

Wasserstofftechnik – Forschung für Sicherheit und Transport

Dr. Wolfgang Breitung

FZK • Forschungszentrum
Karlsruhe
breitung@iket.fzk.de

Prof. Dr. Horst Friedrich
DLR

horst.friedrich@dlr.de

Dr. Peter Treffinger
DLR

peter.treffinger@dlr.de

Dr. Ullrich Schmidtchen

DWV • Deutscher
Wasserstoff- und
Brennstoffzellen-
Verband
h2@dwv-info.de

Einleitung

Bei der Einführung von Wasserstoff (H_2) als zukünftigem Energieträger stellt sich auch die wichtige Frage nach der sicheren Nutzung durch eine breite Allgemeinheit. Im Vergleich zum heutigen Gebrauch in der Großindustrie wird Wasserstoff in der Zukunft viele neue Anwendungen mit sich bringen: Er wird weitgehend dezentral angewendet werden und seine Nutzung erfolgt dann auch in normalen Wohn- und Arbeitsumgebungen durch nicht speziell dafür ausgebildete Menschen. Kann Wasserstoff unter diesen veränderten Randbedingungen sicher genutzt werden?

Das Beispiel des Zeppelin-Unfalls der „Hindenburg“ 1937 hat gezeigt, wie ein einziger schwerer Unfall die Akzeptanz einer gesamten Technologie zerstören kann. Dieser Unfall bedeutete das Ende der Luftschiffahrt weltweit. Ein weiteres Beispiel für Transportunfälle mit Wasserstoff ist das Ereignis in Stockholm im Jahr 1984. Dort traten aus einem H_2 -Flaschenbündel etwa 180 Normalkubikmeter Wasserstoff aus, entzündeten sich und beschädigten Fahrzeuge und Gebäude im Umkreis von 90 m (*Abb. 1*). 16 Personen wurden verletzt. Es muss deshalb frühzeitig untersucht werden, wie sich die bekannten Risiken von Wasserstoff beherrschen lassen und wie zukünftige Wasserstofftechnolo-

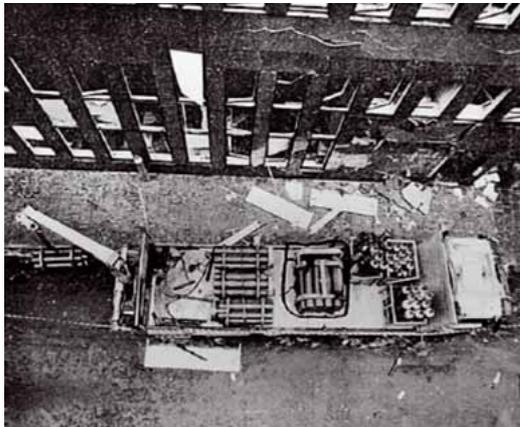
gien in unsere heutige Wirtschaftsform sicher integriert werden können. Das Ziel muss sein, ein mit heutigen konventionellen Brennstoffen vergleichbares und vom Endverbraucher akzeptiertes Restrisiko zu erreichen.

