bei selten auftretenden Gerätestörungen das erforderliche Maß an Sicherheit gewährleisten, einsetzbar in Zone 1 und 2 | Gb |
| | 3G Geräte müssen im Normalbetrieb das erforderliche Maß an Sicherheit gewährleisten, einsetzbar in Zone 2 | Gc |

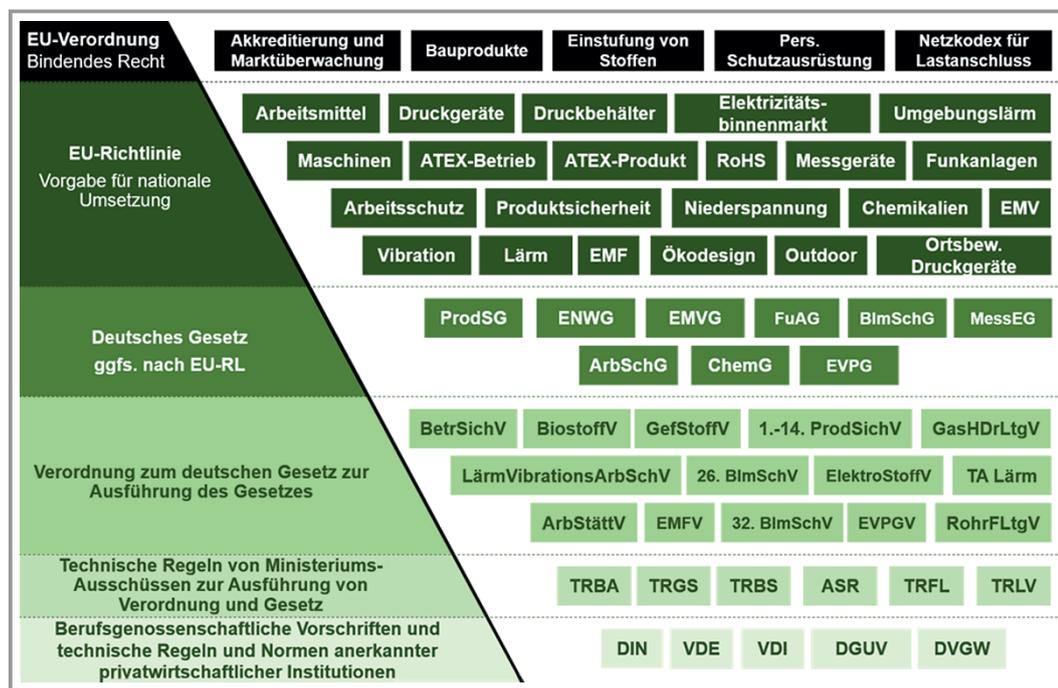


Abbildung 5. Überblick über technische Normen, nationale und internationale Gesetze und Verordnungen bzgl. Wasserstoffsicherheit [45].

6.1 Arbeitsschutz

Das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) stellt die Grundlage für den technischen Arbeitsschutz dar. Es setzt die EU-Richtlinie 89/391/EWG [47] in deutsches Recht um und fordert, dass der Arbeitgeber Gefährdungen, die im Zusammenhang mit der Arbeit auftreten können, im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung ermittelt. Um die Gefahren für die Beschäftigten auf ein Mindestmaß zu reduzieren, sind basierend darauf entsprechende Schutzmaßnahmen zur Verhütung von Unfällen und arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren abzuleiten und umzusetzen. Dabei sind nach § 4 ArbSchG der Stand der Technik, der Arbeitsmedizin und der Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen.

Dem ArbSchG sind verschiedene Verordnungen unterlagert, in denen die allgemeinen Anforderungen des ArbSchG weiter spezifiziert werden und die ebenfalls EU-Richtlinien in nationales Recht umsetzen. Hierzu zählen beispielsweise die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV). Sie werden durch Ergänzungen, Erläuterungen und Beispiele im Rahmen von technischen Normen weiter präzisiert. Die Zusammenhänge zwischen ArbSchG und den Verordnungen, technischen Regeln und EU-Richtlinien werden in [46] detailliert beschrieben.

