



Europäisches Train the Trainer-Programm für Einsatzkräfte

Lektion 1

**Einführung der Wasserstoffsicherheit für
Einsatzkräfte**

STUFE IV

Experte

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an **Experten** und höher.

Dieses Thema ist auch auf Stufe I (Feuerwehrmann) verfügbar.

Diese Vorlesung ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann, Gruppenführer (Gruppenkommandeur), Einsatzleiter und Experte. Bitte beachten Sie die Einleitung zur Lektion bezüglich der Kompetenzen und Lernerwartungen

Hinweis: Diese Materialien sind Eigentum des HyResponder-Konsortiums und sollten entsprechend gewürdigt werden; die Ergebnisse von HyResponse wurden als Grundlage verwendet.





Haftungsausschluss

Trotz der Sorgfalt, die bei der Erstellung dieses Dokuments aufgewendet wurde, gilt folgender Haftungsausschluss: Die Informationen in diesem Dokument werden in der vorliegenden Form bereitgestellt, und es wird keine Garantie oder Gewährleistung dafür übernommen, dass die Informationen für einen bestimmten Zweck geeignet sind. Der Nutzer verwendet die Informationen auf eigenes Risiko und eigene Haftung.

Das Dokument gibt ausschließlich die Meinung der Autoren wieder. Das Gemeinsame Unternehmen FCH und die Europäische Union haften nicht für die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen.

Danksagung

Das Projekt wurde vom Gemeinsamen Unternehmen "Fuel Cells and Hydrogen 2" (JU) im Rahmen der Finanzhilfvereinbarung Nr. 875089 finanziert. Das Gemeinsame Unternehmen wird durch das Forschungs- und Innovationsprogramm "Horizont 2020" der Europäischen Union sowie durch das Vereinigte Königreich, Frankreich, Österreich, Belgien, Spanien, Deutschland, Italien, die Tschechische Republik, die Schweiz und Norwegen unterstützt.

Zusammenfassung

Dieser Vortrag gibt eine Einführung in die Wasserstoffsicherheit für Einsatzkräfte. Wasserstoff wird in der Industrie schon seit langem als komprimiertes Gas oder in verflüssigter Form verwendet. Wasserstoff ist nicht mehr oder weniger gefährlich als andere gebräuchliche Brennstoffe, aber er ist anders, hat seine eigenen spezifischen Eigenschaften und damit verbundene Risiken. Ein zunehmender Einsatz von FCH-Anwendungen erfordert ein tiefes Verständnis der Prozesse, Gefahren und Risiken, Sicherheitsmerkmale und -konzepte sowie professionell geschultes Personal, um mögliche Zwischenfälle oder Unfälle sicher zu bewältigen. All dies erfordert einen erheblichen Wandel in der Sicherheitskultur, insbesondere bei den Einsatzkräften, die als erste mit Notfallsituationen konfrontiert werden, in denen unter Druck stehender oder verflüssigter Wasserstoff verwendet wird, sowohl in Innenräumen als auch im Freien, in städtischen Wohngebieten, auf der Straße, auf dem Land und in vielen anderen Bereichen.

In diesem Vortrag wurde ein Überblick über FCH-Systeme und -Infrastruktur gegeben. Potenzielle Gefahren, Risiken, Sicherheitsmaßnahmen und Konzepte im Zusammenhang mit stationären und mobilen FCH-Anwendungen wurden erörtert. Es wurde auch ein Überblick über die wichtigsten Verwendungszwecke von Wasserstoff, die wichtigsten Produktionsmethoden, Speicheroptionen und Verteilungsarten gegeben. Darüber hinaus werden die wichtigsten Grundsätze der Wasserstoffsicherheitstechnik erörtert.

Das HyResponse-Projekt wird anerkannt, da die hier vorgestellten Materialien auf der Grundlage der ursprünglichen HyResponse-Vorlesungen (<http://www.hyresponse.eu>) erweitert wurden.

Schlüsselwörter

Brennstoffzellen, Wasserstoff, Produktion, Speicherung, Anwendung, Wasserstoffsicherheit, e-Labor

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
1. Zielpublikum	6
1.1 Beschreibung der Rolle: Experte.....	6
1.2 Kompetenzniveau: Experte	6
1.3 Vorbildung: Experte.....	6
2. Einleitung, Anwendungsbereich und Ziel	6
3. Überblick über die Produktion, Lagerung und industrielle Nutzung von H ₂	8
3.1 Wasserstoffproduktion	8
3.1.1 Wasserelektrolyse	8
3.1.2 PEM-Elektrolyseure.....	9
3.1.3 Alkalische Elektrolyseure	11
3.1.4 Technologien zur Reformierung.....	14
3.1.5 Andere Technologien.....	15
3.1.6 Dezentrale Wasserstofferzeugung	16
3.2 Speicherung von Wasserstoff.....	16
3.3 Wasserstoffnutzung in der Industrie	19
4. FC-Fahrzeuge.....	19
4.1 Die wichtigsten Merkmale von BZ-Fahrzeugen	20
4.2 FC- Fahrzeuge	21
4.2.1 Wasserstoffspeichersystem	22
4.2.2 System zur Lieferung von Wasserstoff als Kraftstoff.....	22
4.2.3 FC-System.....	23
4.2.4 Elektrischer Antrieb und Energiemanagementsystem	23
4.2.5 Sicherheitsmerkmale und -konzepte	23
4.3 FC-Busse	25
4.4 FC-Gabelstapler	28
4.5 Luftfahrt	30
4.5.1 Wasserstoff als Antriebskraftstoff	31
4.5.2 Wasserstoff-Brennstoffzelle für Luftfahrtanwendungen	33
5. Wasserstofftransport.....	35
5.1 Schwerlastkraftwagen (Lkw)	35
5.1.1 Gasbetriebene Lastkraftwagen.....	35



5.1.2	Lastkraftwagen mit tiefgekühlter Flüssigkeit	37
5.2	Züge.....	39
5.3	Pipelines	40
6.	Stationäre Anwendungen.....	44
6.1	Kraft-Wärme-Kopplungssysteme (KWK)	44
6.2	Reservestromerzeugung	44
7.	Marine Anwendungen.....	46
8.	Wasserstoffbasierte Energiespeichersysteme	51
9.	Überblick über Vorfälle und Unfälle.....	56
9.1	Zwischenfälle und Unfälle in den Systemen und der Infrastruktur von FCH.....	56
9.2	Unfälle bei der Wasserstoffproduktion	57
9.3	Ein Zwischenfall an einer Tankstelle	57
10.	Einführung in den Rahmen der Wasserstoffsicherheitstechnik und Normen...58	
11.	Einführung in das e-Labor	62
11.1	Wissenschaftliche Grundsätze.....	63
11.1.1	Ungezündete Freisetzungen	63
11.1.2	Das Ähnlichkeitsgesetz.....	64
11.1.3	Wirkung des Auftriebs.....	65
11.1.4	Abschlammung	66
11.1.5	Passive Belüftung.....	67
11.1.6	Zwangweise Belüftung.....	68
11.1.7	Druckspitzenphänomen.....	69
11.1.8	Abstände der Strahlenfeuergefahr.....	69
11.1.9	Entschärfung von Verpuffungen.....	71
11.1.10	Druckwelle und Feuerball nach dem Bruch eines Tanks bei einem Brand ...	72
11.2	Zusammenfassung des e-Labors.....	72
	Referenzen.....	73



1. Zielpublikum

Die in dieser Vorlesung enthaltenen Informationen richten sich an die Ebene der Experten und darüber hinaus. Diese Lektion ist auch für die Stufen I: Feuerwehrmann/frau.

Die Rollenbeschreibung, das Kompetenzniveau und die Lernerwartungen, die auf der Ebene der Experten vorausgesetzt werden, werden im Folgenden beschrieben.

1.1 Beschreibung der Rolle: Experte

Experten unterstützen den Einsatzleiter mit Ratschlägen und durch die Leitung und Beaufsichtigung von technischen Einsätzen, die den Einsatz von Wissen, Fähigkeiten oder Ausrüstung in Bezug auf ein bestimmtes Risiko oder eine bestimmte Einsatzfähigkeit erfordern. Typische Vorfälle betreffen gefährliche Stoffe, Transportfahrzeuge, klimatische Ereignisse, strukturelle und andere bauliche Mängel sowie die Logistik von Notfallmaßnahmen.

1.2 Kompetenzniveau: Experte

Ein wissenschaftliches, technisches und empirisches Fundament im Fachgebiet mit der durch Erfahrung erweiterten Fähigkeit, diese Informationen und Kenntnisse in einer interpretierten und nützlichen Weise anzuwenden, um den Einsatzleiter und andere Einsatzkräfte unter der Leitung des Experten in die Lage zu versetzen, wirksam und sicher auf die Notfallsituation zu reagieren.

1.3 Vorbildung: Experte

EQR 5 Umfassendes, spezialisiertes, faktisches und theoretisches Wissen in einem Arbeits- oder Studienbereich und ein Bewusstsein für die Grenzen dieses Wissens. Ein umfassendes Spektrum an kognitiven und praktischen Fähigkeiten, die erforderlich sind, um kreative Lösungen für abstrakte Probleme zu entwickeln. Ausübung von Management- und Aufsichtsfunktionen in Arbeits- oder Studienkontexten mit unvorhersehbaren Veränderungen; Überprüfung und Weiterentwicklung der eigenen Leistung und der Leistung anderer.

2. Einführung, Umfang und Ziel

Brennstoffzellen- und Wasserstoffanwendungen (fuel cell and hydrogen applications, FCH) sowohl im Verkehrs- als auch im Energiesektor sind heute auf dem Markt verfügbar, und es ist sehr wahrscheinlich, dass Einsatzkräfte in naher Zukunft mit möglichen Unfällen/Zwischenfällen zu tun haben werden. Die Entwicklung von FCH-Technologien erfordert ein besseres und gründlicheres Verständnis der Gefahren, Risiken, Prozesse und Sicherheitsmerkmale im Zusammenhang mit FCH-Systemen und -Infrastrukturen durch die First Responder. Die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse und Erdgasreformierung, dezentrale Wasserstofferzeugungsanwendungen, die Speicherung von gasförmigem und verflüssigtem Wasserstoff, Wasserstofftransport- und Materialhandhabungsanwendungen, BZ-Fahrzeuge (z. B. PKW, Busse, Gabelstapler), Wasserstofftankstellen, stationäre BZ-Anwendungen und wasserstoffbasierte Energiespeichersysteme sind den Einsatzkräften noch



weitgehend unbekannt. Darüber hinaus fehlt es an standardisierten Verfahren für das Eingreifen bei Unfällen oder Zwischenfällen mit den oben genannten Systemen und Infrastrukturen.

Ziel dieses Vortrags ist es, den Respondern eine Reihe von FCH-Anwendungen vorzustellen, sie mit den spezifischen Risiken vertraut zu machen und die wichtigsten Ansätze der Wasserstoff-Sicherheitstechnik zu erläutern. Die Einsatzkräfte sollten sich darüber im Klaren sein, dass Wasserstoff nicht mehr oder weniger gefährlich ist als jeder andere gängige Brennstoff. Wasserstoff ist anders, und die Kenntnis seiner spezifischen Eigenschaften wird es erleichtern, am Unfallort angemessene Entscheidungen zu treffen. Die Einsatzkräfte sollten professionell ausgebildet sein, um mit Wasserstoffsystemen bei Drücken bis zu 100 MPa und Temperaturen bis zu -253°C (verflüssigter Wasserstoff) sowohl im Freien als auch in geschlossenen Räumen umgehen zu können.

Dieser Vortrag ist der erste einer Reihe und baut auf Materialien auf, die im Rahmen des HyResponse-Projekts entwickelt und bereitgestellt wurden (<http://www.hyresponse.eu/>). Im Rahmen des Projekts (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>) wurde zunächst ein internationales Curriculum für die Wasserstoffsicherheitsausbildung von Ersthelfern entwickelt. Dies war der erste Schritt zur Einrichtung der europäischen Plattform für Wasserstoffsicherheitstraining für Ersthelfer. Dieser Lehrplan wurde im Rahmen des HyResponder-Projekts (<https://hyresponder.eu>) weiterentwickelt, um den aktuellen Stand der Technik widerzuspiegeln, und um weitere Einzelheiten zu verflüssigtem Wasserstoff, engen Räumen, Druckbehältern usw. zu ergänzen.

Die Praktikanten werden ermutigt, dieses Dokument zu nutzen, um ihre unabhängigen Studien zu unterstützen und Quellen für weitere Informationen zu suchen.

Am Ende dieses Vortrags wird ein Responder/ein Auszubildender in der Lage sein:

- die Neuartigkeit und den Reichtum der FCH-Technologien in der modernen Gesellschaft schätzen zu wissen;
- die Rolle von Wasserstoff als neuem Energieträger zu verstehen;
- die wichtigsten Wege zur Herstellung, zum Transport, zur Lieferung und zur Verwendung von Wasserstoff zu nennen;
- Schwierigkeiten bei der öffentlichen Wahrnehmung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien zu erkennen;
- die wichtigsten Methoden der industriellen Wasserstoffproduktion zu definieren. Obwohl diese Vorlesung nicht darauf abzielt, den Lernenden ein umfassendes Wissen über alle Produktionsmethoden zu vermitteln, wird ein anschaulicher Überblick über einen Reformier, PEM (Protonenaustauschmembran) und alkalische Elektrolyseure gegeben, wobei der Schwerpunkt auf Sicherheitsmerkmalen und -konzepten liegt;



- das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle (BZ) und eines Brennstoffzellenstapels zu beschreiben;
- Funktionsprinzipien und Sicherheitsaspekte einer Reihe von FCH-Anwendungen zu erläutern, darunter BZ-Fahrzeuge, Tankstellen, stationäre Wasserstoffspeicher, Anwendungen für den Materialtransport und die Wasserstoffverteilung, Reservestromerzeugung und BZ-Systeme zur kombinierten Erzeugung von Wärme und Strom;
- Beispiele für Zwischenfälle oder Unfälle zu nennen, die bei FCH-Anwendungen auftreten können;
- Einblicke in den Rahmen der Wasserstoffsicherheitstechnik zu geben;
- Kenntnis des e-Labors für Wasserstoffsicherheit;
- wesentliche sicherheitsrelevante Bedingungen/Parameter für verschiedene Szenarien zu erarbeiten.

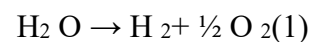
3. Überblick über die Produktion, Lagerung und industrielle Nutzung von H₂

3.1 Wasserstoffproduktion

Wasserstoffmoleküle kommen in der Natur nicht in reiner Form vor. Daher muss Wasserstoff aus den Verbindungen, in denen er enthalten ist, hergestellt werden, z. B. aus Wasser, Methan, Methanol, Ammoniak, Ethanol, Biomasse usw. Die Wasserstoffproduktion kann in zwei Kategorien unterteilt werden: die zentrale Großproduktion und die dezentrale Produktion in kleinem oder mittlerem Maßstab. Bei der zentralen Produktion handelt es sich um etablierte chemische Großanlagen, die Wasserstoff in großen Mengen produzieren, der dann zu den Kunden transportiert wird. In diesem Fall wird der Wasserstoff entweder über Pipelines, auf der Straße oder per Schiff über teilweise große Entfernungen transportiert. Beispiele hierfür sind große Dampfreformer, die den großen Gasunternehmen wie Air Liquide, Linde, Air Products und anderen gehören. Auf dem Markt gibt es mehrere etablierte Technologien für die industrielle Herstellung von Wasserstoff. Es gibt zwei kommerzielle Wege der Wasserstofferzeugung: die Wasserelektrolyse (seit Ende 1920) und die Reformiertechnik (seit 1960).

3.1.1 Wasserelektrolyse

Die Wasserelektrolyse ist ein Prozess, bei dem Wasser mit Hilfe von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird, wie in Gleichung (1) dargestellt:





Dieser Prozess findet in einem Elektrolyseur statt, der elektrische Energie in chemische Energie umwandelt und als ein Gerät betrachtet werden kann, das auf die entgegengesetzte Weise wie eine Brennstoffzelle (BZ) funktioniert. Der Strom kann aus verschiedenen Quellen stammen, und je nachdem kann die Elektrolyse entweder mit oder ohne Kohlendioxid-CO-Emissionen erfolgen². Wird der Strom aus erneuerbaren Quellen (Wind-, Wasser-, Sonnen- oder Gezeitenenergie) erzeugt, wird kein CO₂ emittiert, wird er aus fossilen Brennstoffen erzeugt, wird bei der Wasserstofferzeugung (wenn auch in geringem Maße) CO₂ emittiert. Der erzeugte gasförmige Wasserstoff ist sehr rein und kann entweder sofort genutzt oder für eine spätere Verwendung gespeichert werden. Die Kapazität von Elektrolyseuren reicht von weniger als 500 m³ /h bis zu mehr als 3,3 × 10⁵ m³ / h. Der Elektrolyseur enthält zwei Elektroden (positiv und negativ), Wasser und einen Elektrolyten, d. h. einen Stoff, der freie Ionen enthält, die diesen Stoff zu einem elektrischen Leiter machen. Die Zersetzung des Wassers findet statt, wenn der elektrische Strom zwischen zwei Elektroden innerhalb der Elektrolysezelle fließt. An der negativen Elektrode (Kathode) entsteht Wasserstoff, an der positiven Elektrode (Anode) wird Sauerstoff gebildet.

3.1.2 PEM-Elektrolyseure

Wenn die Elektrolyse in zwei Kammern stattfindet, die durch eine Protonenaustauschmembran (PEM) getrennt sind, spricht man von PEM-Elektrolyseuren. Durch Anlegen eines Gleichstroms (DC) dissoziiert Wasser in Wasserstoff (H₂) an der negativen Elektrode und Sauerstoff (O₂) an der positiven Elektrode (Abbildung 1). Die Elektroden und die Membran bilden in der Regel eine Membranelektrodenanordnung (MEA) und einen Stapel, der einem BZ-Stapel ähnelt. Die Gase werden in den Rückgewinnungsbehältern gesammelt. PEM-Elektrolyseure arbeiten bei niedrigen Temperaturen und PEM dient als Elektrolyt. Wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht ein PEM-Elektrolyseur aus den folgenden Elementen:

- einen Prozessschrank, der alle Prozesskomponenten wie Ventile, Rohrleitungen, Gase und Wasser, Schornsteine, Druckbehälter, Pumpen usw. enthält.
- einen Schaltschrank, der alle elektrischen Komponenten enthält (d.h. Mess- und Regeltechnik, Verkabelung, Stromaufbereitung).
- ein Kühlsystem für die Wärmeabfuhr im Elektrolyseprozess.
- ein wetterfestes Gehäuse.

