

Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff



KIT
Prof. Dr. Thomas Jordan
thomas.jordan@kit.edu

FZ Jülich
Dr. Ernst-Arndt Reinecke
e.-a.reinecke@fz-juelich.de

Einleitung

Sicherheit spielt bei der Einführung neuer Technologien eine besondere Rolle und ist notwendige Voraussetzung für gesellschaftliche Akzeptanz. Versteht man Sicherheit als Freiheit von nicht akzeptierten Risiken, spaltet sich die Aufgabe der Gewährleistung eines ausreichenden Maßes an Sicherheit in einen technischen und einen gesellschaftlichen Teil. Zunächst müssen die technischen Risiken als Produkt von potenziellem Schaden und Eintrittswahrscheinlichkeit aller möglichen Unfallszenarien bestimmt werden. Dann stellt sich die etwas schwierigere Frage, ob diese Risiken akzeptabel sind. Von der Gesellschaft selbst hängt es hier ab, inwieweit Grenzen für die Akzeptanz formal, d.h. rechtlich niedergelegt sind, und ob auch individuelle Wahrnehmung Entscheidungen mit gesellschaftlicher Tragweite beeinflussen dürfen.

Geschichtlich gibt es einige Beispiele, bei denen spektakuläre Unfälle das Ende der akzeptierten Nutzung der mit ihnen verbundenen Technologie einläuteten. Der Unfall mit dem Luftschiff Hindenburg und der kerntechnische Unfall in Fukushima sind solche Ereignisse, die im Zusammenhang mit Wasserstoff stehen. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten solcher Unfälle können insbesondere für neue Technologien und der nicht vorhandenen relevanten statistischen Basis nur grob geschätzt werden. Zudem sind probabilistische Konzepte in der öffentlichen Kommunikation aufgrund ihrer Fehlinterpretierbarkeit nicht immer hilfreich. Die vorliegende Abhandlung beschränkt sich daher auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Wasserstoff und die technischen Gefährdungspotenziale von Wasserstoff als Energieträger.

Die umfangreichen Erfahrungen, welche die chemische und kerntechnische Industrie, die Industriegas-Unternehmen und die Raumfahrt hinsichtlich sicheren Umgangs mit Wasserstoff oder auch mit Erdgas gemacht haben, stellen eine wichtige Grundlage auch für die Einführung von Wasserstoff als Energieträger dar. So lassen sich viele Grundsätze des gesetzlich geregelten Explosionsschutzes, die sogenannte ATEX, auch recht gut auf Wasserstoff übertragen. Viele der neuen innovativen Anwendungen von

Wasserstoff implizieren jedoch außergewöhnliche Zustände für Wasserstoff, z. B. Drücke bis zu 100 MPa für die Mobilität oder Temperaturen von -250°C für den großskaligen Transport von Flüssigwasserstoff, der auch in Schiffsantrieben, in LKWs oder in Flugzeugen eingesetzt werden soll. Dies stellt Materialien und Technologien vor neue Herausforderungen. Dazu kommt, dass diese Technologien in den avisierten, eher dezentralen Anwendungen von nicht speziell ausgebildeten Endkunden in einer wenig kontrollierten Umgebung und nicht in einem industriellen Umfeld bedient werden sollen. All dies erfordert ein noch breiteres Verständnis des unfallbedingten Verhaltens von Wasserstoff, das Schließen entsprechender Wissenslücken und die Entwicklung oder Anpassung von Sicherheitsnormen.