6.2 Produktsicherheit

Der Hersteller eines Produkts hat vor allem zu gewährleisten, dass das Produkt den einschlägigen EU-Richtlinien und

EU-Verordnungen entspricht und dadurch die Sicherheit und Gesundheit des Anwenders (oder Dritter) nicht gefährdet werden. Ein Produkt im Sinne des Produktsicherheitsgesetzes (ProdSG) darf erst auf dem Markt bereitgestellt oder für die erstmalige Verwendung zur Verfügung gestellt werden, wenn die Vorgaben des ProdSG sowie der einschlägigen Produktsicherheitsverordnungen (ProdSV) bzw. EU-Richtlinien und EU-Verordnungen erfüllt sind und dadurch sichergestellt ist, dass keine Gefahr für die Sicherheit und Gesundheit der Personen besteht, die das Produkt bestimmungsgemäß oder vorhersehbar verwenden. In diesem Sinne setzt das ProdSG die Produktsicherheitsrichtlinie 2001/95/EG [48] in nationales Recht um. Entsprechend § 8 ProdSG sind eine Reihe von Verordnungen erlassen worden (ProdSVen), die wiederum europäische Vorgaben in deutsches Recht umsetzen. Fällt das Produkt in den Anwendungsbereich einer oder mehrerer dieser ProdSVen, sind die dortigen Anforderungen zu erfüllen. Die Zusammenhänge zwischen ProdSG, unterlagerten ProdSVen und den jeweiligen EU-Richtlinien und EU-Verordnungen sind detailliert in [46] dargestellt.

6.3 Allgemeine Anforderungen an die Wasserstoffsicherheit

Wasserstoff wird bereits seit Jahrzehnten u.a. in der chemischen Industrie und der Luftfahrt eingesetzt. Das Thema der Wasserstoffsicherheit ist demnach nicht neu und es bestehen viele Regelwerke hierzu. In der ISO TR 15916 [15] werden beispielsweise die grundlegenden Eigenschaften von

Wasserstoff beschrieben sowie Hinweise auf seine Gefahren und Empfehlungen zu Sicherheitsmaßnahmen beim Umgang mit gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff gegeben.

Bisher wurde Wasserstoff insbesondere im industriellen Umfeld oder der Raumfahrt eingesetzt. Durch die Entwicklungen der letzten Jahre zur Realisierung der Energiewende und der damit verbundenen Umsetzung der nationalen Wasserstoffstrategie findet der Wasserstoff zunehmend Wege in neue Anwendungsgebiete und in das Umfeld privater Nutzer. Um diese Entwicklungen technisch sicher zu begleiten, sind Anpassungen der bestehenden Regelwerke bzw. die Entwicklung neuer technischer Regeln und Normen notwendig.

Für einige Wasserstoffanwendungen bestehen bereits diverse technische Regelwerke, z. B. für die Wasserstoffherzeugung [49, 50], für Wasserstoff im Straßenverkehr (als Kraftstoff [51], [52], an Tankstellen [53], zur Sicherheit [54]) und in Landfahrzeugen [55–57]. Weitere Normen zu Wasserstoff-Anwendungen, wie z. B. für Bahnen oder Schiffen sind derzeit in Arbeit.

Zum inländischen Transport von Wasserstoff bestehen derzeit zwei Möglichkeiten: in Trailern über die Straße oder über Gasleitungen (siehe hierzu auch Abschn. 3.1). Um den leitungsgebundenen Transport zur Versorgung der Allgemeinheit mit Wasserstoff zu ermöglichen, soll das bestehende Erdgasnetz entsprechend umgebaut werden. Projekte insbesondere zu der Frage der Komponenten- und Materialverträglichkeit laufen bereits. Auch das hierfür anzuwendende Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) wird derzeit für den Einsatz von Wasserstoff erweitert. Die technische Regel DVGW G 221 liefert einen Leitfaden für die Anwendung des bestehenden DVGW-Regelwerks [58]. Verschiedene Normen befinden sich hierzu in der Überarbeitung bzw. der Erstellung, beispielsweise [59]. Wird der Wasserstoff nicht zur Versorgung der Allgemeinheit transportiert (z. B. zur alleinigen Versorgung eines Industrieparks), findet anstelle des DVGW-Regelwerks die Rohrfernleitungsverordnung [60] Anwendung, die durch die technische Regel für Rohrfernleitungen [61] weiter präzisiert wird.