Die unerwünschten Ereignisse, die eintreten können, stehen im Zusammenhang mit der Bildung einer ATEX1 (d. h. explosive H₂-O₂-Gemische) entweder im Prozessraum oder im Abscheider (d. h. einer Vorrichtung zur Trennung von gasförmigem H₂ und O₂ von Wasserspuren), der in der Regel stromabwärts von einem BZ-Kamin installiert ist. Um die Ansammlung von Wasserstoff im Prozessraum zu vermeiden, sollten die folgenden Maßnahmen getroffen werden:

- Steuerdruck und Druckdifferenz zwischen Wasserstoff- und Sauerstoffleitungen;
- Kontrolle der Wasserstoffkonzentration im Behälter (< 0,4 Vol. % H₂);
- die Wasserstoffmenge in der Gasschicht des Abscheiders so weit wie möglich zu begrenzen, um die Bildung eines entflammaren Wasserstoff-Luft-Gemisches im Behälter im Falle eines katastrophalen Lecks zu vermeiden [1].

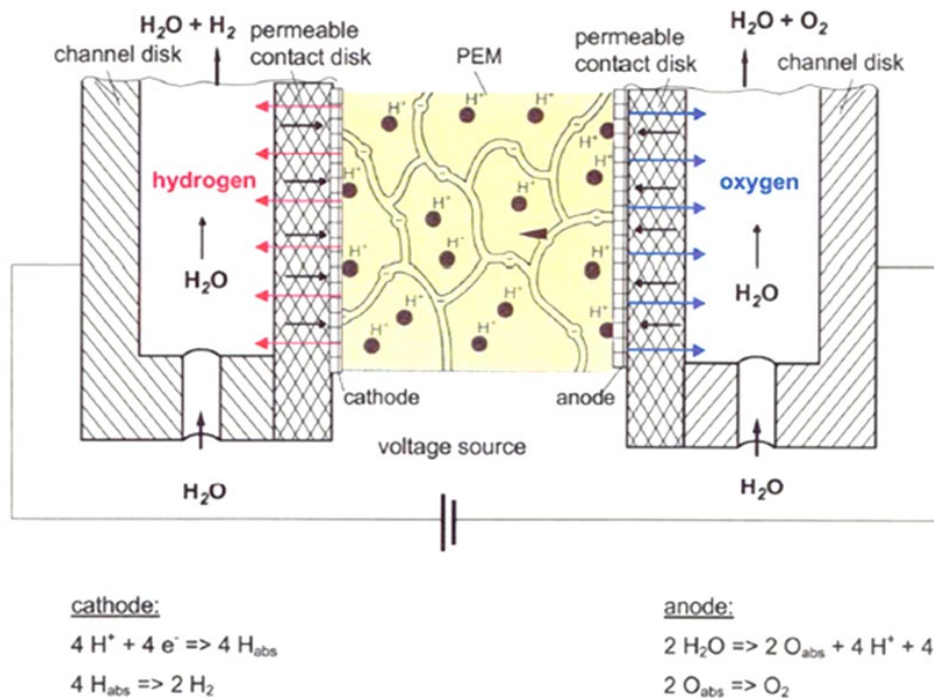


Abbildung 1. Funktionsprinzip des PEM-Elektrolyseurs. [Quelle: Areva, 2015]

Die Bildung einer Wasserstoff-Sauerstoff-ATEX im Abscheider kann durch eine Fehlfunktion der Wasserübertragungsleitung oder durch eine Membranperforation verursacht werden. Die folgenden Sicherheitsmaßnahmen werden berücksichtigt, um ein ATEX-Ereignis im Abscheider zu vermeiden:

- einen Mindestwasserstand im Gasabscheider von über 55 % seiner Höhe vorschreiben;
- den Wasserstand in den H- und O-Gasabscheidern kontrollieren; 22
- den Druck und die Druckdifferenz zwischen den H- und O-Leitungen kontrollieren; 22
- die Wasserstoffkonzentration am Ausgang des Sauerstoffabscheiders zu kontrollieren.

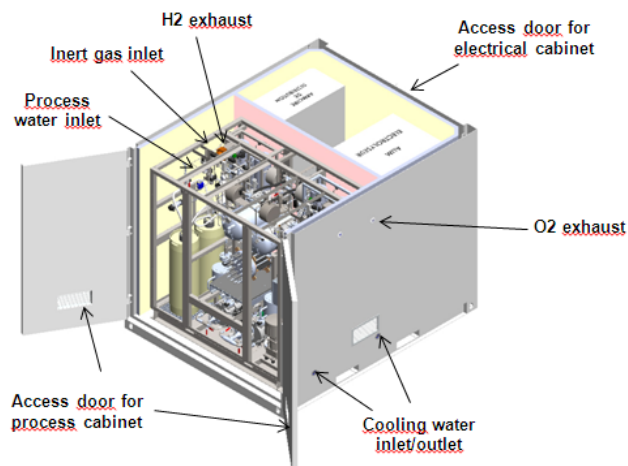


Abbildung 2. Das Schema eines PEM-Elektrolyseurs [1]

Im Falle der Aktivierung von Sicherheitsvorrichtungen schaltet sich der Elektrolyseur ab, was nicht nur das Schließen der an die Speichertanks angeschlossenen Isolationselektroventile, sondern auch die Druckentlastung des Systems durch die normalerweise geöffneten Elektroventile beinhaltet. Darüber hinaus kann die schlechte Isolierung der Elektronen bei Unfällen zu elektrischen Funken führen, die den Wasserstoff in einer sauerstoffreichen Umgebung entzünden können.

Die Wasserstoffproduktionsrate der verschiedenen Modelle des ITM Power Elektrolyseurs, einschließlich HGas1SP, HGas2SP, HGas3SP und HGasXMW, variiert von 5,5 bis 2015 m³/h.

3.1.3 Alkalische Elektrolyseure

Die alkalische Elektrolyse ist eine ausgereifte Technologie zur Wasserstofferzeugung und wird auch in der Industrie am häufigsten eingesetzt. Die alkalische Elektrolyse beruht auf demselben Prinzip wie die PEM-Elektrolyse, nämlich der Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Energie. Der alkalische Elektrolyseur verfügt über zwei Elektroden, die in einen flüssigen alkalischen Elektrolyten, eine wässrige Kaliumhydroxid- oder KOH-Lösung, mit einem Anteil von 25 % bei 80 °C bis zu 40 % bei 160 °C eingetaucht sind. Die Verwendung von KOH ist aufgrund seiner höheren Ionenleitfähigkeit, seines geringeren Gehalts an Chloridverunreinigungen und seines niedrigeren Sättigungsdampfdrucks gegenüber der Verwendung von Natronlauge NaOH vorzuziehen. Die Elektroden sind durch ein Diaphragma getrennt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Dieses Diaphragma hat zwei Funktionen: Zum einen hält es die Produktgase (nämlich Wasserstoff und Sauerstoff) getrennt und zum anderen ist es durchlässig für Hydroxidionen (OH⁻) und Wassermoleküle. Das Diaphragma lässt die Ionen durch, nicht aber den Wasserstoff. Im Allgemeinen besteht ein alkalischer Elektrolyseur aus einer Reihe von Elektrolysezellen, die aus einer Membran mit Elektroden bestehen, die zwischen bipolaren Durchflussplatten angeordnet sind, wie in Abbildung 4 dargestellt.

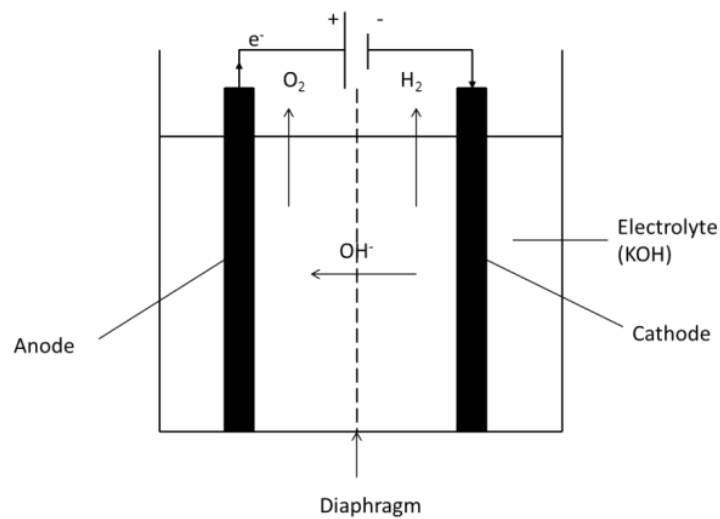


Abbildung 3. Schema eines alkalischen Elektrolyseurs [1]

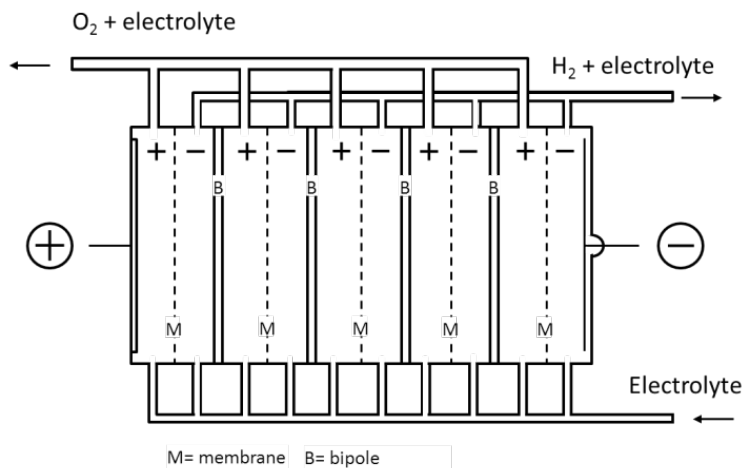
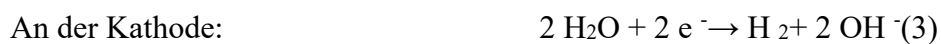


Abbildung 4. Schema eines Elektrolyse-Stacks [1]

Die an beiden Elektroden ablaufenden Reaktionen sind unten dargestellt:



Ein typischer alkalischer Elektrolyseur besteht aus:

- Ein Stromversorgungssystem und ein System zur Steuerung und Instrumentierung;
- Ein Elektrolysesystem, das eine Einheit zur Wasserreinigung, eine Einheit zur Wasserstoffreinigung, einen Gastrockner und einen Separator enthält.
- Ein Kompressor.

Die [Abbildungen 5](#) und [6](#) zeigen Beispiele für industrielle alkalische Elektrolyseure.



Abbildung 5. Alkalischer Elektrolyseur, IHT Typ S-556, 760 m³/h und 30 bar [1]



Abbildung 6. Außen- und Innen-HySTAT von Hydrogenics-Elektrolyseuren, 10-60 m³/h [1]

Ähnlich wie beim PEM-Elektrolyseur besteht das Hauptrisiko des alkalischen Elektrolysesystems in der Bildung eines Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisches, das zu einer Explosion im Inneren des Elektrolyseurs führen kann. Um eine Fehlfunktion des Elektrolyseurs zu erkennen, werden mehrere Sensoren eingesetzt:

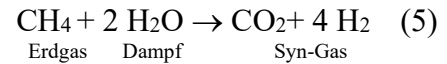
- Messung der Wasserstoffkonzentration in der Sauerstoffleitung;
- Messung von Spannung und Strom;
- Messung der Temperatur am Eintritt und am Austritt der Elektrolysezellen;
- Messung der Ionenkonzentration des Elektrolyten.

Eine andere Art von Risiko besteht in der Exposition gegenüber einer ätzenden Lösung im Falle eines Elektrolytaustritts. Das Spezifikationsblatt von Kaliumhydroxid empfiehlt die

Verwendung eines Leckbehälters, um den Kontakt von KOH mit der Umgebung zu vermeiden [1].

3.1.4 Technologien reformieren

Die derzeit gängigste Art der Wasserstofferzeugung ist die Dampfreformierung von Erdgas. Die Reaktion bei der Reformierung von Erdgas (Methan CH₄) ist in Gleichung 5 dargestellt:



Hierbei handelt es sich um ein endothermes Verfahren (d. h. es sind hohe Temperaturen erforderlich), bei dem Methan und Dampf in Wasserstoff und Kohlendioxid CO₂ umgewandelt werden. Es handelt sich in der Regel um einen zweistufigen Prozess, bei dem als typische Nebenprodukte Kohlenmonoxid CO und Kohlendioxid CO₂ anfallen. Ein Reformier kann rund um die Uhr mit einer konstanten Last betrieben werden. Die Kapazität von Reformern reicht von 100 bis zu mehr als 100.000 m³/h. Der Wirkungsgrad des Reformers übersteigt selten 80 %. Der Nachteil dieser Methode ist, dass der erzeugte Wasserstoff nicht rein ist (er ist mit CO/CO₂ verunreinigt) und unter Atmosphärendruck steht. Um die Nachhaltigkeit des Reformierungsprozesses zu verbessern, sind CO₂-Abscheidung und -Sequestrierung erforderlich. Ein Beispiel für eine Dampfreformierungsanlage ist in Abbildung 7 dargestellt.

Die Dampfreformierung ist ein gut etablierter industrieller Prozess und wird in diesem Vortrag nicht näher behandelt. Weitere technische Einzelheiten finden Sie in den Unterlagen über die Sicherheit in der Reformierungsindustrie, die im internationalen Lehrplan für die Schulung von Einsatzkräften in Sachen Wasserstoffsicherheit enthalten sind. Wie bereits erwähnt, findet der Prozess bei hoher Temperatur und hohem Druck statt, so dass die in den kommenden Vorträgen behandelten Fragen der Wasserstoffsicherheit (Lecks, Brände, Erkennung, Schadensbegrenzung usw.) natürlich auch für das Dampfreformieren relevant sind.



Abbildung 7. AirLiquide-Dampfreformer [1]



3.1.5 Andere Technologien

In diesem Vortrag wird ein Überblick über die Methoden der Wasserstofferzeugung außerhalb des Hauptstroms gegeben. Die Einsatzkräfte sollten eine Vielzahl von Wasserstoffherstellungsmethoden kennen, da der Markt für Wasserstoff schnell wächst. Für weitere Informationen über alternative Wasserstoffproduktionstechnologien nutzen Sie bitte die Verweise aus dem International Curriculum on Hydrogen Safety Training for Responders.

Wasserstoff kann aus Wasser hergestellt werden, indem:

- Nukleare Methoden (Radiolyse oder Thermolyse);
- Photoelektrolyse (Photovoltaiksysteme gekoppelt mit Elektrolyseuren);
- Thermo-chemischer Zyklus;
- Ferrosilizium-Methode (Wasser, Natriumhydroxid und Ferrosilizium);
- Photobiologische Wasserspaltung (zwei Schritte: Photosynthese und H-Produktion, katalysiert durch Hydrogenasen);
- Fotochemische Wasserspaltung;
- Biologische Wege (Fermentation, enzymatisch, mikrobiologisch und biokatalytisch).

- aus fossilen Brennstoffen durch:

- Partielle Oxidation des Öls;
- Kohlevergasung;
- Plasmareformierung (leichte Kohlenwasserstoffe werden durch Plasma auf 1600 °C erhitzt und erzeugen Wasserstoff und Kohlenstoff, keine CO-Emissionen); 2
- Trockenes Reforming (Erdgas, das im CO-Strom reformiert wird²)

- aus komplexen Metallhydriden:

- $\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{HBO}_3 + 5\text{H}_2$ (36 Gew.-%) (6)
Natriumborhydrid
- $\text{LiBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiOH} + \text{HBO}_3 + 5\text{H}_2$ (46 Gew.-%) (7)
Lithiumborhydrid

Diese komplexen Metallhydride werden derzeit intensiv erforscht, um neue Materialien zu entwickeln, die sich für die feste Speicherung von Wasserstoff eignen.

Traditionell wird Wasserstoff mit Hilfe von Reformierungstechnologien hergestellt, die nicht "grün" sind, weil dabei Kohlendioxid entsteht. Aus Erdgas hergestellter Wasserstoff ist zwar kurzfristig sicherlich eine praktikable Option, wird aber nicht als langfristige Lösung angesehen. Es wird davon ausgegangen, dass "grünere" Produktionswege wie Elektrolyse und Kernkraft eine immer wichtigere Rolle spielen werden. Zu den erneuerbaren Ressourcen für



die Wasserstoffherzeugung gehören Biomasse, Methanol, Ethanol und Deponiegas, Windkraftanlagen, Gezeitenenergie, Wasserkraft, Sonnenenergie und Gravitationsenergie. Da erneuerbare Energien eine immer wichtigere Rolle bei der Deckung des Energiebedarfs der modernen Gesellschaft spielen, werden die Fragen des Netzausgleichs und der Energiespeicherung intensiv untersucht, und hier kommt Wasserstoff als neuer Energieträger ins Spiel. Es gibt eine Reihe von Projekten, bei denen Wind- oder Solarenergie mit der Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff gekoppelt wird, z. B. das Pure-Projekt (Schottland), die MYRTE-Plattform (Korsika, Frankreich), die Puertollano-Anlage (Ciudad Real, Spanien), die Utsira-Windkraft- und Wasserstoffanlage (Insel Utsira, Norwegen) und mehrere FCH-Projekte, z. B. SOPHIA, PECDEMO, HYDROSOL-PLANT et al.

3.1.6 Dezentralisierte Wasserstoffherzeugung

Die dezentrale (oder verteilte) Wasserstoffherzeugung bezieht sich auf Systeme in verschiedenen Größenordnungen, von einer Inselgemeinde bis zu einem Hauselektrolyseur für den persönlichen Gebrauch. Der Übergang zu einer dezentralen Produktion kann zu einer Energieunabhängigkeit für den Endverbraucher führen; er bedeutet jedoch auch, dass eine neue "Sicherheitskultur" erforderlich ist, da die Öffentlichkeit eine größere Verantwortung trägt. Einige Beispiele für Heimsysteme wurden von Honda und ITM vorgestellt:

- Honda-Energiestation für zu Hause:
<https://apps.honda.co.uk/environment/designingthefuture/homeenergystation/>
- ITM Heimsystem:
<https://www.itm-power.com/h2-stations>

3.2 Wasserstoffspeicherung

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung. Wasserstofflecks, Brände und Explosionen sowie die Wechselwirkung von Wasserstoff mit den für die Speicherung verwendeten Materialien sind äußerst relevant und werden in den folgenden Vorträgen behandelt. Die Wasserstoffspeicherung ist eine Grundlagentechnologie für eine Reihe von FCH-Anwendungen, von der Speicherung an Bord von BZ-Fahrzeugen bis hin zu stationären BZ-Anwendungen. Es gibt keine universelle Speicherlösung, die in allen Systemen eingesetzt werden kann. Eine Wasserstoffspeicherlösung muss für die jeweilige Anwendung ausgewählt werden. So sind beispielsweise Größe und Gewicht begrenzende Faktoren für Personenkraftwagen, während das Gewicht für Gabelstapler ein wünschenswertes Attribut sein kann. Die Speicherlösungen sind eine der wichtigsten Herausforderungen für die Wasserstoffwirtschaft, und diese Technologien sind sowohl für die Wissenschaft als auch für die Industrie von großem Interesse.