Stand der Sicherheitsforschung

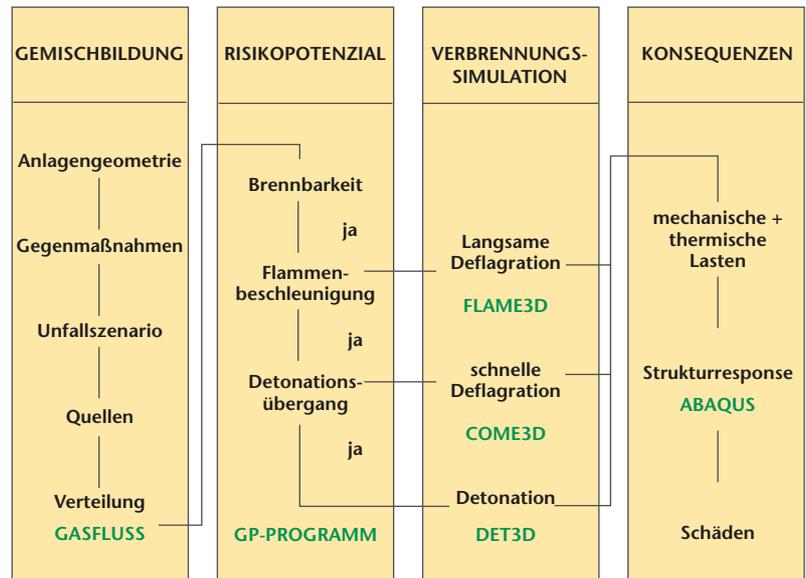
Die prinzipiellen Vorgänge bei Störfällen mit Wasserstoff sind gut verstanden. Die Hauptphasen der generellen Ereigniskette bestehen aus der anfänglichen Gasfreisetzung, der anschließenden Vermischung mit Luft, Zündung, Verbrennung, Erzeugung von Bränden und Druckwellen, sowie daraus resultierenden Personen- und Sachschäden. Dieser generelle Ablauf ist zwar im Prinzip für alle Brenngase identisch, aber Wasserstoff unterscheidet sich in seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften erheblich von den derzeit genutzten fossilen Brennstoffen wie Erdgas, Propan oder Benzindampf. Beispiele sind Dichte, Auftrieb, Diffusionskoeffizient, Zündenergie, Brennbarkeitsbereich und Brenngeschwindigkeit. Diese speziellen physikalisch-chemischen Eigenschaften von H_2 bzw. H_2 -Luftgemischen manifestieren sich zum Beispiel in einer starken – bei Kohlenwasserstoffen nicht beobachteten – Neigung zur spontanen Flammenbeschleunigung, die wiederum ungewöhnlich hohe Verbrennungsdrücke erzeugen kann.

Der Ablauf von Unfallszenarien mit Wasserstoff kann theoretisch und experimentell untersucht werden. Für die theoretische Analyse des Wasserstoffverhaltens wurde im Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) eine durchgehend deterministische Methodik entwickelt, in der unter Einsatz von dreidimensionalen Simulationsprogrammen die Gemischbildung, das damit verbundene Risikopotenzial, die schnellst mögliche Verbrennungsform und die strukturmechanischen Konsequenzen berechnet werden (*Abb. 2*).

Abbildung 1
Wasserstofftransport-
unfall in Stockholm
1984: Freisetzung von
180 Nm³, beschädigte
Gebäude und Fahr-
zeuge im Umkreis von
90 m, 16 Verletzte



Für die punktuelle Überprüfung und Absicherung der theoretischen Voraussagen sind Experimente eine wertvolle Ergänzung. Insbesondere bei sehr komplexen Ereignisabläufen muss sichergestellt werden, dass die Simulation tatsächlich alle wichtigen physikalischen Prozesse beschreibt. Experimente können auch schnellere und genauere Antworten geben als Simulationen. Oft lassen sich Verteilungs- und Verbrennungsprozesse nicht befriedigend auf verkleinerten geometrischen Skalen untersuchen, so dass die Notwendigkeit von Experimenten auf voller 1:1-Skala entsteht. Aus diesem Grund wurde im Forschungszentrum Karlsruhe ein Wasserstoff-Versuchszentrum mit Unterstützung der Industrie errichtet, in dem Wasserstofffreisetzung- und -verbrennungsexperimente durchgeführt werden können (Abb. 3). Diese Anlagen erschließen neue experimentelle Möglichkeiten für Sicherheitsuntersuchungen an wasserstoffbetriebenen Systemen, wie z. B. Brennstoffzellenstapel oder ganzen H₂-betriebenen Fahrzeugen. In einem 160 m³ großen Prüfstand kann Wasserstoff unter kontrollierten Strömungsbedingungen aus einer zu prüfenden Apparatur



freigesetzt und seine Verteilung im Raum mit hoher Orts- und Zeitaufösung gemessen werden. Szenarien mit hochenergetischen Verbrennungsabläufen können in zwei großen Versuchsbehältern untersucht werden (Abb. 4).