Neben den anwendungsbezogenen Regelwerken sind auch bei den neu entstehenden Anwendungsgebieten die bestehenden Anforderungen an den Explosionsschutz, die Materialverträglichkeit und die Dichtheit zu erfüllen. Demnach sind die verschiedenen bestehenden Normen und technischen Regeln dahingehend zu überprüfen, ob sie auch diese neuen Anwendungsfelder abdecken. Lücken oder der Bedarf an neuen Normen ist zu ermitteln. Hierzu haben sich die verschiedenen Regelwerksverbände (DIN, DKE, DVGW, NWB, VDA, VDI, VDMA) im Projekt „Normungsroadmap Wasserstofftechnologien“ zusammengeschlossen, welches Anfang 2023 gestartet ist. Ziel ist es, gemeinsam mit Experten aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft einen strategischen Fahrplan zur Erweiterung und Anpassung des technischen Regelwerks zu erarbeiten [62].

7 Weiterentwicklung des Standes der Technik

Der Stand der Technik bezüglich Wasserstoffsicherheit wird durch zielorientierte Forschung und Entwicklung abgestimmt zwischen öffentlicher Seite und der Industrie weiterentwickelt. Die internationale Gesellschaft für Wasserstoffsicherheit HySafe [7] organisiert hierzu seit 2005 jährlich alternierend a) die Internationale Conference for Hydrogen Safety ICHS [63] und b) einen Research Priorities Workshop RPW [64] zur Forschungspriorisierung mit der Unterstützung durch die EC und dem US DoE. Die ICHS gibt Gelegenheit neue Forschungsergebnisse zu präsentieren und zu diskutieren. Die Beiträge werden nach kurzer Karenzzeit nach der Konferenz über einen kostenfreien Zugang veröffentlicht und die wesentlichen Ergebnisse in Revisionen von [14] zusammengefasst. Der RPW dokumentiert den Fortschritt, der hinsichtlich der zuvor priorisierten Themen in der zurück liegenden Periode erreicht wurde, und diskutiert neue Industrie-relevante Themen.

Mit diesen Veranstaltungen bietet HySafe internationalen Aktivitäten – wie zum Beispiel der Safety Task 43 der IEA Hydrogen TCP und der Working Group RCSS der IPHE – geeignete Kommunikationskanäle und Kooperationsplattformen. Damit werden Inkonsistenzen bei der Bewertung von Sicherheitsaspekten vermieden und eine verlässliche, wissenschaftliche Basis für international harmonisierte, performance-basierte Normierung, insbesondere über ISO/IEC und CEN/CENELEC geschaffen.

Um dennoch nationale Besonderheiten berücksichtigen zu können, werden gegenwärtig nationale Gruppierungen formiert, zum Beispiel in Kanada, Australien und in Deutschland über die Allianz Wasserstoffsicherheit. Letztere wird im Wesentlichen durch die Autorengruppe dieses Berichts vertreten.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.



Thomas Jordan ist seit 1989 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am früheren Forschungszentrum Karlsruhe, jetzt Karlsruher Institut für Technologie KIT, tätig. Dort leitet er die Abteilung Wasserstoff des Instituts für Thermische Energietechnik und Sicherheit und koordiniert die Forschungsarbeiten zur Wasserstoffsicherheit. 1994

promovierte er an der Universität Karlsruhe im Fachbereich Maschinenbau. Im Jahr 2001 gründete er ein Spin-off für Data Mining in der Halbleiterindustrie und kehrte 2003 an das KIT zurück, um das EC Network of Excellence for Hydrogen Safety zu koordinieren. Er war Mitbegründer und Vorstandsmitglied der International Association for Hydrogen Safety HySafe. Er vertritt Deutschland in der IEA Hydrogen Safety Task und berät die japanische Atomenergiebehörde beim Aufbau einer nationalen Wasserstoffsicherheitsexpertise. Er ist Mitglied des deutschen Spiegelkomitees des ISO TC 197, seit 2017 berufenes Mitglied des European Hydrogen Safety Panel und seit 2022 Mitglied des Landesbeirats Wasserstoff Baden-Württemberg. Außerdem lehrt er „Wasserstofftechnologie“ und „Hydrogen Safety“ am KIT und dessen postgradualer Hector-School, an der University of Ulster und dem Instituto Technico Buenos Aires. Von 2018 bis 2021 koordinierte er das FCH JU-Projekt PRESLHY zur pränormativen Forschung für die sichere Nutzung von flüssigem Wasserstoff, dessen Ergebnisse in die Aktualisierung des ISO TR 15916 einfließen.