Die Speicherung großer Wasserstoffmengen über lange Zeiträume ist ein entscheidender Schritt beim Aufbau der FCH-Infrastruktur, die den Wasserstoffverbrauch und die

Wasserstoffproduktion regulieren und die Kontinuität der Versorgung der Kunden gewährleisten wird. Es werden verschiedene unterirdische Wasserstoffspeicherungssysteme untersucht. Eine Option ist die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in geologischen Formationen wie erschöpften Gasfeldern, Aquiferen oder Salzkavernen. Eine andere Möglichkeit ist die unterirdische Speicherung in Tanks, die in der Erde vergraben sind, wobei der Wasserstoff entweder als komprimiertes Gas oder in flüssiger Form gespeichert wird. Die geologische Speicherung erfolgt in der Regel in der Nähe einer Wasserstoffproduktionsstätte, während die unterirdischen Tanks näher an der Verbrauchsstelle, z. B. an Tankstellen, liegen.

Es gibt zahlreiche Wasserstoffspeichertechnologien, die in die folgenden Gruppen eingeteilt werden können:

- Komprimierte Gasspeicherung
- Verflüssigte Lagerung
- Feststoffspeicher

Am häufigsten wird Wasserstoff als komprimiertes Gas oder als kryogene Flüssigkeit in Metall- oder Verbundflaschen oder Tanks gespeichert (**Abbildung 8**). Die Kryokompressionstechnologie, bei der gasförmiger Wasserstoff unter hohem Druck auf niedrige Temperaturen abgekühlt wird, ist eine weitere nützliche Alternative. Die Flaschen können unterschiedliche Größen, Fassungsvermögen (von 20 bis 300 l) und Drücke (20-70 MPa) haben und können für einige Anwendungen zu einem Bündel zusammengeschlossen oder in einem Korb für den Transport gesammelt werden.

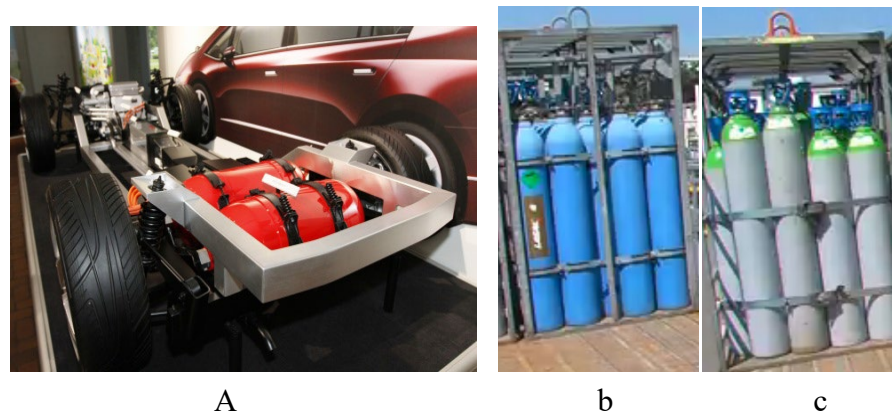


Abbildung 8. Bordspeicher für Wasserstoff (a), ein Flaschenbündel (b) und ein Korb mit Flaschen für den Transport (c).

Wasserstoffgas kann auf 20-100 MPa komprimiert werden. Die Hauptprobleme bei der Speicherung von Wasserstoff als komprimiertes Gas sind die für den Kompressionsprozess benötigte Energiemenge, die inhärenten Sicherheitsprobleme bei der Speicherung von Wasserstoff unter so hohem Druck sowie die zusätzlichen Kosten und das Gewicht von Zylindern, die für die Speicherung von Wasserstoff unter hohem Druck ausgelegt sind.

Probleme wie Permeation und Versprödung sind proportional zum Gasdruck, weshalb sie bei höheren Drücken ein größeres Problem darstellen können. In Europa haben die meisten transportablen Gasflaschen nur ein Ventil als Sicherheitsmerkmal. In den USA sind ortsbewegliche Gasflaschen mit Druckentlastungsvorrichtungen ausgestattet. Diese Vorschrift ist sehr umstritten, da sie oft zu Leckagequellen werden. Die Speicherung von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff wird in der Regel in stationäre Wasserstoffspeichersysteme und in die Bordspeicherung von Wasserstoff in BZ-Fahrzeugen integriert [1].

Kryogener Wasserstoff entsteht, wenn er auf eine Temperatur unterhalb seines Siedepunkts von 20 K (- 253 °C) abgekühlt wird und stellt die zweite große Kategorie der Wasserstoffspeicherung dar. In dieser Form kann Wasserstoff entweder für einige Zeit gespeichert oder transportiert werden. Diese Speichermöglichkeit ist ebenfalls sehr kostspielig, da für die Verflüssigung viel Energie benötigt wird. Die Kosten und das Gewicht geeigneter Materialien für die Speicherung und Aufrechterhaltung des Wasserstoffs bei niedrigen Temperaturen müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Wasserstoff kann auch entweder innerhalb der Struktur oder auf der Oberfläche bestimmter fester Materialien gespeichert werden. Bei dieser Speichermethode sind weder hohe Drücke noch niedrige Temperaturen wie bei den beiden vorgenannten Methoden erforderlich; dies bietet Vorteile hinsichtlich der Sicherheit der Materialien. Es gibt drei Hauptmechanismen für die Speicherung von Wasserstoff in Materialien: Absorption, Adsorption (Abbildung 9a) und chemische Reaktionen (Abbildung 9, b-d). Beispiele für Materialien und Verbindungen, die sich für die feste Wasserstoffspeicherung eignen, sind in Abbildung 9 dargestellt.

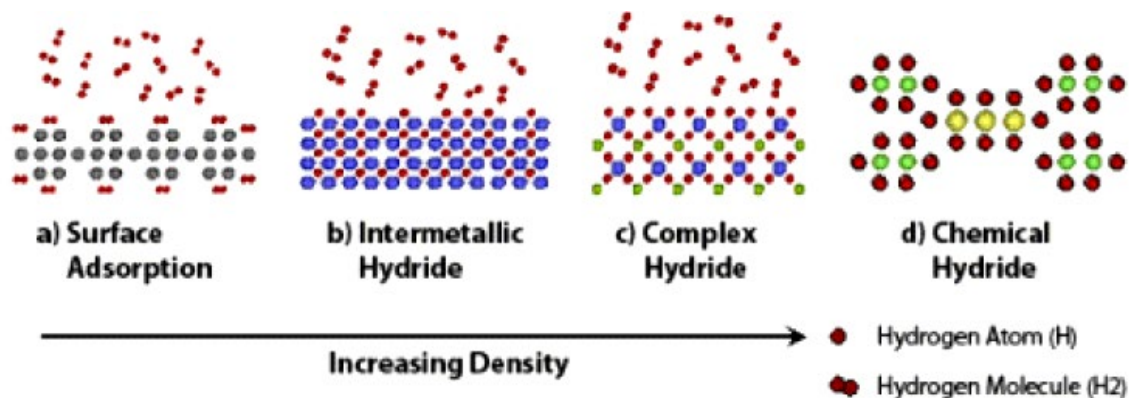


Abbildung 9. Als Feststoffspeicher für Wasserstoff verwendete Materialien [2]

Alle drei Optionen haben ihre eigenen Vor- und Nachteile, auch die Sicherheitsaspekte sind unterschiedlich und werden in Vortrag 3 über die "Sicherheit der Wasserstoffspeicherung" ausführlich behandelt. Wasserstoffspeichersysteme können für verschiedene Zwecke verwendet werden: als Behälter für den Transport, als stationäre Speichersysteme vor Ort (unter oder über der Erde) oder als Bordtanks in BZ-Fahrzeugen.



3.3 Wasserstoffnutzung in der Industrie

Wasserstoff wird seit mehr als 100 Jahren in der Industrie verwendet und sicher als komprimiertes oder verflüssigtes Gas gelagert. Wasserstoff wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, z. B. bei der Raffination von Rohöl, als Kühlmittel in großen Turbinengeneratoren, als Treibstoff für Raketenantriebe und Raketen, bei der Herstellung von Ammoniak für Düngemittel, in der Metallurgie zur Gewinnung reiner Metalle aus ihren Erzen, in der Halbleiter-, Glas-, Pharma-, Petrochemie-, Chemie- und Lebensmittelindustrie usw. Aus den Statistiken über Unfälle im Zusammenhang mit Wasserstoff geht hervor, dass derzeit Unfälle in Laboratorien am häufigsten vorkommen (etwa 32 %) [3]. Die niedrige Unfallrate lässt sich durch die strengen Sicherheitsmaßnahmen erklären, die bereits für die Herstellung und Endnutzung von Wasserstoff gelten. Dieser Trend könnte sich jedoch in den kommenden Jahren aufgrund der Ausweitung der FCH-Anwendungen auf den öffentlichen Bereich und der häufigeren Nutzung von FCH-Technologien durch Privatpersonen ohne spezielle Sicherheitsschulung ändern. Aus den Berichten über Zwischenfälle geht auch hervor, dass nur ein kleiner Teil der bisher erfassten Zwischenfälle den Verlust von Menschenleben zur Folge hatte (4,6 %) [4]. Obwohl die Sicherheit von Wasserstoff in der Industrie bisher gut kontrolliert wurde, sind sowohl im Verkehrssektor als auch in privaten Haushalten zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen erforderlich, vor allem wegen des hohen Drucks, der bei der Speicherung von Wasserstoff verwendet wird. Wasserstoff ist nicht mehr oder weniger gefährlich als andere entflammable Brennstoffe wie Benzin und Erdgas. Einige seiner Eigenschaften wie der Auftrieb bieten sogar Sicherheitsvorteile im Vergleich zu anderen Brennstoffen. Allerdings muss mit allen brennbaren Brennstoffen verantwortungsvoll umgegangen werden. Wie Benzin und Erdgas ist auch Wasserstoff brennbar und kann sich unter bestimmten Bedingungen gefährlich verhalten. Wasserstoff kann sicher gehandhabt werden, wenn einfache Richtlinien befolgt werden und der Benutzer über ein gutes Wissen über sein einzigartiges Verhalten verfügt. Das Verständnis der spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff und die Kenntnis der FCH-Anwendungen führen zu einem sicheren Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff. Es ist notwendig, in unserer Gesellschaft eine neue Sicherheitskultur zu schaffen, innovative Sicherheitsstrategien und bahnbrechende technische Lösungen zu entwickeln. Es wird erwartet, dass das Sicherheitsniveau an der Schnittstelle zwischen Verbraucher und Wasserstoff ähnlich oder höher sein muss als bei der Verwendung fossiler Brennstoffe. Daher werden die Sicherheitsparameter von Wasserstoff- und Brennstoffzellenprodukten direkt über ihre Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt entscheiden [5].

4. BZ-Fahrzeuge

FCH-Technologien für Straßen- und Spezialfahrzeuge sind heute von großer Bedeutung. Einige Automobilhersteller wie Toyota haben bereits mit dem Verkauf von BZ-Fahrzeugen in den Regionen begonnen, in denen die Betankungsinfrastruktur bereits vorhanden ist. Zu den



Beispielen für Straßenfahrzeuge gehören Personenkraftwagen, Busse, Motorroller, leichte Nutzfahrzeuge usw. Sie verwenden Wasserstoff als Kraftstoff und haben keine herkömmlichen Motoren, da stattdessen der BZ- und der Elektromotor eingesetzt werden. Die Verfügbarkeit der Infrastruktur ist ein wichtiger Schritt zum kommerziellen Erfolg dieser Produkte. Vom Aussehen her ähneln diese Fahrzeuge herkömmlichen Fahrzeugen. Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen stoßen sie keine Schadstoffe aus und sind im Betrieb sehr leise. Eine weitere wichtige Anwendung sind Spezialfahrzeuge. Die Spezialfahrzeuge sind für bestimmte Zwecke konzipiert und werden in der Regel in Flotten eingesetzt. BZ-Gabelstapler sind ein gutes Beispiel für Spezialfahrzeuge. Diese Art von Fahrzeugen benötigt eine Leistung von 1,5 bis 10 kW. Derzeit investieren viele Privatunternehmen in eine Flotte von BZ-Gabelstaplern und eine Betankungsinfrastruktur, da sie von deren Einsatz fast sofort profitieren.

4.1 Die wichtigsten Merkmale von BZ-Fahrzeugen

BZ-Fahrzeuge haben einen elektrischen Antriebsstrang, der von einem BZ angetrieben wird, der in einer elektrochemischen Reaktion mit Wasserstoff Strom erzeugt. Es gibt zwar eine Vielzahl von Prototypen von BZ-Fahrzeugen, aber die folgenden Hauptmerkmale ([Abbildung 10](#)) sind den meisten von ihnen gemeinsam [6]:

- Wasserstoffbetankungsanlage;
- Wasserstoff-Speichersystem;
- System zur Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff;
- BZ-System;
- Elektrischer Antrieb und Energiemanagementsystem.

Beim Betanken wird dem Fahrzeug über den Tanknippel (A) Wasserstoff zugeführt, der in das Wasserstoffspeichersystem (B) fließt. Der zugeführte Wasserstoff wird im Wasserstoffspeicher gespeichert, normalerweise in komprimierter, gasförmiger Form. Wenn ein BZ-Fahrzeug startet, wird Wasserstoffgas aus dem Speichersystem freigesetzt. Druckregler und andere Geräte im Wasserstoffzufuhrsystem (C) reduzieren den Druck auf den für den Betrieb des BZ geeigneten Wert. Der Wasserstoff wird im BZ-System (D) elektrochemisch mit Sauerstoff kombiniert, um elektrischen Hochspannungsstrom zu erzeugen. Diese elektrische Energie wird an das Energiemanagementsystem des Elektroantriebs (E) weitergeleitet, wo sie zum Antrieb der elektrischen Antriebsmotoren oder zum Laden von Batterien und Ultrakondensatoren verwendet wird.

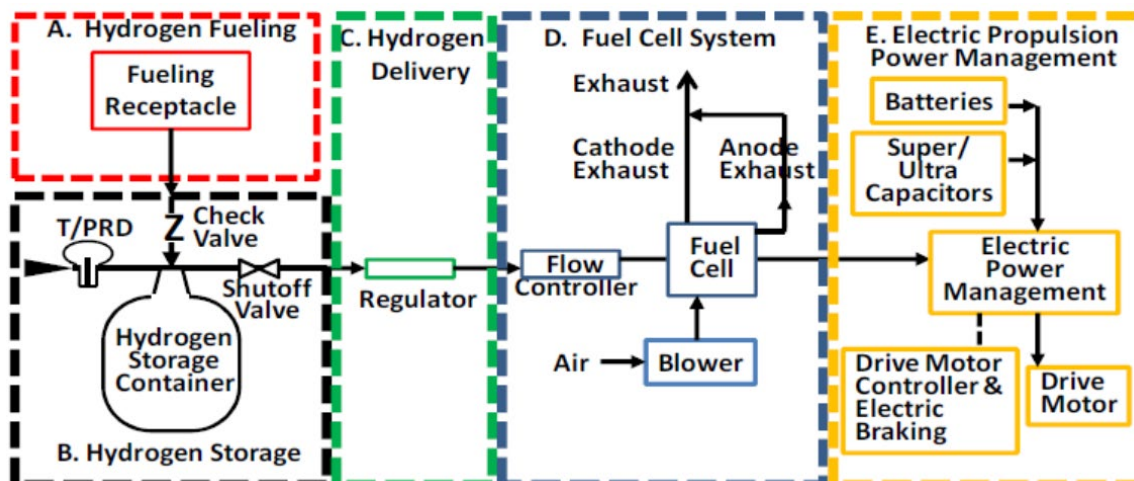


Abbildung 10. Die wichtigsten Systeme eines BZ-Fahrzeugs [6]

4.2 BZ-Fahrzeuge

Abbildung 11 zeigt eine typische Anordnung der wichtigsten Komponenten eines typischen BZ-Fahrzeugs [6]. Der Tankbehälter befindet sich wie bei anderen Fahrzeugen auch an der hinteren Seitenwand des Fahrzeugs. Wie bei den Benzinbehältern sind auch die Wasserstoffspeicher in der Regel quer im Heck des Fahrzeugs angebracht, können aber auch anders, z. B. in Längsrichtung im Mitteltunnel des Fahrzeugs, montiert werden. Brennstoffzellen und Nebenaggregate sind in der Regel unter dem Fahrgastraum untergebracht, ebenso wie das Energiemanagement, die Antriebsmotorsteuerung und die Antriebsmotoren. In Anbetracht der Größe und des Gewichts von Antriebsbatterien und Ultrakondensatoren werden diese Komponenten in der Regel im Fahrzeug untergebracht, um das gewünschte Gewichtsgleichgewicht für die richtige Handhabung des Fahrzeugs zu erhalten.

Der Wasserstoff kann dem Fahrzeug an einer Tankstelle zugeführt werden. Gegenwärtig wird Wasserstoff meist als komprimiertes Gas mit einem Druck von bis zu 125 % des Nennbetriebsdrucks (nominal working pressure, NWP) des Fahrzeugs an die Fahrzeuge abgegeben, um die vorübergehende Erwärmung durch die adiabatische Kompression beim Betanken auszugleichen.

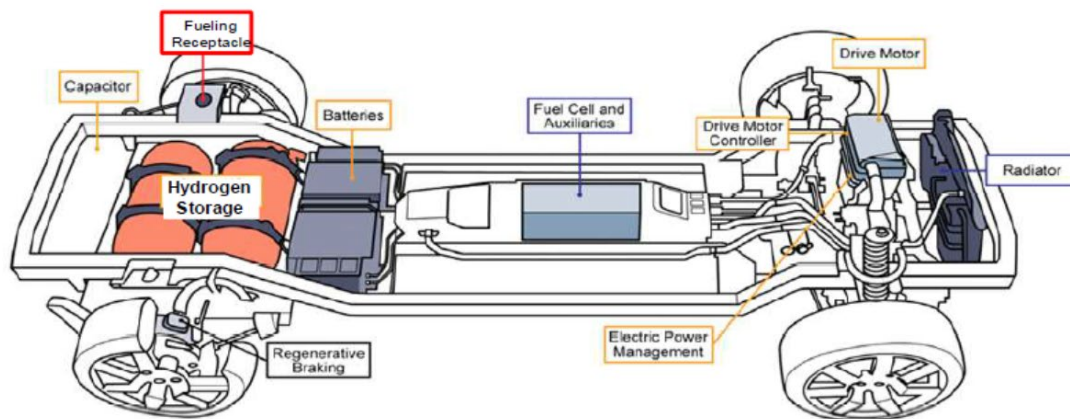


Abbildung 11. Ein Beispiel für ein BZ-Fahrzeug [6].