Abbildung 2 Am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) entwickelte Analysenmethodik zum Wasserstoffverhalten bei Unfällen mit 3d-Simulationsprogramm

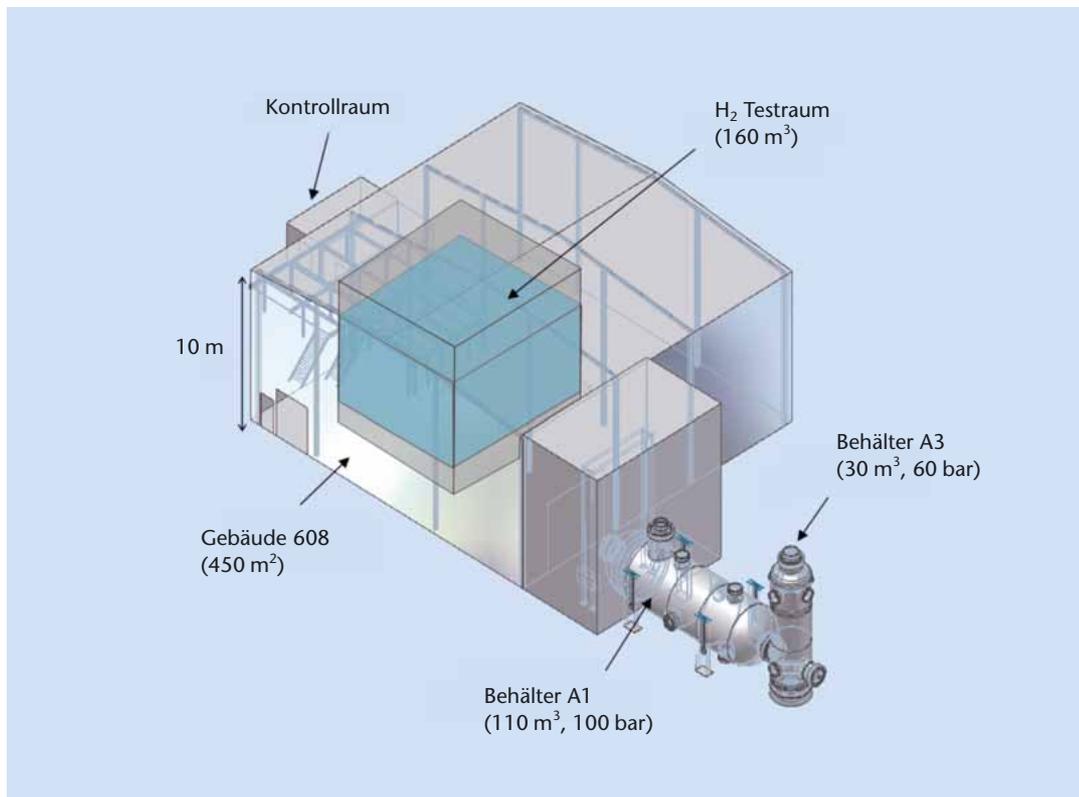


Abbildung 3 Versuchszentrum des FZK für Freisetzung- und Verbrennungsexperimente mit Wasserstoff



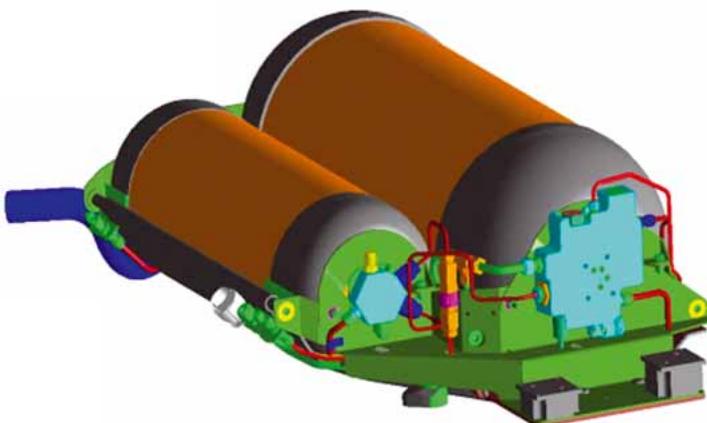
Abbildung 4
Versuchsbehälter für
Verbrennungsversuche
mit großen Wasser-
stoffmengen