Kai Holtappels koordiniert die Wasserstoff-Aktivitäten der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und ist deren Sprecher des Kompetenzzentrums H2Safety@BAM. Außerdem leitet er die Fachgruppe „Sicherheit von Energieträgern“. In seiner Funktion als Sprecher des Clusters Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige

Markteinführung im Deutschen Forschungsverbund Wasserstoff berät er die Bundesregierung hinsichtlich des Forschungsbedarfs, um den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien erfolgreich zu fördern. Seine wissenschaftlichen Arbeitsgebiete sind Explosions-sicherheit, Explosionsdynamik und konstruktive Maßnahmen zur Begrenzung oder Vermeidung von Explosionsfolgen. Darüber hinaus verfügt er über Expertise bei der Bewertung des Einsatzes von (brennbaren) Gasen in mobilen und stationären Systemen und Anlagen sowie bei den Auswirkungen der Zündung einer durch Gasausbreitung erzeugten explosionsfähigen Atmosphäre. Er verfügt über große Erfahrung in der Durchführung von Sicherheitsprüfungen (zerstörend und zerstörungsfrei) in realem Maßstab.



Enis Askar ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der BAM in der Fachgruppe „Sicherheit von Energieträgern“. Seit 2020 arbeitet er hauptsächlich im Bereich Prozess- und Anlagensicherheit (ProSafe) des Kompetenzzentrums H2Safety@BAM. Er vertritt die BAM in der International Association for Hydrogen Safety HySafe und ist

Mitglied des deutschen Spiegelkomitees des ISO TC 197. Seine Forschungsschwerpunkte sind Explosionsschutz, sicherheitsrelevante Eigenschaften von Gasen und experimentelle Explosionsstudien. Dr. Askar studierte Wirtschaftsingenieurwesen im Fachbereich Technische Chemie an der Technischen Universität Berlin. Er promovierte über sicherheitstechnische Eigenschaften von Gasen am Institut für Chemie- und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Berlin.



Manuela Jopen promovierte 2013 an der Universität Bonn. Seit 2013 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der GRS, seit 2021 als Referentin der Geschäftsführung. Sie ist u.a. verantwortlich für die Koordination von Aufgaben, die nicht dem klassischen nuklearen Arbeitsfeld der GRS entsprechen. Hierzu zählt auch die Wasserstoff-Sicherheit. Sie ist Mitglied im Fachausschuss „Wasserstoff und Brennstoffzellen“ des VDI. Außerdem arbeitet sie an der Richtlinie 4635 „Power to X“ mit, im Rahmen dessen sie die Gruppe „Genehmigung von Power-to-X-Anlagen“ leitet. Von 2018 bis 2020 war sie Verbundkoordinatorin des Vorhabens „PORTAL GREEN“ zur Entwicklung von Leitfäden für Planung, Bau und Genehmigung von Power-to-Gas-Anlagen.



Uwe Stoll ist wissenschaftlich-technischer Leiter der GRS. Er wurde am Moskauer Institut für Energietechnik ausgebildet und erwarb einen Abschluss (Dipl.-Ing.) in Kerntechnik. Nach fünfjähriger Tätigkeit in der thermohydraulischen Forschung an der Hochschule Zittau kam er zu Siemens/KWU. In den 25 Jahren, in denen er in verschiedenen Positionen in der Industrie tätig war (u.a. Projektingenieur, Inbetriebnahmeleiter, Projektleitung, Geschäftsführung usw.), lag sein Hauptaugenmerk immer auf der nuklearen Sicherheit. Er war mehr als 10 Jahre Mitglied (2 Jahre als Leiter) des Lenkungsausschusses des deutschen Kerntechnischen Ausschusses (KTA). Er ist Mitglied der deutschen Reaktorsicherheitskommission und Leiter der Untergruppe „Elektro- und Leittechnik“ sowie Präsident des European Technical Safety Organization Network - ETSO.