4.2.1 Wasserstoff-Speichersystem

Die wichtigsten Funktionen des Wasserstoffspeichersystems sind die Aufnahme von Wasserstoff beim Tanken, die Speicherung des Wasserstoffs, bis er benötigt wird, und die anschließende Abgabe von Wasserstoff an das BZ-System zum Betrieb des Fahrzeugs. Gegenwärtig ist die gängigste Methode zur Speicherung und Abgabe von Wasserstoff an Bord die Form von Druckgas (CGH_2). Die leichten 700-bar-Druckgasflaschen wurden entwickelt, um die Speicherkapazität zu erhöhen. Sie bestehen aus einer metallischen (Typ III) oder polymeren (Typ IV) Auskleidung in einer faserverstärkten Verbundstruktur (Abbildung 12). Es wird daran gearbeitet, die Kosten für diese Flaschen zu senken. Weitere Informationen über Wasserstoffspeichersysteme an Bord von Fahrzeugen werden in den folgenden Vorträgen zur Verfügung stehen.



(a)

(b)

Abbildung 12. Im Rahmen des europäischen Projekts STORHY entwickelte und getestete 700-bar-Zylinderprototypen: (a) Typ III-Technologie, (b) Typ IV-Technologie.

4.2.2 System zur Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff

Das Wasserstoffzufuhrsystem überträgt den Wasserstoff vom Speichersystem zum Antriebssystem mit dem für den Betrieb des BZ erforderlichen Druck und der erforderlichen Temperatur. Dies wird durch eine Reihe von Durchflussregelventilen, Druckreglern, Filtern, Kraftstoffleitungen (Rohren) und Wärmetauschern erreicht. Die meisten Kraftstoffleitungen sind silberfarben, aber manchmal können sie auch rot sein. Wenn der Tank aufgrund eines Zwischenfalls abgeschaltet wird, befindet sich nur eine geringe Menge Wasserstoff in diesen



Leitungen. Die Einsatzkräfte sollten die Kraftstoffleitungen bei der Bergung jedoch nicht durchschneiden.

4.2.3 BZ-System

Das BZ-System erzeugt den Strom, der für den Betrieb der Antriebsmotoren und zum Laden der Fahrzeugbatterien und/oder Kondensatoren benötigt wird. Es gibt verschiedene Arten von BZs, aber PEM-Brennstoffzellen werden aufgrund ihrer niedrigeren Betriebstemperatur, die eine kürzere Anlaufzeit ermöglicht, am häufigsten in Kraftfahrzeugen eingesetzt. PEM-Brennstoffzellen kombinieren elektrochemisch Wasserstoff und Sauerstoff, um elektrischen Strom zu erzeugen. Brennstoffzellen sind in der Lage, kontinuierlich Strom zu erzeugen, wenn sie mit Wasserstoff und Sauerstoff versorgt werden, und gleichzeitig Strom und Wasser zu erzeugen, ohne Kohlendioxid (CO₂) oder andere schädliche Emissionen zu produzieren, die für Benzin-/Dieselmotoren typisch sind. Im Allgemeinen erzeugen die Brennstoffzellenstapel in einem leichten Personenkraftwagen eine Spannung von etwa 400 V DC. Ein Konverter verbindet die Brennstoffzelle außerdem mit der Hochspannungsbatterie. Die Betriebstemperatur der BZ ist viel niedriger als bei Verbrennungsmotoren, da sie effizienter ist.

4.2.4 Elektrischer Antrieb und Energiemanagementsystem

Die vom BZ-System (BZ-Stapel) erzeugte elektrische Energie wird zum Antrieb von Elektromotoren verwendet, die das Fahrzeug antreiben, sowie zum Antrieb eines Luftpumpenmotors und eines Klimaanlage-motors. Viele BZ-Personenwagen haben Vorderradantrieb, wobei der elektrische Antriebsmotor und der Antriebsstrang im "Motorraum" quer über der Vorderachse angebracht sind; andere Konfigurationen und Hinterradantrieb sind jedoch ebenfalls möglich. Größere BZ-Fahrzeuge vom Typ Sport Utility Vehicle können einen Allradantrieb mit Elektromotoren an der Vorder- und Hinterachse oder mit kompakten Motoren an jedem Rad haben. Das Hochspannungsbatteriepaket befindet sich in der Regel in einem Metallgehäuse und ist fest in den Rahmen eingebaut. In verschiedenen BZ-Fahrzeugen werden unterschiedliche Batterietypen wie Nickel-Metallhydrid oder Lithium-Ionen verwendet. Weitere Hochspannungskomponenten können ein BZ-Trennschalter, ein Batteriespannungssteuergerät, ein Gleichspannungswandler, eine Antriebseinheit und eine elektrische Heizung sein. Der Strom aus dem BZ-Stapel und der Hochspannungsbatterie wird über eine Reihe von Kabeln zu den Motoren geleitet, die sich in der Regel in oder hinter geschlossenen Hochspannungskomponenten und unter dem Fahrzeug befinden. Sie sind leicht an den markanten orangefarbenen Schutzabdeckungen zu erkennen.

4.2.5 Sicherheitsmerkmale und -konzepte

Die BZ-Fahrzeuge werden über eine spezielle Zapfpistole an der Zapfsäule einer Tankstelle betankt, die mit dem Tanknippel des Fahrzeugs verbunden ist, um ein "geschlossenes System" für die Wasserstoffzufuhr zum Fahrzeug zu schaffen. Der Tanknippel des Fahrzeugs enthält

ein Rückschlagventil oder eine andere Vorrichtung, die verhindert, dass Wasserstoff aus dem Fahrzeug austritt, wenn der Tanknippel abgenommen wird.

Die Bestandteile eines typischen Druckwasserstoffspeichersystems sind in [Abbildung 13](#) dargestellt. Das System umfasst den Behälter und alle anderen Komponenten, die die "primäre Druckgrenze" bilden, die verhindert, dass Wasserstoff aus dem System entweicht. Zu einem Druckwasserstoffspeicher gehören drei Sicherheitseinrichtungen:

- Ein Rückschlagventil;
- Ein Absperrventil;
- Eine thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtung (TPRD).

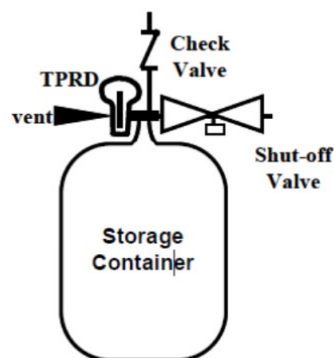


Abbildung 13. Ein typisches System zur Speicherung von Druckwasserstoff [6]

Bei der Betankung gelangt der Wasserstoff durch ein Rückschlagventil in das Speichersystem. Das Rückschlagventil verhindert den Rückfluss von Wasserstoff in die Betankungsleitungen. Ein automatisches Wasserstoff-Absperrventil verhindert den Abfluss des gespeicherten Wasserstoffs, wenn das Fahrzeug nicht in Betrieb ist oder wenn eine Störung festgestellt wird, die eine Isolierung des Wasserstoffspeichersystems erfordert. Im Falle eines Brandes sorgen thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtungen (TPRD) für eine kontrollierte Freisetzung des Gases aus den Druckwasserstoffspeichern, bevor die hohen Temperaturen des Feuers die Behälterwände schwächen und zu einem gefährlichen Bersten führen. TPRDs sind so konzipiert, dass sie den gesamten Inhalt des Behälters schnell entlüften. Sie sind nicht wieder verschließbar und ermöglichen keine erneute Druckbeaufschlagung des Behälters. Es wird erwartet, dass Lagerbehälter und TPRDs, die einem Feuer ausgesetzt waren, außer Betrieb genommen und zerstört werden. Der Wasserstoff wird normalerweise (aber nicht immer) über eine Entlüftungsleitung aus dem BZ-Fahrzeug abgeleitet. Die genaue Lage dieser Entlüftungsleitungen hängt vom Fahrzeughersteller und -modell ab, befindet sich aber in der Regel im hinteren Teil des Fahrzeugs, in der Nähe des Wasserstofftanks [6]. Das Kraftstoffzufuhrsystem muss den Druck von den Werten im Wasserstoffspeicher auf die für das Brennstoffzellensystem erforderlichen Werte reduzieren. Bei einem Kompressionswasserstoffspeicher mit 70 MPa nominalem Arbeitsdruck beispielsweise muss der Druck von 87,5 MPa auf weniger als 1 MPa am Einlass des Brennstoffzellensystems



reduziert werden. Dies kann eine mehrstufige Druckregulierung erfordern, um eine genaue und stabile Regelung und einen Überdruckschutz der nachgeschalteten Geräte im Falle eines Druckreglerausfalls zu erreichen. Der Überdruckschutz des Brennstoffzufuhrsystems kann durch Ablassen von überschüssigem Wasserstoffgas über Druckbegrenzungsventile oder durch Absperrn der Wasserstoffgaszufuhr (durch Schließen des Absperrventils im Wasserstoffspeichersystem) erreicht werden, wenn ein stromabwärts gelegener Überdruckzustand festgestellt wird [6]. In BZ-Fahrzeugen befindet sich eine Reihe von Wasserstoffsensoren. Wenn ein potenziell gefährliches Wasserstoffleck entdeckt wird, unterbricht die Systemsteuerung automatisch den Wasserstofffluss aus dem Tank. Die Sensoren befinden sich an verschiedenen Stellen: auf der Instrumententafel, neben den Wasserstofftanks, in der Nähe eines Auspuffrohrs, unter der Motorhaube, über dem Dachhimmel im Fahrgastraum, usw. Wenn das Antriebssystem eingeschaltet ist, überwachen diese Sensoren kontinuierlich die Wasserstoffkonzentration in diesen Bereichen. Gemäß der US-amerikanischen Standardarbeitsanweisung (standard operation procedure, SOP) für Einsatzkräfte wird der Fahrer bei Erreichen einer "Warnstufe" durch das "H₂"-Symbol in der Instrumententafel gewarnt, und im Informationszentrum des Fahrenden (Driver's Information Centre, DIC) erscheint die Meldung "H₂ Detected". Wird Wasserstoff in einer "Alarmstufe" erkannt, blinkt das "H₂"-Symbol, es ertönt ein Signalton und im DIC erscheint die Meldung "H₂ erkannt - Fahrzeug evakuieren" [7]. Es ist erwähnenswert, dass in den verschiedenen Ländern unterschiedliche Normen mit unterschiedlichen Gefahrenstufen angewendet wurden, obwohl die allgemeinen SOPs ähnlich waren. Unterschiedliche Wasserstoffkonzentrationen lösen in den verschiedenen Ländern unterschiedliche Warnstufen aus.

4.3 BZ-Busse

BZ-Busse verwenden die gleiche Technologie wie BZ-Pkw. Der Wasserstoff wird in Tanks gespeichert, die sich in der Regel auf dem Dach des Busses befinden. Die Gesamtkapazität liegt im Bereich von 40 Kilogramm. Der Brennstoffzellenstapel befindet sich im hinteren Motorraum. Der Brennstoffzellenstapel für Busse ist größer als der für BZ-Pkw und erzeugt eine höhere Spannung von etwa 600 V. Die Hauptvorteile von BZ-Bussen im Vergleich zu herkömmlichen Bussen sind die geringere Umweltverschmutzung, die geringere Konzentration von Treibhausgasen, die höhere Energieeffizienz und der leisere Betrieb. Es gibt eine Reihe von europäischen Projekten, die sich mit dem wasserstoffbasierten Verkehr befassen. Die Clean Energy Partnership (CEP) [8] *beispielsweise* ist ein Projekt, das darauf abzielt, den Einsatz von FCH-Technologien in Verkehrsanwendungen zu testen und zu demonstrieren. Die CEP wurde 2002 gegründet und ist eine internationale Kooperation von 18 Partnern, darunter führende Automobilhersteller wie die BMW Group, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota und Volkswagen. Im Jahr 2011 ging die CEP in ihre dritte Phase "Marktvorbereitung" über. Ein weiteres Projekt ist HyFLEET: CUTE, das darauf abzielt, die weltweit größte Flotte von BZ-Bussen zu entwickeln und zu betreiben. Im Rahmen des HyFLEET: CUTE-Projekts wurden 47 wasserstoffbetriebene Busse in 10 Städten auf drei

Kontinenten (Amsterdam, Barcelona, Peking, Hamburg, London, Luxemburg, Madrid, Perth, Reykjaví) im öffentlichen Linienverkehr eingesetzt [9]. Diese Busse haben den Entwicklern und Betreibern erfolgreich wertvolle Daten geliefert, da sie unter rauen Bedingungen, durch ununterbrochenen Betrieb und extreme klimatische Bedingungen eingesetzt werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt dieses Projekts war es, die Öffentlichkeit mit dieser neuen Technologie vertraut zu machen und dadurch die Akzeptanz der Öffentlichkeit für ihre Einführung zu gewinnen [9]. In London verkehren jetzt 8 BZ-Busse auf der Linie RV1 zwischen Covent Garden und Tower Gateway (Abbildung 14). Ein auf sechs Jahre angelegtes Projekt des Gemeinsamen Unternehmens FCH (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe), das im Januar 2017 startete, zielt darauf ab, 139 neue emissionsfreie Brennstoffzellenbusse und die dazugehörige Betankungsinfrastruktur in fünf Ländern einzusetzen. Das im Januar 2018 gestartete Folgeprojekt JIVE2 kombiniert das JIVE-Projekt und wird bis Anfang der 2020er Jahre fast 300 Brennstoffzellenbusse in 22 Städten in ganz Europa einsetzen - der bisher größte Einsatz in Europa. (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>)



Abbildung 14. Wasserstoffbetriebener Bus Wright Pulsar 2 auf der Linie RV1 in London.

"BZ-Busse haben sich in den letzten Jahrzehnten erheblich weiterentwickelt. Es wurde eine Reihe verschiedener Konstruktionskonfigurationen verwendet, darunter Wasserstoff in Verbrennungsmotoren und verschiedene Brennstoffzellentechnologien. Darüber hinaus haben Unternehmen Direktantriebssysteme und Hybridantriebssysteme verwendet, bei denen ein Energiespeicher (Batterie oder Ultrakondensator) in den Antriebsstrang integriert ist, um Lastspitzen zu reduzieren und regeneratives Bremsen zu ermöglichen" [10]. Ein kurzer Vergleich zwischen den wichtigsten Wasserstoffbus-Technologien wird in dem im Rahmen des NextHyLights-Projekts [10] erstellten Bericht vorgestellt. Abbildung 15 zeigt ein Layout des "All American" FC-Busses von SunLine [11]. In diesem Beispiel wird Wasserstoff als komprimiertes Gas (CGH₂) gespeichert. Adams [12] untersuchte den optimalen Speicherdruck, der für Busse mit CGH₂-Tanks erforderlich wäre. Er kam zu dem Schluss, dass eine genormte bordseitige Speicherdruckbegrenzungseinrichtung erforderlich ist, um

sicherzustellen, dass ein Fahrzeug nicht mit einem höheren Druck als dem Speicherdruck, für den es ausgelegt ist, betankt wird. Diese Normung wäre auch notwendig, um unnötige Systementwicklungskosten für Fahrzeuge und die zugehörige Betankungsinfrastruktur zu reduzieren und das Risiko zu verringern, dass Betankungsschnittstellen aufgrund von Inkompatibilität beschädigt werden. Die Kompressionsenergie des Gases in einem Behälter nimmt bei einer gegebenen Wasserstoffmasse mit zunehmendem Speicherdruck zu; daher könnte eine plötzliche Ausdehnung des Gases aufgrund eines Bruchs des Behälters schwerwiegende Folgen haben, die sich mit zunehmendem Druck noch verstärken würden. Bei der Betrachtung von Speichersystemen für Busse, bei denen das Volumen keine so entscheidende Rolle spielt wie bei Autos, wurde daher festgestellt, dass der optimale Druck für gelenkfreie einstöckige Stadtbusse zwischen 20 und 35 MPa liegt [12].

Die in BZ-Bussen verwendeten Sicherheitsvorrichtungen ähneln denen in BZ-Pkw. Die Druckentlastungsvorrichtung (pressure relief device, PRD) ist eine nicht wieder schließende, thermisch aktivierte Vorrichtung, die einen unter Druck stehenden Wasserstofftank vor einem katastrophalen Ausfall in einer Notsituation wie einem Brand schützen soll. Sie soll sicherstellen, dass die durch Flammen verursachte Wärmeeinwirkung den Druck im Speicherbehälter nicht über seine strukturelle Kapazität hinaus ansteigen lässt. Es ist jedoch zu beachten, dass Brände, bei denen sich ein PRD öffnet, nicht unbedingt zu einer unmittelbaren Entzündung des Wasserstoffs bei der Freisetzung führen. Die Wasserstofftanks sind mit thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtungen (TPRDs) und Kraftstoff- und Entlüftungsleitungen aus Edelstahl ausgestattet. Es gibt einen Notabschaltknopf (Emergency Shut-down Device, ESD) an der Fahrerkonsole und einen an der Brennstoffzelle selbst im Motorraum.

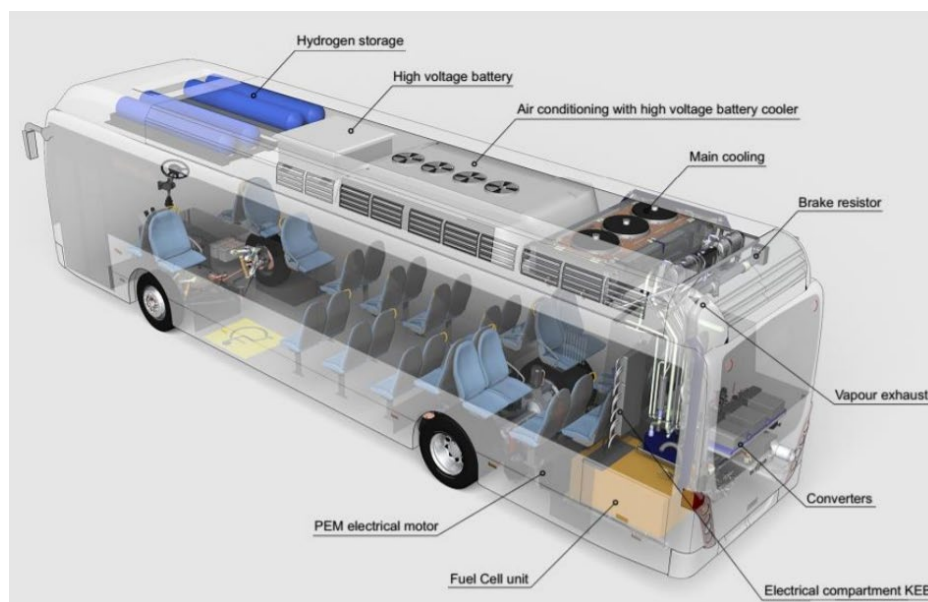


Abbildung 15. Aufbau der Hauptkomponenten eines FC-Busses [11]



Die Ersthelfer müssen lernen, wie sie bei Verkehrsunfällen mit BZ-Fahrzeugen umgehen müssen. Die Hauptgefahren liegen in der hohen Spannung (bis zu 600 V) und dem hohen Gasdruck (bis zu 70 MPa). Für verschiedene Arten von Straßenfahrzeugen schreibt die Verordnung EC79/2009 in Verbindung mit EC406/2010 die Kennzeichnung von BZ-Fahrzeugen vor: Bei leichten Nutzfahrzeugen muss das Etikett gut sichtbar in der Nähe der Betankungsöffnung angebracht werden (ein weiteres Etikett sollte sich im Motorraum befinden). Derzeit wird an der Aktualisierung der Leitlinien in diesem Bereich gearbeitet, und den Verantwortlichen wird empfohlen, die Anforderungen an die Kennzeichnung zu bestätigen, z. B. in der UN ECE-Arbeitsgruppe 13 (<https://unece.org/wp29-introduction>).