Stand der Sicherheit in der Transporttechnik

Wasserstoff wird in der Industrie in großen Mengen hergestellt und verbraucht, jährlich ca. 500 Milliarden m^3 weltweit. Er kommt vor allem in der Petrochemie (Benzinherstellung), bei der Ammoniak- und Methanolherstellung, in der Lebensmittelchemie (Fetthärtung), der Stahlindustrie (Eisenreduktion) und als Raketentreibstoff zum Einsatz. Es gibt deshalb sichere und langfristig erprobte industrielle Transporttechnologien für flüssigen und gasförmigen Wasserstoff. Wegen der geringen Dichte von Wasserstoff ($71 \text{ kg}/m^3 \text{ LH}_2^1$, $0.09 \text{ kg}/Nm^3 \text{ H}_2$) sind die

¹LH₂ = Liquid Wasserstoff

Abbildung 5
Wasserstoff-
Druckgasspeicher aus
Kompositwertstoffen
für Drücke bis
700 bar und 3.1 kg
H₂-Inventar



Nettoladungen beim LKW-Transport überraschend gering. Ein Lastzug für $53 \text{ m}^3 \text{ LH}_2$ transportiert nur etwa 3300 kg H_2 , während es bei Gasflaschen für $3000 \text{ Nm}^3 \text{ CGH}_2$ (Compressed Gaseous Hydrogen) sogar nur 270 kg sind.

Pipelines

Eine attraktive Transportmöglichkeit bieten Pipelines. Die Firma Air Liquide betreibt im Raum Nordfrankreich, Belgien und Holland ein Pipeline-System für Wasserstoff mit einer Länge von insgesamt 966 km bei einem Betriebsdruck von 100 bar . Weitere Wasserstoffpipelines bestehen z. B. im Rhein-Ruhr-Gebiet (240 km) und im Leuna-Merseburg-Bitterfeld-Gebiet (150 km). Diese Pipelines verbinden große industrielle Wasserstoffhersteller und -Verbraucher. Wasserstoff kann risikolos und ohne nennenswerte Verluste in Stahlpipelines transportiert werden. Die dabei verwendeten Stähle sind sowohl bei Raumtemperatur als auch bei höheren Temperaturen für den Wasserstofftransport sehr gut geeignet.

Fahrzeuge

Ein wichtiger Sektor der Transporttechnik ist die Speicherung und der Transport von Wasserstoff in Fahrzeugtanks. Dazu wurden Flüssigwasserstofftanks und Gasdruckbehälter für den Einsatz in PKW und Bussen entwickelt. Heutige Speichertechnologien für mobile Anwendungen erreichen noch nicht die Energiedichten von üblichen Diesel- und Benzintanksystemen (etwa $30 \text{ MegaJoule pro Liter (MJ/l)}$, bzw. 35 MJ/kg). Am besten schneiden derzeit LH₂-Speicher mit bis zu 8 MJ/l bzw. 20 MJ/kg ab. Um Gasdruckspeicher auf vergleichbare Energiedichten zu verbessern, sind Systeme aus leichten Kompositwerkstoffen mit 700 bar Speicherdruck in der Entwicklung (Abb.5).

Brennstoffzellen

Ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen besteht in der Systemintegration von Antrieb, H₂-Speicher und Brennstoffzellenaggregat, verbunden mit einem Wasserstoffsicherheitskonzept. Im Rahmen des Projektes HyLite entwickelt das DLR gemeinsam mit der Zulieferindustrie eine Brennstoffzellenenergieversorgung für ein Elektrofahrzeug, das bisher mit einem Batteriesatz ausgerüstet war. Das Fahrzeug dient als Versuchsträger für die