Michael Beyer leitet den Fachbereich „Grundlagen des Explosionsschutzes“ an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Als ehemaliger Vorsitzender des IEC Subcommittees 31M (Non-electrical equipment and protective systems for explosive atmospheres) und Vorsitzender des nationalen Spiegelgremiums, dem Fachbereich Brand- und Explosionsschutz im DIN Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG) begleitet er die Weiterentwicklung der Normenreihen IEC 60079 und ISO/IEC 80079 (Explosionsschutz). Seine Forschungsschwerpunkte sind Kenngrößen des Explosionsschutzes, physikalische Zündvorgänge, Explosionsvorgänge bei nichtatmosphärischen Bedingungen und Wasserstoffsicherheit. Er ist Lehrbeauftragter der Otto-von Guericke-Universität u.a. im Studiengang „Process Safety and Environmental Engineering“.



Detlev Markus leitet den Fachbereich „Explosionsschutz in der Energietechnik“ an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Zudem ist er stellvertretender Leiter des Sektors Explosionsschutz und Schussgeräte der Konformitätsbewertungsstelle der PTB, die zuständig ist für Konformitätsbewertungen von explosionsgeschützten Geräten nach der Europäischen Richtlinie 2014/34/EU (ATEX) und dem IECEx-System. Als Mitglied des Technical Committee 31 (TC 31) arbeitet er mit bei der Erstellung und Aktualisierung der IEC-Normenreihen IEC 60079 (elektrischer Explosionsschutz). Sein Forschungsschwerpunkt ist die Untersuchung sicherheitsrelevanter Zündprozesse. Seit 2023 koordiniert er die Arbeiten der DFG-Forschungsgruppe FOR5507 „ExRef: Explosionsgefahren von Kältemitteln mit geringem Treibhauspotenzial“.



Ernst-Arndt Reinecke promovierte an der RWTH Aachen im Jahr 1999 und setzte seine Forschungsarbeiten zu katalytischen Wasserstoffrekombinatoren als Helmholtz-Nachwuchswissenschaftler am Forschungszentrum Jülich im Bereich der nuklearen Sicherheitsforschung fort, seit 2002 als Gruppenleiter „Wasserstoffsicherheit“. Im

Jahr 2017 übernahm er die Leitung der Abteilung „Sicherheitsforschung“ am IEK-6, die sich mit wissenschaftlichen Fragestellungen zu Containmentphänomenen und -prozessen bei schweren Unfällen in Leichtwasserreaktoren befasst. In seiner beruflichen Laufbahn war Dr. Reinecke an zahlreichen nationalen und internationalen Projekten der Reaktor- und Wasserstoff-Sicherheitsforschung beteiligt. Er vertrat das Forschungszentrum als Gründungsmitglied der International Association HySafe im Jahr 2009 und ist seit 2018 Mitglied des European Hydrogen Safety Panels der Europäischen Clean Hydrogen Partnership.



Ulrich Krause studierte Strömungsmechanik und Thermodynamik an der TU Dresden und forscht seit mehr als 30 Jahren über Brand- und Explosionsschutz. Seit 2011 hat er den Lehrstuhl für Anlagentechnik und Anlagensicherheit an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg inne. Seine Interessengebiete sind Explosionsverhalten

von Gasen, Stäuben und hybriden Gemischen, Sicherheit elektrochemischer Energiespeicher und Simulationsmethoden in der Anlagensicherheit.

Abkürzungen

| | |
|-------|--|
| AIT | Mindestzündtemperatur |
| ATEX | Explosive Atmosphäre |
| BLEVE | Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion; Dampf- und ggf. chemische Explosion initiiert durch Druckbehälterversagen |
| DDT | Detonationsumschlag |
| DIN | Deutsche Industrienorm |

| | |
|-----------|--|
| DVGW | Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches |
| EHSP | European Hydrogen Safety Panel |
| ELVHYS | Enhancing Liquid and Vapourised HYdrogen Safety |
| EN | Europäische Norm |
| HIAD | Hydrogen Incident and Accident Database |
| IA HySafe | International Association for Hydrogen Safety HySafe |
| ISO | International Standardisation Organisation |
| LH2 | Flüssigwasserstoff |
| LNG | Flüssiges Erdgas |
| LOC | Sauerstoffgrenzkonzentration |
| LPG | Flüssiggas |
| MESG | Grenzspaltweite |
| MIC | Zündstromverhältnis |
| MIE | Mindestzündenergie |
| MLI | Multi Layer Insulation |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| OEG | Obere Explosionsgrenze |
| PRESLHY | Pre-normative REsearch for the Safe use of Liquid HYdrogen |
| UEG | Untere Explosionsgrenze |
| US DoE | United States Department of Energy |