Rettungsdatenblätter sollten für alle BZ-Fahrzeuge verfügbar sein und sich an Bord des Fahrzeugs befinden. Im Idealfall haben die Feuerwehren über Kommunikationsverbindungen Zugang zu diesen Informationen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass der Zugang zu diesen Informationen sehr unterschiedlich ist und nicht immer möglich ist. Die Fahrzeugidentifizierungsparameter sollten auch alle Hochspannungs- und Hochdruckmerkmale enthalten, um die Einsatzkräfte rechtzeitig zu informieren. Ähnlich wie bei konventionell betriebenen Fahrzeugen können die folgenden Komponenten bei einem Verkehrsunfall eine Gefahr für die Ersthelfer darstellen: Stoßfänger, Stoßdämpfer, Reifen, Motorhauben- und Kofferraumstreben, Airbags, Gurtstraffer, Klimaanlage und Batterien. Bitte beachten Sie, dass durch das Abklemmen eines Niederspannungskabels alle Fahrzeugsysteme (z. B. Wasserstoffspeicher, Hoch- und Niederspannungssysteme) in einem BZ-Fahrzeug isoliert und abgeschaltet werden.

4.4 BZ-Gabelstapler

Viele Unternehmen mit großen Lagern oder Vertriebszentren setzen derzeit BZ-Gabelstapler für den Warentransport ein, die rund um die Uhr in Betrieb sind [1]. BZ-Gabelstapler sind Hybridfahrzeuge, die eine Brennstoffzelle, in der Regel von 1,5 bis 10 kW, mit einer Batterie verbinden. Die Wasserstoffflaschen werden außerhalb der Einrichtung/Lagerhalle gelagert. Der Wasserstoff wird entweder von einem Industriegaslieferanten an den Standort geliefert oder vor Ort durch Erdgasreformierung oder Wasserelektrolyseverfahren hergestellt. Die Betankung eines verbrennungsmotorischen Gabelstaplers mit Wasserstoff erfolgt meist in geschlossenen Räumen (es sind aber auch Zapfsäulen im Freien möglich) und dauert nur wenige Minuten. Im Vergleich zu batteriebetriebenen Spezialfahrzeugen haben BZ-Gabelstapler eine längere Lebensdauer, verfügen über mehr Leistung über einen längeren Zeitraum und können in weniger als 3 Minuten betankt werden. Ein weiterer Pluspunkt der BZ-Stapler sind die niedrigeren Betriebskosten und die höhere Produktivität aufgrund der geringeren Anzahl von Fahrten zu einer Batterieladestation. Da keine Batterieladegeräte, Lager oder Batteriewechselbereiche erforderlich sind, steht mehr Lagerfläche für andere Zwecke zur Verfügung. Die wichtigsten Industrielieferanten bieten Wasserstofftankstellen für BZ-

Gabelstapler an. Ein Beispiel für einen BZ-Gabelstapler und die Brennstoffzelleneinheit sind in [Abbildung 16](#) zu sehen.



A FC-Gabelstapler



FC-Brennstoffzelle eines Gabelstaplers

Abbildung 16. Ein FC-Gabelstapler und seine FC-Einheit [1]

Die Hauptbestandteile einer FC-Einheit sind in [Abbildung 17](#) dargestellt. Sie umfassen:

- Brennstoffzelle (PAC genannt);
- Hilfsmittel für Brennstoffzellen;
- Wasserstoffspeicher, dessen Volumen zwischen 20 und 70 l in Wasser variiert und der mit einem Reglersystem ausgestattet ist;
- Lithium-Ionen-Batterie, die die von den Vereinten Nationen (UNO) geforderten Tests gemäß dem Handbuch der Vereinten Nationen für Tests und Kriterien, Abschnitt 38.3, bestanden hat;
- Wasserauffangbehälter.

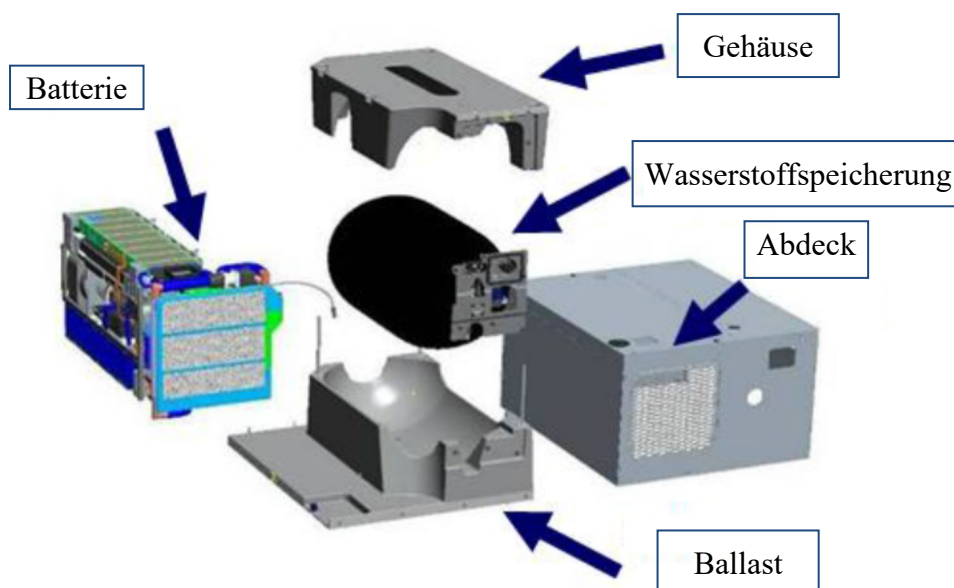


Abbildung 17. Komponenten der Brennstoffzelleneinheit für Gabelstapler



Aus Sicherheitsgründen ist der Wasserstoffspeicher mit einem TPRD (ausgelöst durch eine Thermosicherung) geschützt, der sich zwischen dem Absperrventil des Gabelstaplers und dem Zylinder befindet. Die Sicherung öffnet sich bei 109°C und ermöglicht ein schnelles Ablassen des unter Druck stehenden Wasserstoffs. Ein Rückschlagventil an der Füllöffnung verhindert, dass Gas aus dem Speicher entweicht. Außerdem sind alle Komponenten der BZ in ein Gehäuse aus Gusseisen eingebaut, das wiederum durch eine Abdeckung geschützt ist. Dieses Gusseisengehäuse hat zwei Vorteile: Es bietet Schutz gegen äußere mechanische Beschädigungen und ermöglicht die Entlüftung des Wasserstoffstroms im Falle eines äußeren thermischen Angriffs.

4.5 Luftfahrt

Die Erforschung der Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff in Flugzeugen begann im Jahr 1956. Den Vereinigten Staaten gelang es, ein Canberra-Flugzeug des Typs B57 zu fliegen, das in einem seiner Triebwerke mit Helium unter Druck gesetzten Wasserstoff als Treibstoff verwendete [13]. Nach der B57 testeten die Sowjets 1988 die experimentelle Umrüstung einer frühen Tu-154, deren eines Triebwerk mit Wasserstoff betrieben wurde. Der mit flüssigem Wasserstoff betriebene Motor wurde in Höhen von bis zu 7000 m getestet und auf 900 km/h beschleunigt. Leider wurde das Flüssigwasserstoffprogramm auf nur fünf Flüge reduziert, und es wurde beschlossen, wegen der hohen Kosten und der mangelnden Infrastruktur für Wasserstoff nicht mit solchen Kraftstoffen fortzufahren [14]. Bis heute wurden viele Wasserstoff-Prototypen wie die Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), die Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), die Boeing Phantom Eye (Jackson und Haddox, 2010) und die ENFICA-FC Rapid 200-FC (Europäische Kommission, 2011) unter Verwendung von Kompressions- und Verflüssigungsspeicherverfahren gebaut [15]. Der historische Zeitplan für die Entwicklung von Flugzeugen mit Flüssigwasserstoff- und Brennstoffzellenantrieb ist in [Abbildung 18](#) dargestellt. Im September 2016 absolvierte das weltweit erste wasserstoffbetriebene, brennstoffzellenbetriebene viersitzige Passagierflugzeug HY4 seinen Erstflug vom Flughafen Stuttgart. In diesem zukünftigen Elektrotaxi wird der Wasserstoffkraftstoff mit einem Druck zwischen 4.300 PSI und 5.800 PSI in zwei Kohlefasertanks gespeichert, die sich beide in den beiden Rümpfen befinden. In diesem Flugzeug mit einer Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h wandelt die Brennstoffzelle den Wasserstoff direkt in Strom um, und das einzige Abfallprodukt, das bei diesem Prozess entsteht, ist Wasser [16]. Am 21. September 2020 hat Airbus drei Konzepte für das weltweit erste emissionsfreie Verkehrsflugzeug vorgestellt, das bis 2035 in Dienst gestellt werden könnte. Diese Konzepte stellen jeweils einen anderen Ansatz für einen emissionsfreien Flug dar, wobei verschiedene technologische Wege und aerodynamische Konfigurationen untersucht werden, um das Ziel des Unternehmens zu unterstützen, bei der Dekarbonisierung der gesamten Luftfahrtindustrie eine Vorreiterrolle zu übernehmen. Alle diese Konzepte setzen auf Wasserstoff als primäre Energiequelle - eine Option, die nach Ansicht von Airbus als sauberer Flugkraftstoff außerordentlich vielversprechend ist und für die Luft- und Raumfahrt

sowie viele andere Branchen eine Lösung zur Erreichung ihrer Klimaneutralitätsziele darstellen dürfte.

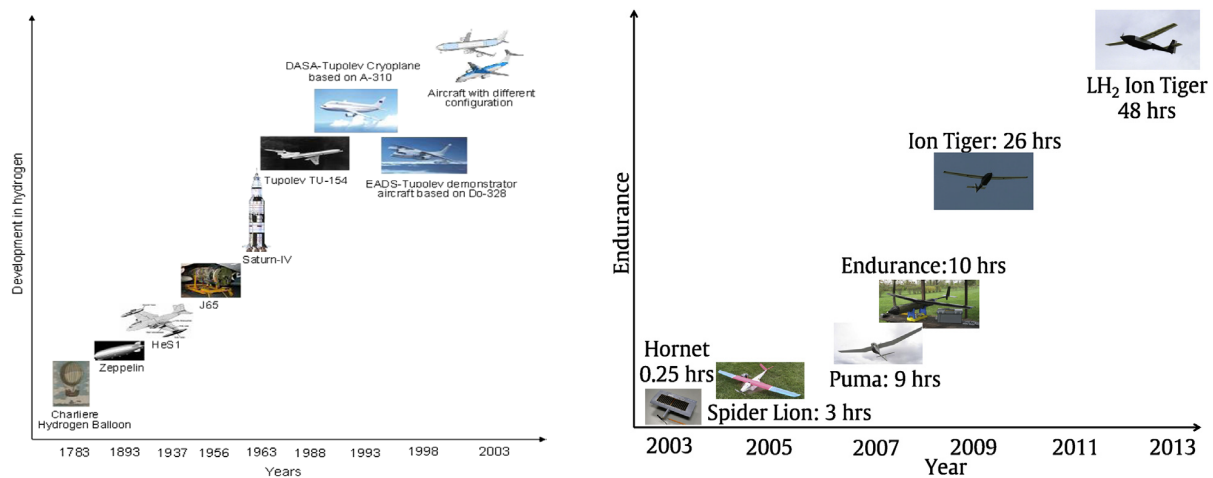


Abbildung 18 Historischer Entwicklungszeitplan für wasserstoff- (links) und brennstoffzellenbetriebene Flugzeuge (rechts)

Ein Flugzeug hat ein maximales Startgewicht von bis zu 640 Tonnen. Um diese Lasten zu befördern, werden große und leistungsstarke Triebwerke benötigt, die viel Kraftstoff benötigen. Dieser Kraftstoffbedarf bringt Vorteile und Herausforderungen in Bezug auf die Sicherheit des Kraftstoffs, die Kraftstoffkosten, die spezifische Energie und die äquivalente Energieeffizienz mit sich. Heutzutage verwenden Flugzeuge hauptsächlich Kraftstoffe auf Erdölbasis, die aus fossilen Brennstoffen gewonnen werden. Von diesen Kraftstoffen ist Kerosin, das am häufigsten verwendet wird, preiswerter als andere Kraftstoffe [15, 17]. Obwohl Kerosin und einige Benzinmischungen als Treibstoff für die Luftfahrt vorzuziehen sind, sind ihre Reserven begrenzt und die erhöhten Treibhausgasemissionen wirken sich negativ auf die Umwelt aus. Angesichts dieser Überlegungen denken Forscher und Hersteller über neue Wege und Formen der Energieversorgung mit alternativen/erneuerbaren Kraftstoffen nach.

Angesichts dieser Überlegungen werden die herkömmlichen fossilen Kraftstoffe in der Luftfahrt durch alternative Kraftstoffe ersetzt. Eines der wichtigsten Elemente der Kraftstofffamilie ist Wasserstoff. Wasserstoff ist in den letzten Jahren aufgrund seiner Verfügbarkeit, seiner besseren spezifischen Energieeigenschaften und seiner Umweltvorteile in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit von Forschern und Verbrennungsexperten gerückt.

Wasserstoff wird in der Regel auf zwei Arten in Flugzeugen verwendet, entweder als Kraftstoff anstelle von Kerosin in großen Flugzeugen oder als Kraftstoff in PEM-Brennstoffzellen in Düsentriebwerken in kleinen Propellerflugzeugen [15].

4.5.1 Wasserstoff als Antriebskraftstoff

Wasserstoff hat mit allen Eigenschaften, die für seine Verwendung als Kraftstoff erforderlich sind, den höchsten Energiegehalt pro Masseneinheit aller bekannten Kraftstoffe (2,8-mal höher



als im Vergleich zu Kerosin) [17, 18]. Diese Eigenschaft ist sehr wichtig, da sie eine höhere Nutzlast ermöglicht [19]. Ein weiterer Vorteil ist, dass Wasserstoff ein langfristiges Wachstum in der Luftfahrt verspricht, indem er die Umwelt schont [18].

Die Verwendung von Wasserstoff als Flugkraftstoff würde die meisten Treibhausgasemissionen (THG), einschließlich aller kohlenstoffhaltigen Emissionen, Ruß und Schwefeloxide, eliminieren [20]. Die wichtigsten Nebenprodukte von Wasserstoff in einem Verbrennungsprozess sind Wasserdampf und Stickoxide (NO_x) [21]. Die bei der Verbrennung von Wasserstoff freigesetzten NO_x -Emissionen sind jedoch äußerst gering im Vergleich zu denen, die bei der Verbrennung von Kerosin freigesetzt werden [22]. Darüber hinaus kann die Verwendung von Wasserstoff als Flugzeugtreibstoff zu langfristig stabilen Treibstoffpreisen führen und die Zuverlässigkeit der Treibstoffversorgung erhöhen, da er aus verschiedenen Quellen gewonnen werden kann, was die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, die nur in wenigen Regionen der Welt konzentriert sind, verringert [23, 24]. Daher wird Wasserstoff als geeignet für die Luftfahrtindustrie angesehen, da er eine saubere, zuverlässige und erschwingliche Energieversorgung mit äußerst geringen Schadstoffemissionen und somit geringen Auswirkungen auf die Umwelt bieten kann [21].

Damit Wasserstoff für die Luftfahrtindustrie rentabel ist, muss seine volumetrische Dichte oder Energiedichte pro Volumeneinheit erhöht werden [25, 26]. Im Vergleich zu Kerosin wird ein viermal größeres LH-Volumen benötigt, um die gleiche Energiemenge zu liefern [27]. Trotz dieses Nachteils sind wasserstoffbetriebene Flugzeuge Berichten zufolge gewichtseffizienter und verursachen geringere Betriebskosten als Flugzeuge, die mit Kerosin betrieben werden [27]. Die Verwendung von Wasserstoff als Düsentreibstoff erfordert im Allgemeinen eine Änderung der Konstruktion von Flugzeugen und Triebwerken. Das in wasserstoffbetriebenen Flugzeugen verwendete Flüssiggas (LH_2) muss bei sehr niedrigen Temperaturen gehalten werden und kann daher nur in hoch isolierten Tanks gelagert werden, nicht aber in den Tragflächen, die nur begrenzten Raum für die Aufnahme von LH_2 bieten und nicht ausreichend isoliert werden können. Da die Wasserstofftanks ein großes Volumen benötigen, muss die Konstruktion des Flugzeugs so geändert werden, dass der Rumpf ein größeres Volumen und ein höheres Gewicht aufweist, was der beste Ort für die Unterbringung von LH_2 -Tanks ist. Bei Flugzeugen mit kurzer bis mittlerer Reichweite könnten die Wasserstofftanks über der Passagierkabine angebracht werden, während bei Langstreckenflugzeugen der Wasserstoff in zwei großen integrierten Tanks gelagert wird; einer davon befindet sich direkt hinter dem Cockpit und der zweite ganz hinten in der Passagierkabine [28]. Die Konfiguration der Wasserstofftanks hat einen erheblichen Einfluss auf die Energieeffizienz von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen [28]. Die Top-Tank-Konstruktion, die in Flugzeugen mit kurzer bis mittlerer Reichweite verwendet wird, kann den Energieverbrauch aufgrund des höheren Gewichts dieser Art von Tanks um 6-19 % erhöhen. Andererseits kann die integrierte Bauweise, die für Langstreckenflugzeuge geeignet ist, die Energieeffizienz um 12 % erhöhen [28]. Daraus lässt sich schließen, dass Wasserstoffkraftstoff für Langstreckenflugzeuge besser



geeignet ist. Da der Rumpf von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen zur Lagerung von Wasserstofftanks verwendet wird, ist ein schwerer und größerer Rumpf erforderlich, um die von diesen Tanks erzeugten Lasten zu tragen. Die Masse des Rumpfes von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen ist fast 6 % größer als die eines normalen Flugzeugs [24]. Zusätzlich zur Änderung der Flugzeugkonstruktion muss bei der Umstellung auf Wasserstoff auch der Motor geändert werden, da sich die Verbrennungsgase und die Eigenschaften von Kerosin und Wasserstoff unterscheiden. Für Wasserstoffkraftstoff können kleinere Motoren verwendet werden [24]. Die Änderungen der Flugzeug- und Triebwerkskonstruktionen bei der Verwendung von Wasserstoff führen zu einem Anstieg der Produktions- und Wartungskosten, die bis zu 25 % betragen können [23].