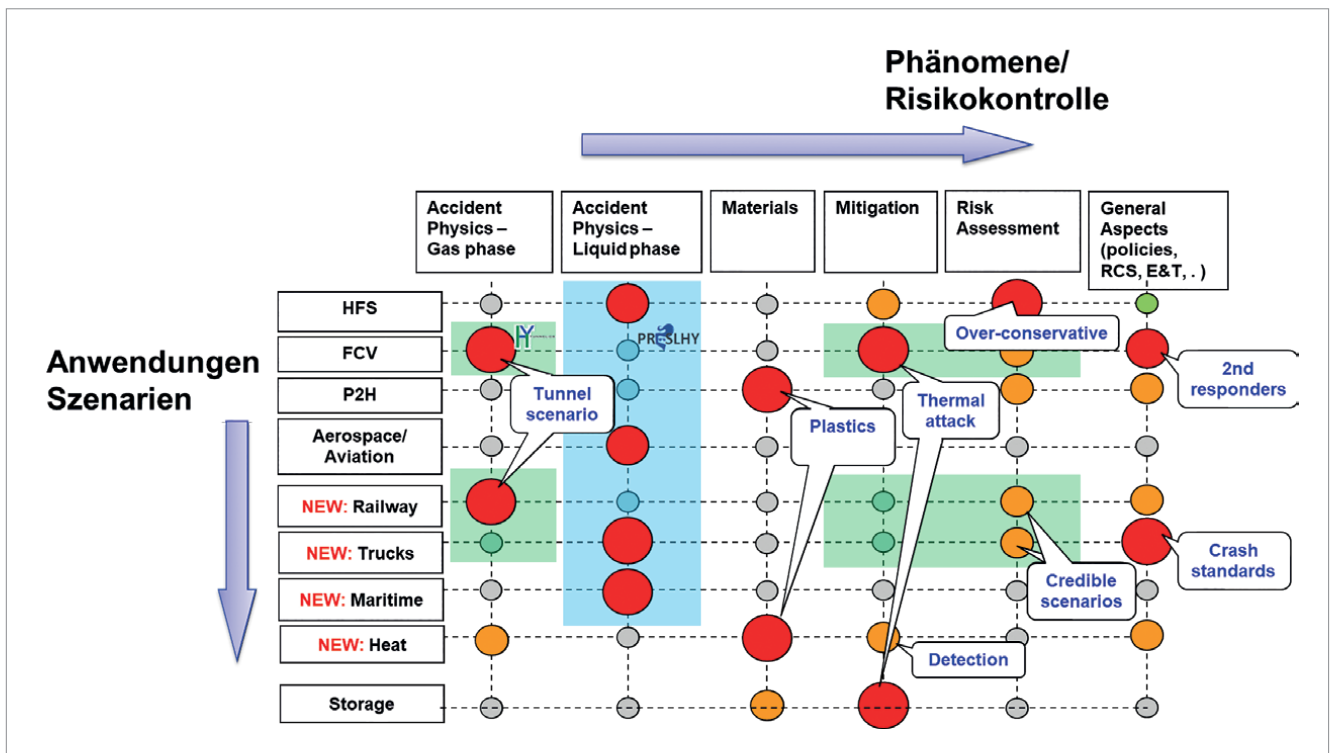
Im Weiteren wird die notwendige Weiterentwicklung des Stands der Technik erläutert.

Koordinierte Entwicklung des Stands der Technik

Die international koordinierte Einführung von Wasserstoff als Energieträger braucht zwingend international harmonisierte Normen. Eine ungleiche Bewertung von Sicherheit steht dieser Harmonisierung im Wege und fördert kaum Vertrauen in die neuen Technologien.

Die Internationale Gesellschaft für Wasserstoffsicherheit HySafe (www.hysafe.info), welche aus dem EU-geförderten Exzellenznetzwerk HySafe hervorging, entwickelt die wissenschaftliche Basis für leistungsorientierte Normen stetig weiter. Dazu werden in einem iterativen Prozess mit einer 2-jährigen Periodizität:

1. der aktuelle Wissenstand und die relevanten Wissenslücken in einem Research Priorities Workshop (RPW) erfasst (geradzahlige Jahre),
2. der Fortschritt hinsichtlich Wasserstoffsicherheit in der International Conference on Hydrogen Safety (ICHS) kommuniziert und diskutiert (ungeradzahlige Jahre) und
3. die Erkenntnisse aus diesem Prozess im Biennial Report bzw. in „Hydrogen Safety for Energy Applications“ [1] zusammengefasst.



Zum RPW werden Teilnehmer aus Forschung, Industrie, Normen entwickelnden Organisationen (Standards Developing Organizations, SDOs) und dem öffentlichen Bereich (z.B. Joint Research Centre der EU (JRC), US DoE) eingeladen. Ca. 40–50 Experten priorisieren dann Themen zur Wasserstoffsicherheitsforschung entlang zweier Koordinaten: (1) Wissensstand hinsichtlich sicherheitsrelevanter Phänomene und (2) Relevanz etwaiger Wissenslücken für aktuelle Anwendungen bzw. Szenarien (► **Abbildung 1**).