Literatur

- [1] *Working Paper National Hydrogen Strategies*, World Energy Council, London **2021**. www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-on-the-horizon-national-hydrogen-strategies (Accessed August 31, 2023)
- [2] *Infoposter: Wasserstoffstrategien der Bundesländer und Bedeutung ausgewählter Innovationscluster für die Gestaltung der Energiewende*, VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin **2022**. <https://vdivde-it.de> (Accessed August 31, 2023)
- [3] *Die Nationale Wasserstoffstrategie*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin **2020**. www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html (Accessed August 31, 2023)
- [4] P. Arndt, *Norddeutsches Reallabor NRL - Transformation & Gesellschaft: Ein Stimmungsbild - Studie zur Energiewende und der Akzeptanz von Wasserstoff*, Hamburg **2022**.
- [5] W. Konrad, R. Kuhn, S.-K. Wist, B. Witzel, *Einstellungen in Deutschland zu Wasserstofftechnologien: Ergebnisse von Repräsentativbefragungen in der Übersicht*, Stuttgart **2021**. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-72417-8> (Accessed August 31, 2023)
- [6] *Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems - Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation*, National Aeronautics and Space Administration NASA, Washington **2005**.
- [7] <https://hysafe.info/> (Accessed August 31, 2023)
- [8] *CHEMSAFE - Database for Safety Characteristics in Explosion Protection*, Version 08/2023, PTB und BAM. www.chemsafe.ptb.de (Accessed August 31, 2023)
- [9] M. Hattwig, H. Steen, *Handbook of Explosion Prevention and Protection*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim **2004**.
- [10] E. Askar, T. Grunewald, *Entzündung von wasserstoffhaltigen Atmosphären durch mechanisch erzeugte Funken („HySpark“)*, Forschungsbericht Vh2121, BAM, Berlin **2023**.