4.5.2 Wasserstoff-Brennstoffzelle für Luftfahrtanwendungen

Eine Wasserstoff-Brennstoffzelle ist ein elektrochemisches Gerät, das Strom durch eine elektrochemische Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt. Brennstoffzellen sind geräuschlos, erzeugen kaum Vibrationen und keine NO_x-Emissionen, was sie für ein breites Spektrum von Anwendungen sehr attraktiv macht. Unter den verschiedenen Arten von Brennstoffzellengeräten wurden PEM-Brennstoffzellen und Festoxid-Brennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) am häufigsten für Luftfahrtanwendungen in Betracht gezogen. Wasserstoff-Brennstoffzellen könnten an Bord von Flugzeugen verschiedene Geräte und Systeme mit Strom versorgen, die derzeit von Batterien gespeist werden, z. B. Nottürsystem, Fluchtwegbeleuchtung, Notrufsender (ELT), Flugdatenschreiber (FDR) und Cockpit-Voice-Recorder (CVR).

Bei der Hilfsturbine (APU) eines Flugzeugs handelt es sich um eine kleine Gasturbine, die als Strom- und Druckluftquelle für den Betrieb anderer Komponenten des Flugzeugs, z. B. der Düsentriebwerke und der Umweltsysteme, dient, wenn die Haupttriebwerke nicht laufen. Brennstoffzellensysteme könnten anstelle der herkömmlichen APU eingesetzt oder mit ihnen zu einem hybriden APU-System kombiniert werden [29]. Sowohl PEMFC als auch SOFC können für APU-Systeme verwendet werden [30]. Die SOFC ist jedoch für Flugzeuganwendungen vorteilhafter, insbesondere für den Antrieb der APU [29]. Die SOFC ist toleranter gegenüber Kraftstoffverunreinigungen und kann mit Wasserstoff betrieben werden, der durch Kerosinreformierung erzeugt wird [29]. Außerdem ermöglicht die hohe Betriebstemperatur der SOFC den internen Reformierungsprozess von Kerosin und erhöht den Wirkungsgrad. Allerdings ist das Gewicht der SOFC-betriebenen APU größer als das der PEM-Brennstoffzelle oder der herkömmlichen APUs, da sie größere Teile der Anlagenbilanz (BoP) wie Reformier, Kompressor, Pumpen, Wärmetauscher usw. benötigt. Die PEM-Brennstoffzelle kann nur dann für den Antrieb der APU verwendet werden, wenn die Wasserstoffquelle im Flugzeug installiert ist.

Mit dem zunehmenden Interesse an der Verbesserung der Luftqualität in der Umgebung von Flughäfen haben Brennstoffzellengeräte aufgrund ihres Potenzials, in naher Zukunft

verschiedene Bodenunterstützungsgeräte (ground support equipment, GSE) und andere Bodenfahrzeuge, die auf Flughäfen arbeiten, wie z. B. Passagier-Shuttles und Tankwagen, mit Strom zu versorgen, zunehmende Aufmerksamkeit erhalten [30]. GSE oder Flugzeugabfertigungsgeräte werden zur Wartung von Passagieren, Fracht, Einrichtungen und Flugzeugen eingesetzt, während diese sich zwischen den Flügen auf dem Flughafen befinden. GSE enthalten verschiedene Servicesysteme, die unterschiedliche Leistungsanforderungen haben. Heute werden viele der auf Flughäfen eingesetzten GSE mit Wasserstoff-Brennstoffzellen betrieben. Das Department of Energy (DOE) hat angekündigt, dass rund 250 Millionen US-Dollar für den Einsatz von Brennstoffzellen für Gepäckfahrzeuge auf Flughäfen verwendet werden sollen [31]. Die mit Brennstoffzellen betriebenen Gabelstapler mittlerer Größe wurden bereits auf großen Flughäfen wie Toronto Pearson, Hamburg und München getestet [32]. Diese Gabelstapler bieten viele Vorteile, wie z. B. geringe Geräusentwicklung, keine Emissionen und weniger Wartungsaufwand. Sie haben fast die gleichen Abmessungen wie herkömmliche batteriebetriebene Stapler, erfordern aber keinen Batteriewechsel, was bei den meisten herkömmlichen Staplern eine große Herausforderung darstellt. Darüber hinaus wurde die Betankungszeit als großer Vorteil von brennstoffzellenbetriebenen Gabelstaplern gegenüber batteriebetriebenen Staplern angesehen, da sie innerhalb von Minuten erledigt werden kann, während das Aufladen der Batterie Stunden benötigt [33]. Die Brennstoffzellen können auch mehr als acht Stunden lang eingesetzt werden, ohne dass sie nachgetankt werden müssen. Daraus lässt sich schließen, dass der Ersatz herkömmlicher Batterien durch Brennstoffzellen in Gabelstaplern sowohl hinsichtlich der Anschaffungs- als auch der Betriebskosten wirtschaftlich rentabel ist. Der dänische Flughafen setzt derzeit Gepäckwagen ein, die mit Brennstoffzellen funktionieren. Im Jahr 2015 hat FedEx die ersten brennstoffzellenbetriebenen GSE-Frachtschlepper auf den Markt gebracht, die rund 15 t Fracht ziehen können [34]. Neben den GSE-Anwendungen können Brennstoffzellen auch für den Antrieb von Flughafenfahrzeugen wie Passagierbussen verwendet werden. In Tokio sind einige der Busse, die auf der Strecke zwischen dem Stadtzentrum und dem Flughafen Tokio verkehren, mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen/Batterie-Hybridsystem ausgestattet [35]. Der internationale Flughafen auf Hawaii plant den Einsatz eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybridbusses für den Pendelverkehr zwischen den Flughafenterminals und der Autovermietung [36].

Die Brennstoffzelle wird auch als mögliche neue Energiequelle als Alternative zu den bestehenden Batterien für unbemannte Luftfahrzeuge (unmanned aerial vehicles, UAVs) angesehen. Die Kosten sind der attraktivste Faktor für batteriebetriebene UAVs, da sie fast die Hälfte des Preises der Brennstoffzelle betragen. Allerdings wurde das höhere Gewicht der Batterie, das für eine lange Flugzeit erforderlich ist, als ein limitierender Faktor für batteriebetriebene UAVs genannt [37]. Der Hauptvorteil von Brennstoffzellen für den Antrieb von UAVs besteht darin, dass sie aufgrund ihrer hohen Energiedichte längere Flugzeiten und größere Entfernungen ermöglichen, leise und zuverlässig arbeiten und die Hindernisse beim



Aufladen der Lithiumbatterien und beim Transport reduzieren [38]. PEM-Brennstoffzellen werden für UAV-Anwendungen bevorzugt, da sie bei niedrigen Temperaturen betrieben werden können, was geringere BoP-Anforderungen bedeutet. Im Jahr 2005 hat AeroVironment das erste Brennstoffzellen-UAV entwickelt [39]. Das Flugzeug mit einer Spannweite von 15 m wurde mit einem PEMFC-Antriebssystem angetrieben und konnte mehr als eine Stunde lang nur mit verflüssigtem Wasserstoff fliegen. Im Jahr 2006 haben Bradley et al. [40] ein brennstoffzellenbetriebenes UAV mit komprimiertem Wasserstoff entwickelt und getestet. Mit einer Flügelspannweite von 6,58 m und einer Gesamtmasse von 16,4 kg zeigten die Autoren, dass das Flugzeug mit einer 500-W-PEM-Brennstoffzelle betrieben werden kann. Derzeit gibt es weltweit beträchtliche Forschungsanstrengungen, um UAVs mit Brennstoffzellenantrieb zu entwerfen, zu entwickeln und zu bauen. Diese Bemühungen haben zu einer erheblichen Steigerung der Flugdauer von über 48 Stunden geführt [41]. Die Verringerung des Gewichts von Brennstoffzellen, die Verbesserung ihrer Zuverlässigkeit und Haltbarkeit, die Beschleunigung ihres Starts und die Erhöhung ihrer Leistungsdichte werden die Brennstoffzellentechnologie für UAVs attraktiver machen [42].

5. Wasserstofftransport

Wie Sie bereits erfahren haben, wird Wasserstoff seit vielen Jahrzehnten in der Industrie verwendet. Nachdem Wasserstoff an einer zentralen Produktionsstätte hergestellt wurde, wird er in der Regel zu den Endverbrauchern oder zu den entsprechenden BZ-Anwendungen transportiert. Wasserstoff kann entweder als komprimiertes Gas oder als kryogene Flüssigkeit transportiert werden. Daher gibt es mehrere Möglichkeiten für den Transport von Wasserstoff als Massengut: auf der Straße in Lastwagen/Anhängern und Behältern oder über Rohrleitungen.

5.1 Schwerlastkraftwagen (Lkw)

5.1.1 Gasbetriebene Lastwagen

Lkw-Flotten werden derzeit von Industriegasunternehmen für den Transport von nahtlosen Stahlbehältern mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (CGH₂) über Entfernungen von 200-300 km von einer zentralen Produktionsstätte eingesetzt. Auf den Anhängern sind Einzelflaschen, Mehrflaschenbündel oder lange zylindrische Rohre installiert ([Abbildung 19](#)). Der Speicherdruck liegt zwischen 200 und 300 bar, und ein Anhänger kann 2.000 bis 6.200 Nm³ CGH₂ für Lastwagen transportieren, wobei eine Gewichtsbeschränkung von 40 Tonnen gilt. Die Menge des auf diese Weise transportierten Wasserstoffs ist relativ gering (180 bis 540 kg je nach Anzahl der Rohre oder Bündel), was etwa 1-2 % der Gesamtmasse des Lkw ausmacht. Bei den derzeitigen Anhängern werden Speicherbehälter des Typs I (d. h. Ganzmetallspeicher) verwendet. Um ihre Leistung zu erhöhen, können Bündel von leichten, mit Reifen umwickelten Verbundflaschen oder -rohren (Typ II) verwendet werden. Diese Art der Lieferung ist relativ einfach, muss aber an die Wasserstoffmengen und -entfernungen

angepasst werden, um kostengünstig zu sein. Die Hauptbeschränkungen bei der Auslieferung von Druckgas-LKWs sind die Kapitalkosten, der Betrieb und die Wartung einschließlich der Arbeitskosten für die Fahrer und die Kraftstoffkosten.



(a)



(b)

Quelle: AirLiquide, 2014.

Abb. 19. Zwei Typen von CGH2-Anhängern, die von AirLiquide in Europa betrieben werden: (a) Röhrenanhänger mit 2.000 bis 3.000 Nm³Wasserstoff und (b) Verbundflaschenanhänger mit 6.200 Nm³Wasserstoff.

Der Transport mit gasbetriebenen Lastkraftwagen (Schlauchanhänger, Gasflaschen) ist eine der ausgereiftesten Transportarten für kurze Entfernungen und kleine Mengen von Wasserstoff. Die größten Einschränkungen sind die geringe Speicherkapazität für Kunden mit hohem Verbrauch (die häufige Lieferungen benötigen) und der niedrige Druck des gelieferten Wasserstoffs, der eine zusätzliche Kompression, z. B. an einer Tankstelle, erfordert. Daher werden alternative Technologien mit höherem Druck, höherer Wasserstofftransportkapazität und kostengünstigeren Systemen untersucht, wie im Folgenden beschrieben. Lincoln Composites entwickelt Verbundrohre mit höherem Fassungsvermögen. Das Material eines Tanks ist eine Kunststoffauskleidung, die vollständig mit Epoxyharz imprägnierten Kohlenstofffasern ummantelt ist, um gasförmigen Wasserstoff in Schlauchanhängern zu transportieren. Der TITANTM-Tank (1,08 Meter Durchmesser, 11,5 Meter Länge, 8.400 Liter Wasservolumen und 2.087 kg Gewicht) beispielsweise arbeitet mit einem Druck von 250 bar. Er kann 2-3 Mal mehr Wasserstoff liefern als die in Stahltanks ähnlicher Masse gespeicherte/transportierte Wasserstoffmenge. [Abbildung 20](#) zeigt die Speichereinheit mit vier Verbundtanks, die 600 kg Wasserstoff bei 250 bar speichern können. Die für höhere Drücke geeigneten Tanks befinden sich derzeit in der Entwicklung.



Quelle: Lincoln Composites, 2014.

Abbildung 20. Ein Anhänger mit vier von Lincoln Composites entwickelten Verbundstofftanks.

Am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) werden Hybridtechnologien erforscht, wie z. B. die Kryokompression, bei der Druck und niedrige Temperaturen kombiniert werden, um die Menge an Wasserstoff, die pro Volumeneinheit gespeichert werden kann, zu erhöhen und die mit der Wasserstoffverflüssigung verbundenen Energieverluste zu vermeiden. Komprimiertes Wasserstoffgas ist bei kryogenen Temperaturen viel dichter als in normalen Druckbehältern bei Umgebungstemperatur. Diese neuen Behälter hätten das Potenzial, Wasserstoff bei Temperaturen von bis zu 80 K und einem Druck von 200-400 bar zu speichern. Dieser Ansatz erfordert die Entwicklung von isolierten Druckverbundtanks. Alternativ könnte man auch kalte Wasserstofftanks verwenden, die weniger Kühlung erfordern. Möglicherweise gibt es eine optimale Kombination von Druck und Temperatur im Bereich von 80-200 K. Kürzlich hat das LLNL kostengünstige Glasfasermaterialien für die Speicherung von kaltem Wasserstoffgas (~ 150 K und bis zu 500 bar) identifiziert, die eine Senkung der Transportkosten um 50 % erwarten lassen.

Die wichtigsten Sicherheitsvorrichtungen in gasbetriebenen Lastkraftwagen sind manuelle Sicherheitsventile. Während des Transports werden alle Wasserstoffspeicherbehälter durch ein Ventil abgesperrt. Im Betrieb gibt es verschiedene Sicherheitsvorrichtungen und Verfahren:

- Der Wechsel des Sattelanhängers läuft wie folgt ab:

- Der Fahrer parkt den Sattelaufleger an der vorgesehenen Stelle,
- Der Fahrer legt die Unterlegkeile an und klappt den Stützfuß aus,
- Der Fahrer kuppelt die Sattelzugmaschine ab,
- Der Fahrer schließt den Schlauch des vollen Sattelanhängers an, prüft die Dichtung des Abzugsschlauchs und kuppelt den leeren Sattelanhängers ab,
- Der Fahrer kuppelt den leeren Sattelaufleger an die Zugmaschine und fährt los.

- Eine manuelle Dichtheitsprüfung beim Anschluss an einen Sattelaufleger. Dies geschieht in folgenden Schritten. Der Bediener schließt den Schlauch des Sattelanhängers an den Anschlussstutzen der Anlage an. Der Schlauch wird mit Druck beaufschlagt. Der Bediener prüft die Dichtheit mit Hilfe einer Erkennungsseife und der Stabilisierung des Drucks, der vor Ort mit einem Manometer gemessen wird.

5.1.2 LKWs mit tiefgekühlter Flüssigkeit

Wasserstoff kann auch in flüssiger Form auf der Straße transportiert werden (gekühlt unter 20 K oder -253 °C), um größere Mengen (Hunderte von Metern³ pro Stunde) zu verteilen. Superisolierte Flüssigwasserstoff-Lkw (LH₂) können bis zu zehnmal mehr Wasserstoff

transportieren als die für den Transport von CGH verwendeten Röhrenanhänger, was das 2 Gewicht angeht. LH-Lkw 2 , die bei atmosphärischem Druck betrieben werden, haben ein Fassungsvermögen von etwa 50.000 bis 60.000 Litern und können bis zu 4.000 kg transportieren (Abbildung 21). Es handelt sich um eine bevorzugte Verteilungsart für mittlere/große Mengen Wasserstoff über lange Strecken, was erklärt, warum das 2 LH-Geschäft in Nordamerika am weitesten entwickelt wurde (die Wasserstoffverflüssigungskapazität in Nordamerika ist etwa zehnmal größer als in Europa). Der im Lkw transportierte flüssige Wasserstoff wird dann zu einem Hochdruckprodukt verdampft, das beim Kunden verwendet wird.



Quelle: AirLiquide Image Bank, 2015

Abbildung 21. Ein von Air Liquide betriebener Straßentankwagen für den Transport von LH 2 zum Endverbraucher.

Das Hauptproblem bei diesem Transportweg ist der kapitalintensive Verflüssigungsprozess. Der Verflüssigungsprozess ist ebenfalls kostspielig. Der Energieaufwand für die Verflüssigung macht 30-40 % des unteren Heizwerts von Wasserstoff aus (im Vergleich zu 10 %, die für die Gasverdichtung erforderlich sind) [58]. Die Elektrizitätskosten machen 50-80 % der Verflüssigungskosten aus. Die Entfernung ist der wichtigste Faktor, der über den Transport von LH 2 und gasförmigem Wasserstoff CGH entscheidet 2 . Die Anzahl der LH-Transporter 2 hängt von der Wasserstoffnachfrage und der Lage des Verflüssigungspunkts ab. Da die Kapazität von Flüssiggas-LKWs jedoch viel höher ist als die von Druckgas-LKWs, ist diese Art der Lieferung weniger abhängig von der Transportentfernung. Die Investitions- und Betriebskosten (Kraftstoff, Arbeitskräfte) sind wesentlich geringer. Folglich ist der Flüssigtransport bei großen Entfernungen (von ca. 400 km bis zu Tausenden von Kilometern) und mittleren Wasserstoffmengen wirtschaftlicher als der Transport mit Gasfahrzeugen. Allerdings muss man die Verfügbarkeit von LH 2 berücksichtigen. Derzeit wird der Markt für industriellen Wasserstoff von vier Verflüssigern in Europa und zehn in Nordamerika bedient. Größere Märkte würden den Bau neuer Verflüssigungsanlagen rechtfertigen. Erhebliche Kostensenkungen aufgrund von Skalierungseffekten bei Verflüssigungsanlagen sind möglich. Diese Art der Lieferung hängt jedoch vom Strompreis und von der Entscheidung über die Installation neuer Verflüssigungsanlagen ab. Bessere Technologien könnten Möglichkeiten zur

Senkung der Kapitalkosten, zur Verbesserung der Energieeffizienz des Verflüssigungsprozesses und zur Verringerung der Wasserstoffverluste durch Abdampfen während der Lagerung und des Transports bieten (die Verdampfungsrate, die von der Größe, der Form, der Isolierung des Behälters und der Lagerdauer abhängt, liegt in der Regel in der Größenordnung von 0,2 %/Tag für einen 100 m langen³Behälter). Derzeit laufen eine Reihe von Studien zur Verbesserung der Verflüssigungstechnologien und zur Entwicklung neuer Ansätze (z. B. Verbesserung der ortho-para-Umwandlung, Entwicklung der magnetischen Kühlung usw.).