Die Ergebnisse der Priorisierung werden in entsprechenden Berichten veröffentlicht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der letzten beiden RPWs zusammengefasst, die im Jahr 2018 in Buxton, Großbritannien [2] und im Jahr 2020 online (<https://hysafe.info/activities/research-priorities-workshops>) durchgeführt wurden. Zudem sind Ergebnisse der Konferenz ICHS2021 (www.ichs2021.com) mit eingearbeitet.

► **Abbildung 1** stellt schon vorab die Priorisierung der Themen mit einem „Ampel-Code“ zusammenfassend dar. Rote gefüllte Kreise bedeuten hohe, orangene mittlere, und grau keine Priorität. Grün gefüllte Kreise kennzeichnen ausreichend bearbeitete Sicherheitsthemen und die farbig hinterlegten Felder zeigen an, dass gegenwärtig hierzu in europäisch geförderten Projekten gearbeitet wird.

Sicherheitsrelevante Phänomene

In Bezug auf die gasförmige Phase wird der vorgemischten Verbrennung höchste Priorität für weitere Untersuchungen eingeräumt. Die Modellierung der Flammenbeschleunigung und des Übergangs von einer Deflagration zu einer Detonation (DDT) sowie der damit verbundenen Druckeffekte für großmaßstäbliche Anwendungen mit Hindernissen und räumlichem Einschluss erfordern weitere Forschungsarbeiten. Hierbei sind auch die Wechselwirkungen mit verschiedenen Sicherheitseinrichtungen – insbesondere Belüftung, Wassersprays, Explosionsentlastungskappen – zu berücksichtigen. Spontane Zündprozesse in realistischen Geometrien müssen besser verstanden werden und statistische Modelle zur Integration in Risikoanalyse-Tools entwickelt werden.

Sehr gut verstanden sind hingegen mittlerweile die thermischen Effekte freier Jetflammen, die bei Freisetzungen unter hohem Druck entstehen können, und die sogenannte Shock Diffusion Ignition in idealisierter Rohr-ähnlicher Geometrie. Hierzu wurden in den vergangenen Jahren wesentliche Beiträge erarbeitet und publiziert.

Zum sicheren Umgang mit kryogenem Wasserstoff hat das EU-Projekt PRESLHY (www.preslhy.eu) in den Jahren 2018 bis 2021 einige wesentliche Erkenntnisse geliefert. Das Freisetzungsverhalten großer Inventare aus Reservoirs mit niedrigem Druck (Flüs-

Abbildung 1

Strukturierung der Forschung zur Wasserstoffsicherheit.

Die Kreise zeigen die Priorisierung der Themen:

rot = hohe Priorität
orange = mittlere Priorität
grün: gelöst

grau = nicht relevant

Die farbigen Felder markieren aktuelle Projekte.

Abbildung 2

Projekt PRESLHY:
KIT E4.4 Pool-
Experiment mit
Zündung über Kiesbett



sigwasserstoff, LH_2) und kleinerer Inventare bei höheren Speicherdrücken (kryo-verdichteter Wasserstoff, CCH_2) wurden sorgfältig analysiert. Die Bildung und das Verhalten kleinerer LH_2 -Pools auf verschiedenen Untergründen und verschiedenen äußeren Bedingungen, insbesondere Wind, wurden analysiert. Das Verdampfen aus dem Pool wie auch das Abbrennen der über dem Pool gebildeten Gas-mischungen waren Gegenstand der Untersuchungen. Beim wiederholten Einbringen von LH_2 auf ein Kiesbett und anschließender Zündung kam es zu einer heftigen Explosion, welche vermutlich durch kondensierte Luft mit verursacht wurde (► *Abbildung 2*).

Zusätzlich wurde die Wechselwirkung von LH_2 mit Wasser – als flüssiger Unterlage unter dem LH_2 -Pool oder als Spray auf dem Pool – untersucht. Flammbeschleunigung und Detonationsumschlag wurden bei Temperaturen bis -190°C untersucht. Niedrigere Temperaturen sind bei Vermischung von 20K kaltem Wasserstoff und umgebungswarmer Luft irrelevant, da solche Gemische nicht brennbar sind.