- [11] W. Kaneko, K. Ishii, An experimental study on the mechanism of self-ignition of high-pressure hydrogen, *Int. J. Hydrogen Energy* **2017**, *42*, 7374–7379.
- [12] TRGS 723: *Gefährliche explosionsfähige Gemische – Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Gemische*, **2020**.
- [13] M. A. Nettleton, *Gaseous Detonations*, Springer, Dordrecht **1987**.
- [14] *Hydrogen Safety for Energy Applications: Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards* (Eds: A. Kotchourko, T. Jordan), Butterworth-Heinemann, Oxford **2022**.
- [15] ISO TR 15916:2015-12, *Grundsätzliche Betrachtungen zur Sicherheit von Wasserstoffsystemen*, Beuth Verlag, Berlin **2015**.
- [16] E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden, *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP*, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg **2018**.
- [17] B. Lewis, G. von Elbe, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 3rd ed., Academic Press **2012**.
- [18] B. E. Poling, J. M. Prausnitz, J. P. O'Connell, *The Properties of Gases and Liquids*, 5th ed., McGraw-Hill, New York **2001**.
- [19] R. R. Barth, K. L. Simmons, C. W. San Marchi, *Polymers for Hydrogen Infrastructure and Vehicle Fuel Systems: Applications, Properties, and Gap Analysis*, Sandia National Laboratories Report, Albuquerque **2013**.
- [20] J. Wen, M. Marono, P. Moretto, E. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, E. Vyazmina, D. Melideo, Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database, *Int. J. Hydrogen Energy* **2022**, *47* (38), 17082–17096. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.170>
- [21] <https://h2tools.org/> (Accessed on August 31, 2023)
- [22] *Fukushima Daiichi, 11. März 2011 – Unfallablauf und Radiologische Folgen*, 5. Auflage, GRS-S 56, GRS gGmbH **2016**.
- [23] M. Kuznetsov, A. Lelyakin, W. Breitung, Numerical simulation of radiolysis gas detonations in a BWR exhaust pipe and mechanical response of the piping to the detonation pressure loads, in *Numerical simulations – Examples and applications in computational fluid dynamics*, InTech, London **2010**.
- [24] www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp (Accessed August 31, 2023)
- [25] www.sandia.gov/matlstechref/ (Accessed August 31, 2023)
- [26] J. Xiao, J. R. Travis, W. Breitung, Hydrogen release from a high pressure gaseous hydrogen reservoir in case of a small leak, *Int. J. Hydrogen Energy* **2011**, *36* (3), 2545–2554. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.069>
- [27] J. E. Hall, P. Hooker, L. O'Sullivan, B. Angers, A. Hourri, P. Bernard, Flammability profiles associated with high-pressure hydrogen jets released in close proximity to surfaces, *Int. J. Hydrogen Energy* **2017**, *42* (11), 7413–7421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.113>
- [28] M. R. Swain, P. A. Filoso, M. N. Swain, An experimental investigation into the ignition of leaking hydrogen, *Int. J. Hydrogen Energy* **2007**, *32* (2), 287–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.06.041>
- [29] M. Royle, D. B. Willoughby, Consequences of catastrophic releases of ignited and unignited hydrogen jet releases, *Int. J. Hydrogen Energy* **2011**, *36* (3), 2688–2692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.141>
- [30] V. Molkov, J.-B. Saffers, Hydrogen jet flames, *Int. J. Hydrogen Energy* **2013**, *38* (19), 8141–8158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.106>
- [31] A. Molina, R. W. Schefer, W. G. Houf, Radiative fraction and optical thickness in large-scale hydrogen-jet fires, *Proc. of the Combustion Institute* **2007**, *31* (2), 2565–2572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.060>
- [32] A. Friedrich, J. Grune, K. Sempert, M. Kuznetsov, T. Jordan, Hydrogen combustion experiments in a vertical semi-confined channel, *Int. J. Hydrogen Energy* **2019**, *44* (17), 9041–9049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.098>
- [33] J. W. Leachman, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, E. W. Lemmon, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **2009**, *38*, 721–748.
- [34] *Pre-normative Research for the Safe Use of Liquid Hydrogen*, Research and Innovation Action Supported by the FCH JU – Grant Agreement No 779613. <https://www.preslhly.eu> (Accessed August 31, 2023)
- [35] www.sintef.no/projectweb/sh2ift/ (Accessed August 31, 2023)
- [36] K. Verfondern, B. Dienhart, Experimental and theoretical investigation of liquid hydrogen pool spreading and vaporization, *Int. J. Hydrogen Energy* **1997**, *22* (7), 649–660. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(96\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(96)00204-2)
- [37] T. Jordan, L. Bernard, D. Cirrone, S. Coldrick, A. Friedrich, S. Jallais, M. Kuznetsov, C. Proust, A. G. Venetsanos, J. Wen, *Results of the Pre-normative Research Project PRESLHY for the Safe Use of Liquid Hydrogen*, International Conference on Hydrogen Safety (ICHS), **2021**.
- [38] K. Habib, M. Kluge, K. van Wingerden, *Experimental investigation of the consequences of release of liquified hydrogen onto and under water*, 14th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Braunschweig **2022**.
- [39] K. van Wingerden, M. Kluge, A. K. Habib, F. Ustolin, N. Paltrinieri, Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquified hydrogen, *Chem. Eng. Trans.* **2022**, *90*, 547–552.
- [40] *ELVHYS – Enhancing safety of liquid and vaporised hydrogen transfer technologies in public areas for mobile applications*. <https://elvhs.eu> (Accessed August 31, 2023)
- [41] W. Gleißner, *Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen*, 2. Auflage, Vahlen Verlag, München **2011**.
- [42] DIN EN 61882:2017-02: *HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien): Anwendungsleitfaden*, Beuth-Verlag, Berlin **2017**.
- [43] C. Mansilla et al., *Hydrogen Applications: Overview of the Key Economic Issues and Perspectives*, in: *Hydrogen Supply Chains*, 271–292, Elsevier, Amsterdam **2018**.
- [44] Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1999 über die Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden.
- [45] Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.
- [46] PORTAL GREEN, *Technischer Leitfaden für Power-to-Gas-Anlagen – Errichtung, Inbetriebnahme und Betrieb*, GRS-S-59, Band 2, **2020**. www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-s-59-band-2-portal-green-technischer-leitfaden-fuer-power-gas-anlagen (Accessed August 31, 2023)
- [47] Europäische Richtlinie über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit vom 12.06.1989, 89/391/EWG, 11.12.2008.
- [48] Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die allgemeine Produktsicherheit, 2001/95/EG, 03.12.2001.
- [49] ISO 22734:2019-09, *Wasserstoffherzeuger auf der Grundlage der Elektrolyse von Wasser – industrielle, gewerbliche und häusliche Anwendungen*, Beuth-Verlag, Berlin **2019**.