5.2 Züge

Der erste Wasserstoffzug im Vereinigten Königreich, der im Rahmen des HydroFLEX-Projekts entwickelt wurde, wird im September 2020 seine erste Fahrt auf den Gleisen des Fernverkehrs in Warwickshire antreten. Weitere Brennstoffzellenzüge sollen in den nächsten Jahren in ganz Deutschland auf die Schiene gebracht werden. Die Frage ist jedoch, wie der Wasserstoff am besten zu den Tankstellen für die Züge gebracht werden kann. Ein möglicher Weg führt über die Schiene und wird von der Hessischen Landesenergieagentur befürwortet. Sie beauftragte DB Energie, den Energieversorger der Deutschen Bahn, zu untersuchen, wie dies technisch, betrieblich und rechtlich machbar ist. Diese Frage wurde anhand einer bestehenden Wasserstoffquelle im Industriepark Höchst in Frankfurt am Main auf zwei konkreten Strecken im Rhein-Main-Gebiet untersucht (siehe [Abbildung 22](#)).



Quelle: NPROXX, 2020

Abbildung 22. Wasserstofftransport auf der Schiene.

Die Versorgung der Wasserstoffbetankungsinfrastruktur mit Wasserstoff auf der Schiene sei machbar, so das Fazit der DB Energie-Experten. Gegenüber der Straße gebe es viele Vorteile, wie die genaue Planbarkeit der Transportzeiten, die hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit, die Möglichkeit, große Mengen zu transportieren und die Entlastung des Straßenverkehrs in Ballungsräumen. Aus technischer und rechtlicher Sicht spricht nichts gegen den Transport auf

der Schiene. Allerdings gibt es bisher keine Wasserstofftransportbehälter, die für den Zugverkehr zugelassen sind - nur für den Straßenverkehr. Da die Anforderungen sehr ähnlich sind, ist zu erwarten, dass eine Zulassung für den Einsatz auf der Schiene bald erreicht werden kann. Um die Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu ermitteln, sollte in einer separaten Studie untersucht werden, ob der Transport auf der Schiene wirtschaftlicher ist als der Transport auf der Straße. Auf den beiden untersuchten Strecken schnitt der Zugverkehr etwas schlechter ab. Allgemeine Aussagen lassen sich daraus jedoch nicht ableiten. Der Wasserstofftransport auf der Straße ist jedoch keine wirklich nachhaltige Lösung, insbesondere wenn auch in Zukunft Brennstoffzellenzüge betankt werden.

5.3 Pipelines

Eine Reihe kommerzieller Wasserstoffpipelines wird heute für die Verteilung großer Mengen (Zehntausende von m^3/h) gasförmigen Wasserstoffs an die Industrie verwendet. Ihre Länge reicht von weniger als einem bis zu mehreren hundert Kilometern. Die Hauptakteure sind die Industriegasunternehmen, nämlich Air Liquide, Air Products, Linde und Praxair. Als Reaktion auf die steigende Nachfrage nach Wasserstoff, die vor allem von Raffinerien ausgeht, werden die bestehenden Netze erweitert und neue Abschnitte gebaut. So hat Air Products im März 2009 angekündigt, das Wasserstoffleitungsnetz an der US-Golfküste in Louisiana um 60 km zu erweitern. Das Wasserstoffnetz wird in Europa auf etwa 1.600 km und in Nordamerika auf 1.100 km geschätzt. Die meisten Pipelines befinden sich dort, wo in der Raffinerie- und Chemiebranche große Mengen an Wasserstoff verbraucht werden. Dazu gehören Systeme in Nordeuropa (Niederlande, Nordfrankreich und Belgien), Deutschland (Ruhrgebiet und Leipzig), dem Vereinigten Königreich (Teesside) und in Nordamerika (Golf von Mexiko, Texas-Louisiana, Kalifornien, Alberta). Kleinere Systeme gibt es auch in Südafrika, Brasilien, Thailand, Korea, Singapur und Indonesien. Insgesamt ist die Länge dieser Pipelines im Vergleich zum weltweiten Erdgastransportsystem, das mehr als 2.000.000 km umfasst, gering.

Abbildung 23 zeigt Teile des weltweiten Wasserstoff-Pipelinenetzes. Die 1998 von Air Liquide erworbene 240 km lange Pipeline im Ruhrgebiet (**Abbildung 23 a**) ist beispielsweise seit 1938 in Betrieb. Im Rahmen des europäischen Projekts "Zero Region" für Wasserstoff-Energieanwendungen hat Linde im Industriepark Frankfurt-Hoechst eine 900-bar-Wasserstoffpipeline (1" Durchmesser) über eine Strecke von 1,7 km zur Versorgung von Brennstoffzellen-PKWs installiert.

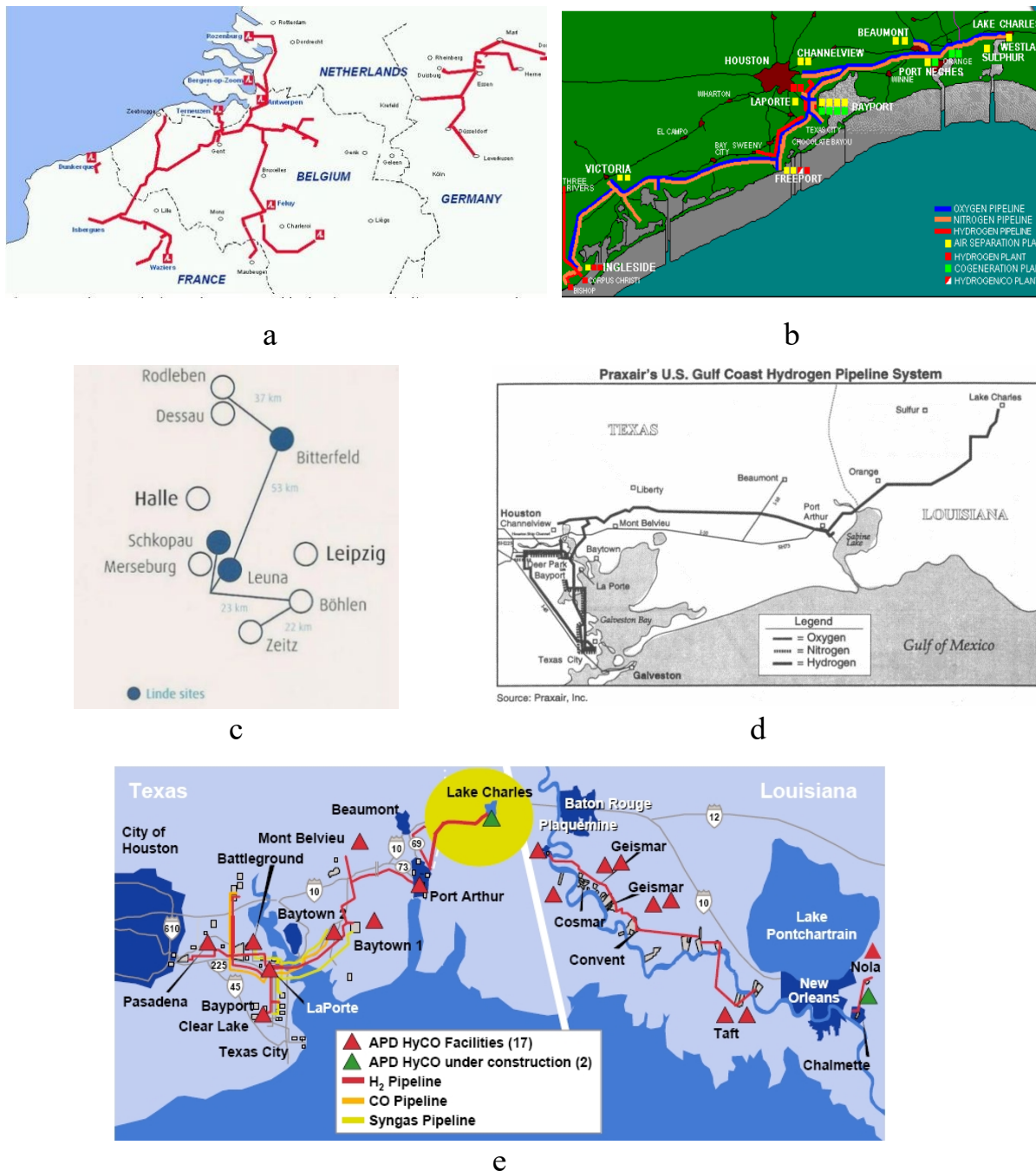


Abbildung 23. Die wichtigsten Wasserstoff-Pipelines in der Welt: (a) Wasserstoff-Pipelines von Air Liquide in Benelux, Frankreich und Deutschland (Ruhrgebiet); (b) Wasserstoff-Pipelines von Air Liquide an der Golfküste (USA); (c) Wasserstoff-Pipelines von Linde in Deutschland; (d) Wasserstoff-Pipelines von Praxair an der Golfküste (USA); (e) Wasserstoff-Pipelines von Air Product an der Golfküste (USA).



Die Pipelines erfordern eine geeignete Konstruktion, Installation und Wartung. Der Betriebsdruck von Wasserstoffleitungen liegt in der Regel unter 100 bar (meist zwischen 40 und 70 bar), und der Durchmesser der Rohrleitungen (D) liegt in der Regel zwischen 10 und 300 mm. Die derzeitigen Rohrleitungen bestehen aus Stählen. Ein technisches Problem ist die Wasserstoffversprödung von metallischen Rohrleitungen und Schweißnähten, die durch einen Verlust der Duktilität und einen Bruch bei Belastung gekennzeichnet ist. Bei den für Wasserstoffleitungen verwendeten Stählen handelt es sich um kohlenstoffarme, niedrig legierte und niedrigfeste Stähle, um das Risiko der Versprödung zu verringern (z. B. API X42-Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt $C < 0,2$ Gew.-%, Mangangehalt $Mn < 1,3$ Gew.-%). Diese Stähle verbinden wirtschaftliche Erschwinglichkeit mit einem angemessenen Spektrum an physikalischen Eigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit, Duktilität und Schweißbarkeit. Aus Sicherheitsgründen werden die meisten Pipelines erdverlegt und die Stähle mit Beschichtungen oder einem Kathodenschutz versehen, um Korrosion zu verhindern.

Der Bau von Pipelines erfordert umfangreiche Schweißarbeiten zur Verbindung, wobei aus Sicherheitsgründen vor dem Betrieb ein Minimum an Inspektionen durchgeführt wird. Der Betrieb eines Pipelinenetzes erfordert auch Verdichterstationen, da Wasserstoff im Allgemeinen unter niedrigem Druck verfügbar ist. Wasserstoffkompressoren, die das Pipelinesystem speisen, befinden sich in der Regel dort, wo der Wasserstoff produziert wird. Die Kompressoren sind teuer und wartungsintensiv, so dass sie nicht installiert werden, wenn eine Alternative möglich ist. Bei der Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas (Methandampfreformierung) kann das Erdgas komprimiert und die Produktionsanlage mit einem höheren Druck betrieben werden. Die Reibungsverluste in Pipelines mit Wasserstoff sind viel geringer als bei Erdgas, da die Viskosität von Wasserstoff niedriger ist (der Energieverlust beim Transport von Wasserstoff beträgt etwa 4 % des Energiegehalts).

Eine Wasserstoffpipeline transportiert im Vergleich zu einer Erdgaspipeline aufgrund der geringeren volumetrischen Dichte von Wasserstoff etwa 30 % weniger Energie. Die Verteilung größerer Energiemengen in Wasserstoffpipelines erfordert eine Erhöhung des Fließdrucks (> 100 bar). Dieser Druckanstieg kann Auswirkungen auf das Material haben, das für den Bau der Pipeline verwendet werden könnte. Außerdem würden sich die Betriebsbedingungen einer Wasserstoffpipeline für Energieanwendungen von denen einer industriellen Pipeline unterscheiden, die heute bei nahezu konstantem Druck und ohne nennenswerte Druckzyklen betrieben wird. Wasserstoffpipelines für Energieanwendungen müssten Druckschwankungen aushalten. Dies kann aufgrund der Anfälligkeit von Stählen für Wasserstoffversprödung, die ihre mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt und ihre Beständigkeit gegen Ermüdungsrisse verringert, ein Problem darstellen. Das Phänomen der Wasserstoffversprödung wird in der Vorlesung "Sicherheit der Wasserstoffspeicherung" erörtert. Es gibt ein erneutes Interesse an der Forschung zur Entwicklung neuer wasserstoffverträglicher Rohrleitungsmaterialien und ihrer Eignung für den Betrieb bei höherem Druck sowie zur Senkung der Kapitalkosten. Neue Stähle werden erforscht, um ein besseres Verständnis der Wasserstoffversprödung zu



entwickeln und um Stahlzusammensetzungen und -verfahren zu ermitteln, die für den Bau einer neuen Pipeline-Infrastruktur oder die potenzielle Nutzung der bestehenden Stahl-Pipeline-Infrastruktur geeignet sind.

Die aktuelle Forschung konzentriert sich auch auf Alternativen zu metallischen Rohrleitungen, um die Kosten- und Leistungsziele für den Transport und die Verteilung von Wasserstoff zu erreichen. Untersucht werden Rohrleitungen aus Polymeren und faserverstärkten Polymeren, die im Vergleich zu Stählen die Vorteile haben, dass sie leichter, einfacher zu handhaben, zu verbinden und zu schweißen, korrosionsunempfindlich und unempfindlich gegen Wasserstoffversprödung sind. Die derzeit im Erdgasverteilungsnetz verwendeten Polymerrohre bestehen aus Polyethylen und haben eine auf 10 bar begrenzte Druckfestigkeit. Polymere wie Polyamid sind von größerem Interesse, da ihre Wasserstoffdurchlässigkeit deutlich geringer ist und ihre thermomechanischen Eigenschaften es ermöglichen, dass die Rohre einem Betriebsdruck von 20 bar und einer Betriebstemperatur von 80 °C standhalten.

Daher können Kunststoffrohre dank der Einsparungen bei den Installations- und Wartungskosten eine sinnvolle Alternative zu Stahl sein. Allerdings können die Kosten für diese neuen polymeren Werkstoffe sehr hoch sein. Rohre aus faserverstärkten Polymer-/Kunststoff-Verbundwerkstoffen (FRP) bestehen aus einem thermoplastischen Liner (hauptsächlich Polyethylen), der mit hochfesten Fasern (in der Regel Aramidfasern) umwickelt und mit einer thermoplastischen Schicht überzogen ist. Diese letzte Schicht schützt vor Umwelteinflüssen und trägt dazu bei, dass die für die mechanischen Eigenschaften verantwortliche Umhüllung erhalten bleibt. Im Vergleich zu einfachen Kunststoffrohren kann durch die Ummantelung mit Aramidfasern ein Druck von bis zu 100 bar erreicht werden. Diese verstärkten Kunststoffrohre werden bereits für die Erdgas- und Erdölverteilung im Nahen Osten verwendet, und ihre Entwicklung für die Wasserstoffversorgung ist derzeit Teil des Wasserstoffprogramms des US DOE (Abbildung 24). GFK-Rohre könnten ein kostengünstiger Ersatz für Metallrohre sein, wenn große Längen (200 bis 300 Meter) verlegt werden. Allerdings lassen sich mit dem Herstellungsverfahren keine Kunststoffrohre mit so großen Durchmessern wie Stahlrohre (100 und 150 mm) herstellen. Es sind noch weitere Entwicklungen erforderlich, um die Durchführbarkeit großtechnischer Herstellungsprozesse zu bewerten, die Verbindungstechnik zu beurteilen und Vorschriften und Normen für wasserstoffbetriebene GFK-Rohre zu entwickeln.

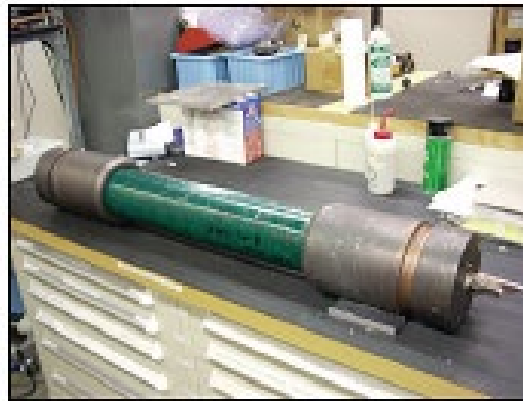


Abbildung 24. FRP-Verbundrohrleitungen.

6. Stationäre Anwendungen

6.1 Kraft-Wärme-Kopplungssysteme (KWK)

In herkömmlichen KWK-Anlagen werden Strom und Wärme durch Verbrennung von Erdgas in einem Verbrennungsmotor oder einer Turbine erzeugt. KWK-Anlagen auf der Grundlage von BZ erzeugen Strom und Heizwasser durch die oben beschriebene elektrochemische Reaktion. Es werden zwei BZ-Technologien betrachtet: Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) und PEM-Brennstoffzellen. Erdgas wird umgewandelt, um Wasserstoff zu erzeugen, und ein Gemisch aus Wasserstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid (Syn-Gas genannt) mit Verunreinigungen wird direkt in die BZ zur Energieerzeugung eingespeist. In PEM-BZ-Systemen, die mit niedrigeren Temperaturen arbeiten, muss das Synthesegas weiter gereinigt werden, um Kohlenmonoxid und schwefelhaltige Verbindungen zu entfernen. Mikro-KWK-Anlagen wurden in Europa im Rahmen des Callux-Projekts eingeführt (<http://enfield.eu/>).

6.2 Reservestromerzeugung

Das Hauptziel dieser Art von Technologie besteht darin, im Falle eines Stromausfalls sofortigen Strom zu liefern. Die Leistungskapazität dieser Anlage liegt zwischen 16 und 80 kW mit bis zu neun Wasserstoffzylindern. Die wichtigsten Vorteile dieser Anwendung sind:

- Hohe Zuverlässigkeit und schnelle Inbetriebnahme.
- Skalierbare Autonomie, nur abhängig vom Gasspeichervolumen.
- Geringer Wartungsaufwand.
- Sauberer und leiser Betrieb [1].

Zu den potenziellen Nutzern dieser Art von Anwendung gehören: Telekommunikation, Rechenzentren, Krankenhäuser, Militär, Industrie, Luxushotels usw. Ein Beispiel für das System ist in **Abbildung 25** zu sehen, die ein FC-Notstromaggregat zeigt, das im IP Energy-Projekt (Aix-en-Provence, Frankreich) eingesetzt wird. Das 2008 installierte 30-kW-Notstromsystem ist die erste Containerlösung. Der interne Gasspeicher ermöglichte eine Betriebskapazität von 4 Stunden.