Bei den weiterhin offenen Fragen für kryogenen oder flüssigen Wasserstoff stehen unfallbedingte Verbrennungsphänomene an erster Stelle. Dies betrifft insbesondere Reaktionen von LH_2 mit eingefrorenem Sauerstoff und die transienten Verbrennungsphänomene in kalten, größeren, inhomogen vorgemischten Systemen mit (Teil-)Einschluss und Verbauung. Bezüglich der Sicherheitseinrichtungen fehlt es an Empfehlungen für Auswahl, Auslegung, Positionierung und Betrieb von an die tiefen Temperaturen angepassten Sensoren, Ventilation, etc. Die Kompatibilität insbesondere nicht-metallischer Materialien sowie die Auslegung von Strukturelementen gegen extreme thermische Spannungen bzw. thermischen Schock verdienen ebenfalls zusätzliche Aufmerksamkeit.

Sicherheitsaspekte relevanter Anwendungen

Elektrolyse

Elektrolyse ist allgemein als der zentrale Prozess zur Produktion von grünem Wasserstoff aus grünem Strom anerkannt. Der notwendige Zuwachs an installierter Leistung impliziert dabei nicht nur eine erhöhte Anzahl von Elektrolyseeinheiten – teilweise in nicht-industrielle Umgebungen – sondern auch neue Größenklassen von Stacks und Modulen. Zusätzlich werden neue Elektrolyseurtechnologien entwickelt, die bei hoher Temperatur und/oder hohem Druck betrieben werden sollen. Daher ist hier die sorgfältige Bewertung von sicherheitstechnischen Fragestellungen von großer Bedeutung.

Historisch gesehen ist die alkalische Elektrolyse zumindest zur Herstellung von Chlor eine weit etablierte und reife Technologie – relativ wenige Unfälle sind bekannt. Unfalldatenbanken wie HIAD2.0, bei denen vor allem Störungen oder Unfälle der Chlorelektrolyse mit Wasserstoff als Nebenprodukt registriert sind, belegen dies. Einerseits ist das im Elektrolyseur selbst vorhandene Inventar an Brenngasen und damit das Gefährdungspotenzial relativ gering. Andererseits sind die Brenngase und Sauerstoff immer in unmittelbare Nachbarschaft und in stöchiometrischen Verhältnissen vorhanden, und werden von relativ starken elektromagnetischen Feldern begleitet. Es empfiehlt sich daher, die breite Erfahrung auf dem Gebiet der Chloralkali-Elektrolyse zu nutzen, die über den Verband Euro Chlor (www.eurochlor.org) verfügbar gemacht wird.

Bei den meisten bekannten Unfällen kommt es in einem zweistufigen Prozess zunächst zu einer lokalen Perforation der Trennmembran, gefolgt von der

katalytisch unterstützten Rekombination des in den Elektrolysekammern gespeicherten Wasserstoffs mit Sauerstoff. Dieser Mechanismus wird als Ursache des bisher größten Unfalls in Ilford, Großbritannien, im Jahr 1975 angesehen [3]. Bei dem jüngsten Unfall mit einem alkalischen Elektrolyseur in Gangneung, Südkorea, im Jahr 2019 wurde der über den sogenannten Cross-Over in den Wasserstoff-Produktstrom übertragene Sauerstoff nicht entfernt. Dazu sind üblicherweise Deoxo-Katalysatoren vorgesehen, die an dieser Anlage nicht installiert waren. Das Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch erreichte – vermutlich aufgrund des nicht richtig abgesicherten Betriebs im Teillastbereich – die Zündgrenze und zündete spontan im Speicherbehälter. Todesfälle und immense Sach- und Gebäudeschäden waren die Folge.

Anhand der Ergebnisse eines speziellen Workshops des European Hydrogen Safety Panel (EHSP) zur Sicherheit der Elektrolyse (www.fch.europa.eu/news/results-fch-ju-workshop-safety-electrolysis) können folgende weitere Forschungsprioritäten abgeleitet werden:

- Das Teillastverhalten von Elektrolyseuren muss hinsichtlich der Auswirkungen auf den Cross-Over untersucht werden. Davon abhängig müssen die Wirksamkeit der Phasentrennung und der Reinigungsstufen untersucht werden.
- Insgesamt müssen sichere Strategien für das Sauerstoff-Management entwickelt werden.
- Hinsichtlich der Materialien müssen die Degradation von Trennmembran und Dichtungen sowie die Stabilität der Strukturmaterialien insbesondere für die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) untersucht werden.