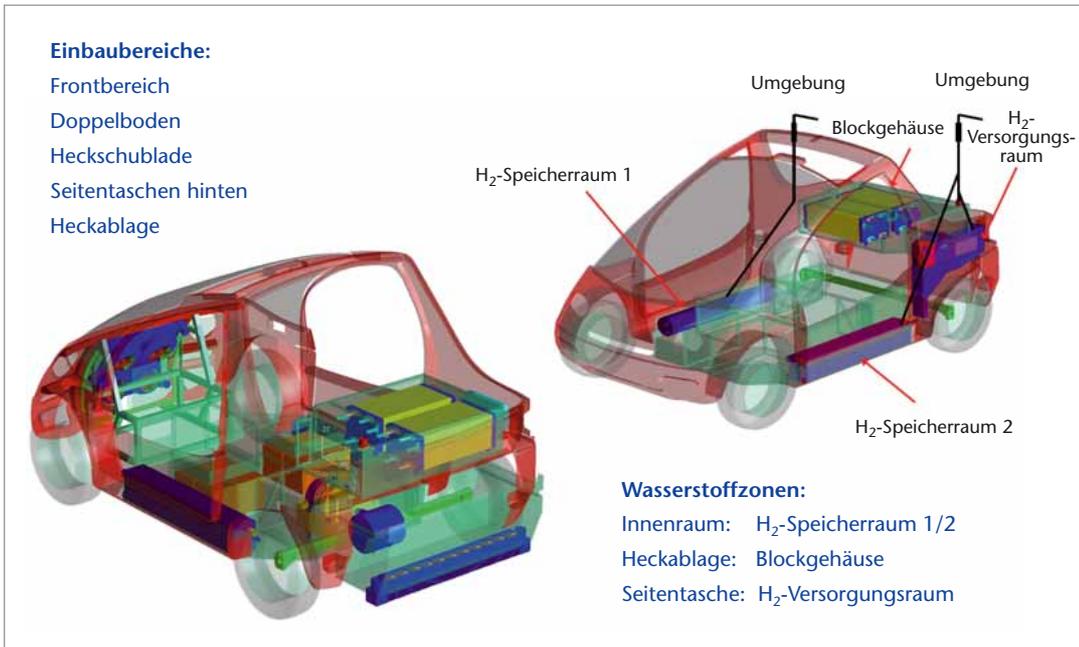


Abbildung 6
 Entwurf für ein PEMFC-Fahrzeugkonzept der DLR

von den Projektpartnern entwickelten Komponenten. Das DLR ist im Projekt für Systemdesign und Systemintegration verantwortlich und betreibt neben dem Fahrzeug weitere stationäre Prüfstände (Abb. 6).
 Im Rahmen des Projektes wurde ein Wasserstoffsicherheitskonzept erarbeitet, das auf einer geeigneten Packungstechnik beruht. Innerhalb geeigneter Packungsräume des Fahrzeugs wurden

vier „Wasserstoffzonen“ spezifiziert, die jeweils gasdicht zum Innenraum ausgeführt werden. Außerdem verfügt jeder dieser Räume über eine nicht verschließbare Öffnung, die an der höchsten Stelle des Raumes angebracht ist (Abb. 7). In den Leitungen, die von den Wasserstoffzonen nach außen führen sind H₂-Detektoren angebracht, die fest mit der Not-Ausschaltung des Fahrzeugs verdrahtet sind.