- [50] ISO 16110-1:2007-03, *Wasserstoffherzeuger auf der Grundlage von Brennstoffspaltungsverfahren*, Teil 1: Sicherheit, Beuth-Verlag, Berlin **2007**.
- [51] ISO 14687:2019-11, *Beschaffenheit von Wasserstoff als Kraftstoff – Spezifizierung des Produkts*, Beuth-Verlag, Berlin **2019**.
- [52] DIN EN 17124:2022-12, *Wasserstoff als Kraftstoff – Produktfestlegung und Qualitätssicherung für Wasserstoffbetankungsanlagen zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs – Protonenaustauschmembran (PEM)-Brennstoffzellenanwendungen für Fahrzeuge*, Beuth-Verlag, Berlin **2022**.
- [53] ISO 19880-Reihe, *Gasförmiger Wasserstoff – Betankungsanlagen/ Tankstellen*, Beuth-Verlag, Berlin **2020**.
- [54] ISO 23273:2013-06, *Brennstoffzellenfahrzeuge - Sicherheitspezifikation – Schutz vor Gefahren resultierend aus dem im Fahrzeug integrierten Treibstoffsystem für komprimierten Wasserstoff*, Beuth-Verlag, Berlin **2013**.
- [55] ISO 13984:1999-03, *Flüssigwasserstoff - Schnittstelle für die Betankung von Landfahrzeugen*, Beuth-Verlag, Berlin **1999**.
- [56] ISO 13985:2006-10, *Flüssigwasserstoff – Kraftstofftanks für Landfahrzeuge*, Beuth-Verlag, Berlin **2006**.
- [57] ISO 19881:2018-10, *Gasförmiger Wasserstoff - Kraftstofftanks für Landfahrzeuge*, Beuth-Verlag, Berlin **2018**.
- [58] DVGW G. 221:2021-12, *Leitfaden für die Anwendung des DVGW-Regelwerks auf die leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit wasserstoffhaltigen Gasen und Wasserstoff*, **2021**.
- [59] DIN EN 17928-3:2023-06, *Gasinfrastruktur – Einspeiseanlagen – Teil 3: Spezifische Anforderungen für die Einspeisung von Wasserstoff*, Entwurf, **2023**.
- [60] *Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen (Rohrfernleitungsverordnung)*, Stand 19.06.**2020**.
- [61] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, *Technische Regel für Rohrfernleitungen (TRFL) nach § 9 Absatz 5 der Rohrfernleitungsverordnung*, Stand 07.06.**2017**.
- [62] www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/wasserstoff/normungsroadmap-wasserstoff (Accessed August 31, 2023)
- [63] <https://hysafe.info/activities/ichs/> (Accessed August 31, 2023)
- [64] <https://hysafe.info/activities/research-priorities-workshops/> (Accessed August 31, 2023)

DOI: 10.1002/cite.202300141

Stand der Kenntnisse und Technik bezüglich Wasserstoffsicherheit

Thomas Jordan*, Enis Askar, Kai Holtappels, Sabine Deeg, Manuela Jopen, Uwe Stoll, Ernst-Arendt Reinecke, Ulrich Krause, Michael Beyer, Detlev Markus

Review Article: In diesem Überblicksartikel zum Stand der Technik hinsichtlich Wasserstoffsicherheit werden von den Eigenschaften des Wasserstoffs und dessen unfallrelevanten Verhalten bis hin zu Normen und Regulatorik alle wichtigen Themen zur Sicherheit kurz besprochen.