Die Erkenntnisse müssen dann auch in entsprechende Normen (z.B. ISO 22734) und Regulatorik übersetzt werden, wo bis jetzt HTEL oder reversible Technologien nicht berücksichtigt werden und harmonisierte nationale Interpretationen der ATEX-Regulierung (z.B. hinsichtlich der Methodik zum Sicherheitsnachweis oder der anzunehmenden Worst-case-Szenarien) fehlen.

Mobilität / Straßen- und Schienentransport

In diesem Anwendungsbereich hat sich der Fokus von PKW- zu Bus- und LKW-Anwendungen einschließlich dazugehöriger Betankungsinfrastruktur verschoben. Dennoch gibt es im PKW-Bereich offene sicherheitsrelevante Fragestellungen. So führen zum Beispiel innerhalb Europas national stark unterschiedliche sicherheitstechnische Bewertungen bezüglich des Zugangs von Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen zu öffentlichen Parkhäusern zu einer erheblichen Verunsicherung.

Die wissenschaftliche Grundlage für eine Harmonisierung wird mit den Erkenntnissen aus dem EU-Projekt HyTunnel-CS (www.hytunnel.net) wesentlich verbessert. In dem Projekt werden Tunnel-Szenarien und potenzielle Unfallfolgen mit Wasserstoff untersucht, um die Wirksamkeit von konventionellen Brandschutzeinrichtungen (Ventilation, Wasserspray, Löschschäume, etc.) und die Einsatztaktiken von Feuerwehren bei Unfällen mit Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen zu bewerten. Die aus der pränormativen Forschung abgeleiteten Empfehlungen können schließlich als Anhang der Europäischen Tunnelsicherheitsrichtlinie 2004/54/EG in gesetzliche Regelung Eingang finden, sind aber auch auf andere umschlossene räumliche Situationen wie Tiefgaragen übertragbar.



Abbildung 3
**Unfall an einer
 Wasserstofftankstelle
 bei Sandvika,
 Norwegen, 2019**
 (Quelle nrk.no)

Insbesondere bei LKW müssen die Sicherheitsaspekte der noch zu entwickelnden Betankungsprotokolle für recht große Inventare und hohe Transferraten analysiert werden. Die Anwendbarkeit von Crash-Normen, soweit für die LKW-Welt einheitlich verfügbar, sollte auch für Wasserstoff-Tanksysteme überprüft werden. Für die Sicherheitsbewertung von Straßenfahrzeugen allgemein müssen Richtlinien zur Szenarien-Auswahl entwickelt werden. Die bisher dazu eingesetzten Verfahren (z.B. ISO 26262) haben den erweiterten Wirkradius der Gefährdungen ausgehend von Hochdruckspeichern oder größeren, kryogenen Inventaren bisher nur bedingt berücksichtigt. Ein anderer Aspekt hinsichtlich der Methodik ist, inwieweit in Ermangelung einer robusten Datenbasis probabilistische Verfahren verwendet werden können.

Die Absicherung der Tanksysteme gegen Brandlasten und sichere Strategien für First- und Second-Responders müssen weiterentwickelt werden. Ein schlüssiges Konzept für die wiederholte Prüfung der Druckbehälter zur frühzeitigen Detektion von Vorschädigung aufgrund fehlerhafter Betankungen, thermischer Exkursionen oder äußerer Belastungen fehlt. Sicherheit sollte als fester Bestandteil des Designs demonstriert werden, um Vorbehalten insbesondere gegenüber Hochdrucktanks an Bord der Fahrzeuge zu begegnen.