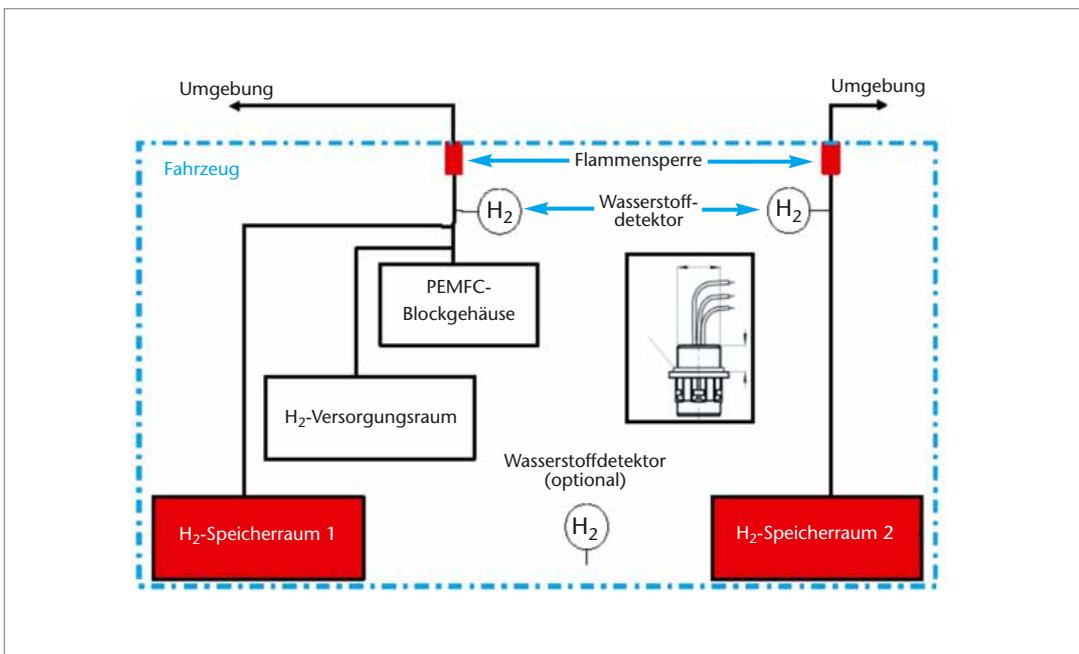


Abbildung 7
 Wasserstoffsicherheitskonzept der DLR-Fahrzeugstudie mit PEMFC

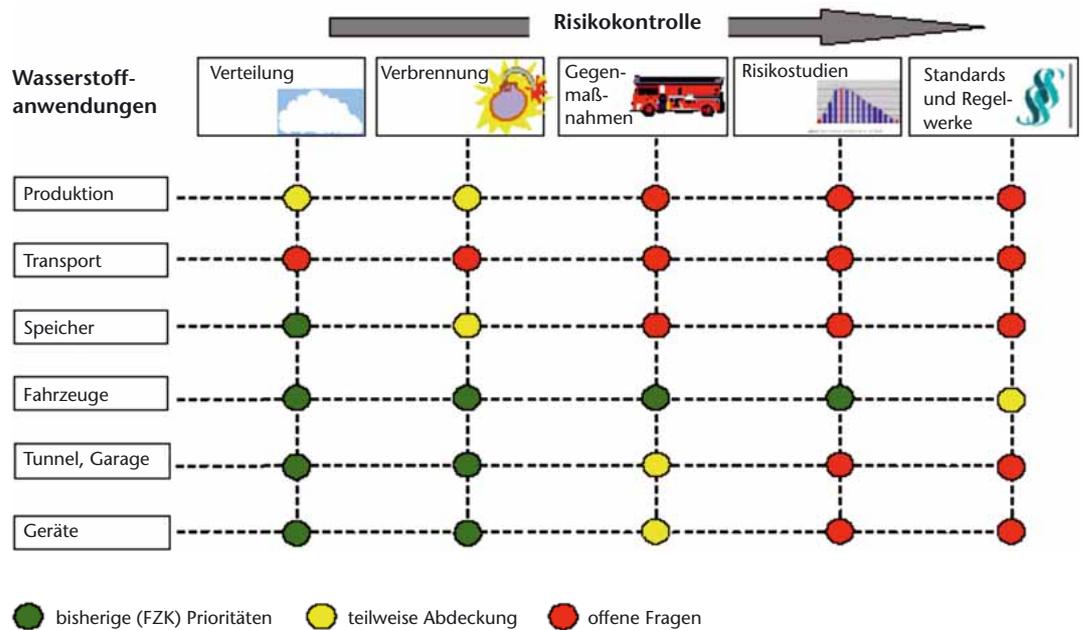


Abbildung 8
Aufgabenfeld für zukünftige Wasserstoffsicherheitsuntersuchungen

Die verwendeten Gasableitungen sind elektrisch leitfähig und mit der Fahrzeugmasse verbunden. Außerdem sind in der Not-Abschaltungskette zwei Beschleunigungssensoren eingebunden, die bei einem Crash einen Not-Abschaltung auslösen.