Bei der Betankungsinfrastruktur müssen Überkonservativitäten im Sinne einer Kostenreduktion (ALARP Prinzip) und einer positiveren Risiko-Wahrnehmung reduziert werden. Ein integrales Sicherheitskonzept für Tankstellen, bei dem zum Beispiel alle Messsignale sinnvoll kombiniert zur Beurteilung des sicheren Zustands der Tankstelle genutzt werden, kann ebenfalls dazu beitragen, bei gleichbleibendem oder besserem Sicherheitsniveau die spezifischen Kosten für Sicherheit zu reduzieren. Der Unfall an der Wasserstoff-Tankstelle bei Sandvika in der Nähe von Oslo, Norwegen, im Jahr 2019 (► **Abbildung 3**) hätte bei richtiger Interpretation der aufgezeichneten Druckverläufe in den Hochdruckspeicherbänken in Kombination mit den Betankungsdaten und der Umgebungstemperatur unter Umständen verhindert werden können.

Weitere Prioritäten werden im Verhindern von Kaskaden- oder Dominoeffekten insbesondere beim Design und Betrieb von Tankstellen mit beschränktem Platzangebot gesehen. Die Wirkung von Schutzwänden beim Beaufschlagen mit Wasserstoff-Jetflammen oder entsprechenden Explosionslasten ist in den Normen nicht berücksichtigt. Ebenfalls müssen insbesondere bei LH₂-basierten Tankstellen mit regelmäßiger Belieferung Abblaseleitungen auch für

kryogene Freisetzungen sicher ausgelegt werden. In Bezug auf das Design von Tankkupplungen sowie angesichts heftiger akustischer Emissionen bei der Druckentlastung von Füllschläuchen oder anderen Hochdruckkomponenten besteht der Bedarf einer Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit.

Die Forschungsprioritäten für Bahnanwendungen lassen sich mehr oder weniger aus denen für den Schwerlast-Straßentransport ableiten. Als zusätzliche Gefährdung muss jedoch die nahezu durchgängige Gegenwart von elektrischer Hochspannung berücksichtigt werden.

Maritime Anwendungen und Luftfahrt

Der Einsatz von Wasserstoff in der Schiff- und Luftfahrt stellt aufgrund der anspruchsvollen Umgebungsbedingungen und des geringen Raumangebots besondere Herausforderungen für ein sicheres Design und für den sicheren Betrieb dar. Zudem gibt es für beide Anwendungsbereiche spezielle normative bzw. regulative Umgebungen, welche die besonderen Sicherheitsanforderungen an Hersteller und Betreiber vermitteln. Der hohe Energiebedarf und die zumindest für die Luftfahrt notwendige Gewichtsminimierung lassen in beiden Anwendungsfeldern Flüssigwasserstoff als bevorzugte Speichervariante erscheinen. Dies impliziert, dass die zuvor aufgeführten Prioritäten für LH₂ auch für diese Anwendungen relevant sind. So ist in beiden Anwendungsfeldern die Auslegung von geeigneten Sicherheitsventilen und die Ventilierungsstrategie von Boil-off-Inventaren von sicherheitstechnischer Bedeutung. Dabei sollten zusätzlich Brandlasten und der Verlust der thermischen Isolierung berücksichtigt werden.

Insbesondere für maritime Anwendungen müssen tolerierbare Drucklasten auf Personen und Strukturen – unter Umständen deutlich oberhalb der für andere Anwendungen zulässigen Werte – festgelegt werden. Zudem müssen größere Freisetzungsraten in umschlossenen Räumen sicherheitstechnisch bewertet und gegebenenfalls geeignete Gegenmaßnahmen entwickelt werden. Die räumliche Situation verlangt nach einer entsprechenden Reduktion von Überkonservativitäten.

Bei den Luftfahrtanwendungen spielt insbesondere die Machbarkeit und Sicherheit leichter, nicht-metallischer Werkstoffe für Tanksysteme eine große Rolle. Sichere, schnelle Füll- sowie Abblaseprozeduren, letztere auch unter Flugbedingungen, müssen entwickelt und sicherheitstechnisch bewertet werden.

Anwendung im Wärmesektor

Hinter der Anwendung von Wasserstoff als Brenngas stehen die Zumischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz und der Transport und das Verteilen von reinem Wasserstoff in dedizierten Leitungen. Diese Anwendungen finden zunehmend industrielles Interesse, da sie nahezu unmittelbar auf vorhandene Erdgas-Infrastrukturen aufsetzen können.

Von höchster Priorität wird hier die Entwicklung von Prüfstrategien und Sensoren zum frühen Feststellen von Leckagen in Gebäuden und unterirdischen Leitungen gesehen. Hierbei steht nach wie vor die Frage bezüglich Odorierung (Hinzufügen von Riechstoffen) und der Kompatibilität mit Niedertemperatur-Brennstoffzellen im Raum, während die vorrangig für stationäre Anwendungen eingesetzten Hochtemperaturbrennstoffzellen tolerant gegenüber den gegenwärtig für Erdgas genutzten Odorierungsmitteln sind. Bei einem Verzicht auf Odorierung fehlt ein wesentliches Element des gegenwärtigen Schutzkonzepts. Alternative Verfahren zur Visualisierung von Leckagen, wie sie gegenwärtig bei Pipelines genutzt werden, sollten ebenfalls hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für Wasserstoff-Pipelines untersucht werden. Für die Zumischung von Wasserstoff in Erdgas fehlen konsistente Einmischungsstrategien, die hohe Gradienten in den Gasmischungsqualitäten an den Entnahmepunkten reduzieren können, die ein potenzielles Sicherheitsrisiko darstellen können.

Bezüglich des Materials stellt sich insbesondere die Frage der Kompatibilität von Kunststoffen, wie sie vermehrt im Verteilnetz zum Einsatz kommen. Geeignete, harmonisierte Testprotokolle zur Bestimmung von Versprödung, Ermüdung, Langzeiteffekten etc. fehlen. Gleiches gilt für Zertifizierungsstandards für Komponenten wie Ventile, Verdichter, Messkomponenten etc.

Obwohl es erste Untersuchungen zu auftretenden Verunreinigungen insbesondere beim Umrüsten von Leitungen auf Wasserstoff gibt, müssen hier noch die Auswirkungen auf die an das Netz angeschlossenen Anwendungen, z.B. Brenner untersucht und ggf. europäisch harmonisierte Empfehlungen abgeleitet werden.

Zusammenfassung

Trotz umfangreicher und jahrzehntelanger Erfahrung im industriellen Umgang mit Wasserstoff stellen neue innovative Anwendungen von Wasserstoff in nicht-industrieller Umgebung und bei nicht speziell ausgebildeten Endkunden besondere Anforderungen an die Wasserstoffsicherheit. Aufgrund weltweiter Trends zur sektorübergreifenden Einführung von Wasserstoffanwendungen sind einheitliche Sicherheitsbewertungen und international harmonisierte Normen und Regelwerke zwingend erforderlich. Die von der Internationalen Gesellschaft für Wasserstoffsicherheit HySafe koordinierte Entwicklung des Stands der Technik liefert hierzu seit vielen Jahren bedeutende Beiträge.

Über Anwendungen und Sektoren hinweg ist der Kenntnisstand in Bezug auf sicherheitsrelevantes Verhalten von Wasserstoff zumindest für die Gasphase gut. Lücken bestehen nach wie vor bezüglich der Zündungsphänomene und transientem Verbrennungsverhalten insbesondere unter realistischen Anwendungsbedingungen. Dies gilt verstärkt für kryogenen bzw. flüssigen Wasserstoff. Die bisherigen Anwendungen in der Großchemie oder in der Raumfahrt lassen hier nur begrenzt Rückschlüsse auf die Sicherheit dezentraler Anwendungen beim nicht speziell trainierten Endnutzer zu. Für hohe Drücke und/oder kryogene Temperaturen sind nach wie vor die Modelle für Wasserstoffversprödung unvollständig, und überraschende Degradation von Strukturkomponenten oder Dichtungen kann nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die im vorliegenden Beitrag beschriebenen Anwendungs- und Sektorspezifischen Kenntnislücken bedürfen baldiger wissenschaftlicher Aufklärung, damit fehlende bzw. teilweise noch unzureichende internationale Regelwerke zügig eingeführt werden können.

Quellenangaben

- [1] Kotchourko, A.; Jordan, T., Hydrogen Safety for Energy Applications ISBN 9780128204924, Butterworth-Heinemann (2022)
- [2] Hawksworth, S. et al, HSE Research Report RR1159N, ISBN 9780717667055 (2020) <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr1159.PDF>
- [3] The explosion at Laporte Industries Ltd, Report of HSE HM Factory Inspectorate ISBN 0 1 1 880333 (1976) <https://www.icheme.org/media/13690/the-explosion-at-laporte-industries-ilford.pdf>