Das DLR betreibt weiterhin einen Prüfstand für Brennstoffzellensysteme, der aus folgenden Modulen aufgebaut ist: Brennstoffzellen-Modul, Wasserstoffversorgungsmodul, Luftversorgungsmodul, Wasser- und Wärmemanagement-Modul, sowie Steuerungs- und Messdatenerfassungs-Modul. Mit diesem Prüfstand werden Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Brennstoffzellensystemen durchgeführt. Dabei können zeitabhängige Betriebsparameter wie mittlere und minimale Zellspannung, Soll- und Ist-Strom, Luftmassenstrom, sowie H₂- und Luftdrücke bei transienten Leistungsänderungen des Brennstoffzellen-Stapels gemessen werden. Aus diesen Daten lassen sich die optimalen Betriebsstrategien für verschiedene Leistungsanforderungen ableiten.

Zukünftige Aufgaben

Die Sicherheitsaspekte des Energieträgers Wasserstoff werden im europäischen Network-of-Excellence „HySafe“ systematisch untersucht. Das Konsortium besteht aus 24 Partnern aus 12 europäischen Ländern und Kanada. Die Koordination von HySafe liegt beim Forschungszentrum Karlsruhe. Industrie, Forschungseinrichtungen und Universitäten werden in den Jahren 2004 - 2008 durch internationale Kooperationen die existierenden Experimentiereinrichtungen, Simulationswerkzeuge und Arbeitsgruppen zusammenführen, sowie die wichtigsten Aufgaben im Bereich der Wasserstoffsicherheit identifizieren. Das gesamte anstehende Aufgabenfeld ist in Abb.8 für die verschiedenen Wasserstoffanwendungen und die zugehörigen Risikokontrollmaßnahmen dargestellt. Die bisherigen Prioritäten der FZK-Arbeiten betrafen z. B. die Untersuchung von H₂-Verteilungs- und Verbrennungsprozessen bei Fahrzeugen in einer weitgehend geschlossenen Umgebung, wie Tunnel und Garage. Ziel ist die Ableitung von wirkungsvollen Schutzmaßnahmen und die Bereitstellung von grundlegenden Daten für H₂-Standards und Regelwerke. Durch die Kombination der Expertise der verschiedenen HySafe-Partner kann das gesamte Aufgabenfeld abgedeckt und bestehende Lücken identifiziert werden.

Schlussfolgerung

Erfahrungen mit Wasserstoff haben gezeigt, dass Unfallrisiken bei der Einführung neuer H₂-Technologien frühzeitig erkannt und kontrolliert werden müssen, damit keine sicherheitsbedingten Akzeptanzbarrieren entstehen. Wasserstoff ist nicht gefährlicher als die heutigen fossilen Brennstoffe, aber er verhält sich anders. „Learning bei doing“ wäre hier der falsche Ansatz.

Für die Untersuchung möglicher Unfallabläufe sind im Forschungszentrum Karlsruhe bereits moderne dreidimensionale-Simulationsprogramme und große Testanlagen vorhanden. Diese können für die Entwicklung von funktionalen, sicheren und vom Endverbraucher akzeptierten Produkten eingesetzt werden. Im Transportsektor gibt es sichere und für den industriellen Einsatz erprobte Technologien. Für eine zukünftige flächendeckende Verteilung von Wasserstoff bieten sich insbesondere Pipelinesysteme an, wie sie bereits für Wasserstoff und Erdgas bestehen. Für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge wurden überzeugende und bereits erprobte Sicherheitskonzepte entwickelt, z. B. beim DLR und verschiedenen deutschen Automobilherstellern.

Im Bereich der Standards und Regelwerke sind auf der europäischen Ebene noch erhebliche Anstrengungen notwendig, um vorhandene genehmigungsbedingte Innovationsbarrieren abzubauen. Dazu muss auch eine breitere wissenschaftliche Basis geschaffen werden. Insgesamt ist zu erwarten, dass der Energieträger Wasserstoff auch bei einer breiten Markteinführung sicher genutzt werden kann, sofern seine spezifischen Eigenschaften berücksichtigt werden.