Abbildung 25. Eine FC-Notstromversorgung gekoppelt mit einem IP Energy-Rechenzentrum.

Die Sicherheitsmerkmale und -konzepte für das System sind wie folgt:

- Das BZ-System hat zwei getrennte Entlüftungsleitungen, eine für Sauerstoff und eine für Wasserstoff, die das Gas auf dem Dach des Behälters in einem Gefahrenabstand ablassen, um eine Vermischung von Sauerstoff und Wasserstoff beim Ablassen zu vermeiden. Nach einer Entladung verbleibt eine Restmenge an Wasserstoff im System.
- Das Prozessabteil ist mit zwei Wasserstoffsensoren ausgestattet, die einen Notstopp auslösen können, wenn die Wasserstoffkonzentration in den Behältern über 0,4 Volumenprozent liegt. Wenn eine anormale Wasserstoffkonzentration festgestellt wird, wird ein Sicherheitsstopp ausgelöst und die folgenden Maßnahmen werden durchgeführt:
 - Stoppen aller Systemprozesse.
 - Aktivieren der mechanischen Beatmungsgeräte.
 - Isolieren der Gasspeicher durch Schließen der Magnetventile.
- Die Erkennung von Wasserstoff wird kontinuierlich überwacht, auch wenn sich das System im Standby-Modus befindet. Im Falle eines Erkennungsverlustes löst das System einen Sicherheitsstopp aus.
- Die Container sind mit Brandmeldern ausgestattet. Im Falle ihrer Auslösung sind folgende Maßnahmen zu ergreifen:
 - Stoppen aller Systemprozesse.
 - Isolieren der Gasspeicher durch Schließen der Magnetventile.
 - Abschalten der Belüftung.
- Gefährliche explosionsfähige Atmosphären, die sich aus möglichen Wasserstofflecks oder -freisetzungen ergeben, müssen in der Umschließung des BZ verhindert werden. Zu den passiven Vermeidungsmaßnahmen gehören unter anderem: die Verwendung von Verbindungen, die dauerhaft gesichert und so konstruiert sind, dass sie die maximale Freisetzungsrates auf einen vorhersehbaren Wert begrenzen, sowie natürliche Belüftung.



Zu den aktiven Verhütungsmethoden gehören unter anderem: aktive Belüftung, ein System zur Erkennung brennbarer Gase und andere Mittel zur Leckerkennung (z. B. durch Druckmessungen im Verhältnis zu den Steuerungseinstellungen).

- Das Innere des Behälters, in das Wasserstoff austreten oder diffundieren kann, ist nicht klassifiziert, da Sicherheitsbarrieren dafür sorgen, dass kein gefährlicher Wasserstoff in die ATEX-Zone gelangt oder sich dort ansammelt. Nichtsdestotrotz sind alle Geräte, die knapp unter der Behälterdecke installiert sind und entzündliche Wasserstoff-Luft-Gemische entzünden können, für die ATEX-Zone 2 zertifiziert. Dies gilt insbesondere für die Wasserstoff- und Feuersensoren sowie das Belüftungssystem. Außerdem ist der elektrische Bereich systematisch vom Prozessbereich getrennt.
- Sauerstoff ist in der Luft nicht brennbar, aber er unterstützt den Verbrennungsprozess. Ein Sauerstoffleck kann die Ursache für einen Brand sein. Das Brandrisiko ist erhöht, wenn die Atmosphäre mit Sauerstoff angereichert ist. Wegen der Brandgefahr muss jeder Kontakt zwischen Sauerstoff und organischen Stoffen vermieden werden.
- Allgemeine Maßnahmen zur Risikoprävention werden bei der Planung und beim Betrieb dieses Systems getroffen:
 - Richtige Wahl der Materialien (z. B. entfettetes rostfreies Material), Verwendung geschützter Rohre und ohne abrupte Bögen, dichte Verbindungen usw.
 - Begrenzung der Sauerstoffflüsse in Abhängigkeit vom Druck.
 - Schutz der Sauerstoffleitungen durch Filter, um zündfähigen Staub abzufangen.
 - Natürliche und forcierte Belüftung im Prozessraum.
 - Längenreduzierung der Rohre unter hohem Druck, ausreichende Gefährdung der Rohre durch die elektrischen Komponenten.
 - Umgruppierung der sauerstoffhaltigen Einheiten in einer abgegrenzten Zone (Kompartiment).
- Einhaltung der Kontroll- und Wartungsverfahren (periodische Prüfungen) der Anlage [1].

7. Anwendungen in der Schifffahrt

Wasserstoff-Brennstoffzellen haben ihre Leistungsfähigkeit in einer Vielzahl von Anwendungen unter Beweis gestellt, darunter Busse, Lkw, Pkw, Gabelstapler und sogar Personenzüge. Dank ihres Erfolges bei schweren Landfahrzeugen werden Brennstoffzellen nun auch in Wasserfahrzeuge integriert. Brennstoffzellen werden eine Schlüsselrolle dabei spielen, der Schifffahrtsindustrie zu helfen, die Treibhausgasemissionen auf dem Wasser und in den Häfen zu reduzieren.



Die Seeschifffahrt ist bekanntlich eine bedeutende Quelle von Treibhausgasemissionen. Die hohen Treibhausgasemissionen sind auf den herkömmlichen minderwertigen Kraftstoff zurückzuführen, der in den Schiffsmotoren verwendet wird und hohe Emissionen verursacht. In den letzten Jahren hat der öffentliche Druck in Bezug auf die Luftverschmutzung und den Klimawandel Regierungen und andere Behörden dazu veranlasst, Maßnahmen zur Reduzierung dieser Emissionen zu ergreifen. Infolgedessen werden auf der ganzen Welt Vorschriften zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Schiffsverkehr erlassen. Zum Beispiel:

- Das norwegische Parlament verabschiedete 2018 eine Resolution zum Schutz der Fjorde, die zum Weltnaturerbe des Landes gehören: Diese Resolution sieht vor, dass alle Emissionen von Kreuzfahrtschiffen und Fähren in den Fjorden bis 2026 eingestellt werden [59].
- Die Normen für sichtbare Emissionen des Staates Alaska begrenzen die Trübung aller Schiffe innerhalb von drei Meilen vor der Küste.
- Die Internationale Seeschifffahrtsorganisation (IMO) hat verbindliche Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und zu deren vollständiger Einstellung bis zum Ende dieses Jahrhunderts beschlossen. Ihre ursprüngliche Strategie sieht vor, die gesamten THG-Emissionen des internationalen Seeverkehrs bis 2050 um mindestens 50 % des Niveaus von 2008 zu senken.
- Die Europäische Organisation für die Sicherheit des Seeverkehrs (EMSA) plant, die Kohlendioxidemissionen des Seeverkehrs in der EU bis 2050 um mindestens 40 % (gegenüber dem Stand von 2005) zu senken. Weitere ECAs werden für die Arktis, Mittelamerika, das Mittelmeer und das Schwarze Meer, Japan, die Koreas und Australien diskutiert.

Diese Emissionsvorschriften werden erhebliche Auswirkungen auf Seeschiffe und die Unternehmen, die sie betreiben, haben. Um sich auf diese Veränderungen einzustellen, brauchen Flottenbetreiber Lösungen, die die Emissionen drastisch senken. Da so viele verschiedene Schiffstypen auf dem Wasser unterwegs sind, braucht die Schifffahrtsbranche eine echte Null-Emissions-Lösung, die auf verschiedene Schiffstypen angewendet werden kann.

Batterien sind eine emissionsfreie Stromversorgungslösung für kleinere Schiffe, die mit kurzen Arbeitszyklen betrieben werden, z. B. kleine Passagierfähren und Seenotrettungsboote. Die geringere Leistungsdichte und das höhere Gewicht schränken jedoch die Verwendung von Batterien für viele Anwendungen ein. Für Marineschiffe sind Brennstoffzellen die einzige praktikable, wirklich emissionsfreie Option. Genau wie Batterien erzeugen Brennstoffzellen durch einen elektrochemischen Prozess mit hohem Wirkungsgrad Strom. Der Unterschied besteht darin, dass bei einer Brennstoffzelle die Energie separat in Form von Wasserstoff



gespeichert wird. Solange Kraftstoff zur Verfügung steht, erzeugen die Brennstoffzellensysteme als Generator Strom. Die einzigen Emissionen einer Brennstoffzelle sind Wasserdampf und Wärme.

Außerdem kann Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen wie Sonne, Wind, Wasserkraft und Erdwärme gewonnen werden. Und die Kosten für erneuerbaren Wasserstoff sinken von Jahr zu Jahr - zumal in Europa, Australien und Chile erste groß angelegte Produktionsprojekte entstehen. Wenn ein Brennstoffzellensystem mit erneuerbarem Wasserstoff betrieben wird, ist es eine echte emissionsfreie Energiequelle für den Wachzustand.

Der Übergang zu einer neuen Energiequelle ist ein großes Unterfangen. Im Falle von Brennstoffzellen für Schiffe liegen die Hürden bei der Betankungsinfrastruktur und der Verfügbarkeit von Wasserstoff in den Häfen. Bevor die Betreiber ihre Schiffe mit Brennstoffzellen betreiben können, müssen die Wasserstoffversorgung und die Betankungsinfrastruktur weiter ausgebaut werden.

In naher Zukunft sind hybride Batterie/Brennstoffzellen-Anwendungen realisierbar. Sie benötigen weniger Kraftstoff und erreichen dennoch das Ziel der Emissionsfreiheit. Diese Anwendungen sind:

- Antrieb von kleineren Schiffen, wie Fähren und Flussschiffen.
- die Versorgung von Hilfsverbrauchern auf größeren Schiffen, wie z. B. Kreuzfahrtschiffen, wo der Hilfsstrombedarf hoch ist.
- Bereitstellung von Landstrom für angedockte Schiffe.

Der Einsatz von Brennstoffzellen in der Schifffahrt hat drei wesentliche Vorteile:

- Modulare Stromversorgungssysteme sind für viele Lastanforderungen anpassbar.



Abbildung 26. Ballard 100 kW Brennstoffzellenmodul für die Schifffahrt

Die PEM-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane) von Ballard sind modular aufgebaut (Abbildung 26) und können in verschiedenen Kombinationen parallel eingesetzt werden, um die von einem Schiff benötigte Leistung und Redundanz zu liefern, von 100 kW bis 1 MW oder mehr.

- Die Gleichstromversorgung ist mit elektrischen Architekturen kompatibel.

Ballard PEM-Brennstoffzellen sind eine Quelle für umfangreiche Gleichstromleistung, die mit Batterie-Hybrid-Elektroarchitekturen kompatibel ist. Sie können in parallelen, abschaltbaren Konfigurationen eingesetzt werden, um den variablen Strombedarf von folgendem zu treffen:

- Hybrid-Elektro-Antrieb.
- Hilfsenergieanlagen.
- Brennstoffzellensysteme sind flexibel konfigurierbar.

Bei einem Brennstoffzellensystem sind die Elemente der Stromerzeugung und der Brennstoffspeicherung voneinander getrennt, was dem Schiffsarchitekten mehr Flexibilität bietet als Batterien. Das Brennstoffzellen-Energiesystem von Ballard hat eine flexible Konfiguration, die sich den Platzverhältnissen auf dem Schiff anpasst. Es kann in mehrere Module aufgeteilt werden, die an verschiedenen Stellen positioniert werden können. Darüber hinaus können die Experten von Ballard die Betriebszyklen von Schiffen jeder Größe oder Art bewerten. Sie können eine praktikable Lösung entwickeln, indem sie das Optimum ermitteln:

- hybride Architektur.
- Brennstoffzellenenergie.



- Ablehnungsanforderungen.
- Anforderungen an die Kraftstofflagerung.
- geschätzter Kraftstoffverbrauch.

Brennstoffzellen könnten auf verschiedenen Schiffstypen eingesetzt werden, z. B. auf Fähren, Kreuzfahrtschiffen, Flussschiffen u. a. Für Fähren können modulare, skalierbare Brennstoffzellensysteme einen emissionsfreien Antrieb für kleine und große Fähren bieten. Es wird erwartet, dass die ersten emissionsfreien Fähren durch eine Hybridarchitektur aus Brennstoffzellen und Batterien angetrieben werden. Das spezifische Verhältnis von Batterien und Brennstoffzellen würde von der Dauer der Fahrt und dem Fahrplan abhängen. Da Brennstoffzellen eine beträchtliche Gleichstromleistung liefern, können sie auch Strom bereitstellen, der auf einer Fähre (oder einem anderen Schiff) verteilt werden kann, um den elektrischen Hilfsbedarf zu decken, z. B. für Beleuchtung, Heizung, Klimaanlage, Schiffsinstrumente, Notfallsysteme, Bordküchen und andere Systeme an Bord. Für zusätzliche Effizienz könnte die von den Brennstoffzellen erzeugte überschüssige Wärme zur Erwärmung von Wasser für HLK, Wäscherei und andere Zwecke verwendet werden. Das von der Brennstoffzelle erzeugte Wasser kann bei Bedarf zurückgewonnen werden.

Kreuzfahrtschiffe könnten eine der ersten Anwendungen von Brennstoffzellen auf See sein. Einige Häfen für Kreuzfahrtschiffe verlangen bereits einen emissionsfreien Betrieb. Auf Kreuzfahrtschiffen werden Brennstoffzellen unter anderem zur Stromerzeugung für Hotelbetriebe, Notfallsysteme und einen Teil der Antriebsenergie eingesetzt. Wenn die Branche ihre Null-Emissions-Ziele in diesem Jahrhundert erreichen will, sollten Brennstoffzellen auf vielen Kreuzfahrtschiffen 100 % der Energie liefern, sobald die Wasserstoffinfrastruktur ausgereift ist.

Brennstoffzellen sind eine praktikable Lösung für den emissionsfreien Antrieb von Flussschiffen, einschließlich Lastkähnen, die von Schubbooten und Schleppern geschoben oder gezogen werden, sowie von selbstfahrenden Schiffen. Ballard arbeitet bereits an einem Demonstrationsprojekt für den Antrieb von Flussschiffen in Lyon, Frankreich ([Abbildung 27](#)). Im Rahmen dieses Projekts wird ein Schubboot als Versorgungsschiff auf einem der anspruchsvollsten Flüsse der Welt, der Rhône, betrieben.



Abbildung 27. Ballards Flussschiff-Energieprojekt in Lyon, Frankreich

Im Bestreben, die Luftverschmutzung und den Kohlenstoffausstoß zu verringern, verschärfen Regierungen, Hafenbehörden und Organisationen auf der ganzen Welt die Emissionsstandards für Schiffe. Infolgedessen sieht sich die Schifffahrtsindustrie unter Druck, die kommenden Null-Emissionsvorschriften zu erfüllen. Wasserstoff-Brennstoffzellen - eine bewährte emissionsfreie Lösung für den Antrieb von Transitbussen, Lastwagen und anderen Schwerlasttransporten - bieten ein echtes Potenzial für eine Vielzahl von Schiffen. Brennstoffzellensysteme, die mit erneuerbarem Wasserstoff betrieben werden, sind die praktischste und praktikabelste Lösung für emissionsfreie Antriebe. Die Einführung dieser Technologie ist ein entscheidender Schritt zur Reduzierung der Emissionen von Schiffen und zur Verbesserung der Luftqualität für eine lebenswertere Welt.

8. Wasserstoffbasierte Energiespeichersysteme

Als Beispiel für ein wasserstoffbasiertes Energiespeichersystem betrachten wir die Greenenergy Box. Die Greenenergy BoxTM ist eine containerisierte Wasserstoffkette, die aus einem Elektrolyseur, einer Brennstoffzelle, einem Wasser- und Wärmemanagementsystem und elektrischen Umrichtersystemen in Verbindung mit Wasserstoff- und Sauerstoffspeichern besteht. Die Greenenergy BoxTM integriertes modulares System, das eine Leistung von 50 bis 500 kW und eine Speicherkapazität von 0,2 bis 2 MW bieten kann. Ihr Prinzip ist in [Abbildung 28](#) dargestellt. Es können mehrere Systeme gekoppelt werden, um die Leistung und die Energiekapazität zu erhöhen und die Funktion eines Back-up-Systems für einige Stunden mit hoher Leistung zu gewährleisten [1].

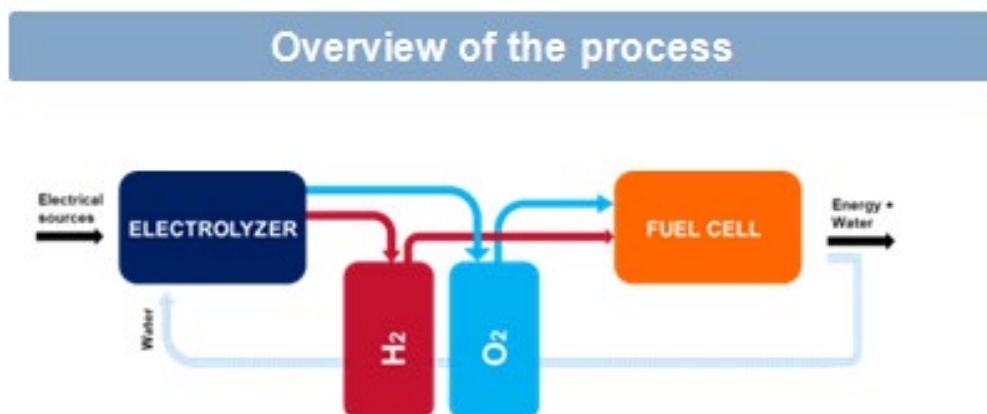


Abbildung 28. Ein Überblick über den Greenenergy Box Prozess.

Die Photovoltaik-Paneele liefern Strom an das Stromnetz und der Überschuss wird vom Elektrolyseur zur Erzeugung von gasförmigem Wasserstoff und Sauerstoff genutzt. Nach der Erzeugung werden gasförmiger Wasserstoff und Sauerstoff in separaten Tanks gespeichert, die neben der Greenenergy Box installiert sindTM. Dank des BZ-Systems können der gespeicherte Wasserstoff und Sauerstoff zur Stromerzeugung genutzt werden, um eine teilweise energetische Autonomie der Gebäude sowie ein Backup-System bei Stromausfällen zu gewährleisten. Die Greenenergy Box TMverwaltet selbst die von den Photovoltaik-Paneele empfangene Elektrizität, um Wasser zu elektrolysieren oder Strom ins Netz einzuspeisen. Darüber hinaus wird auch die Wärme, die das System sowohl bei der Elektrolyse als auch bei den Brennstoffzellenprozessen erzeugt, verwaltet und für die angrenzenden Gebäude nutzbar gemacht. Die wasser- und winddichte Greenenergy Box TMhat drei verschiedene Kammern: eine elektrische Kammer, eine Brennstoffzellenkammer und eine Elektrolysekammer (siehe Abbildung 29).

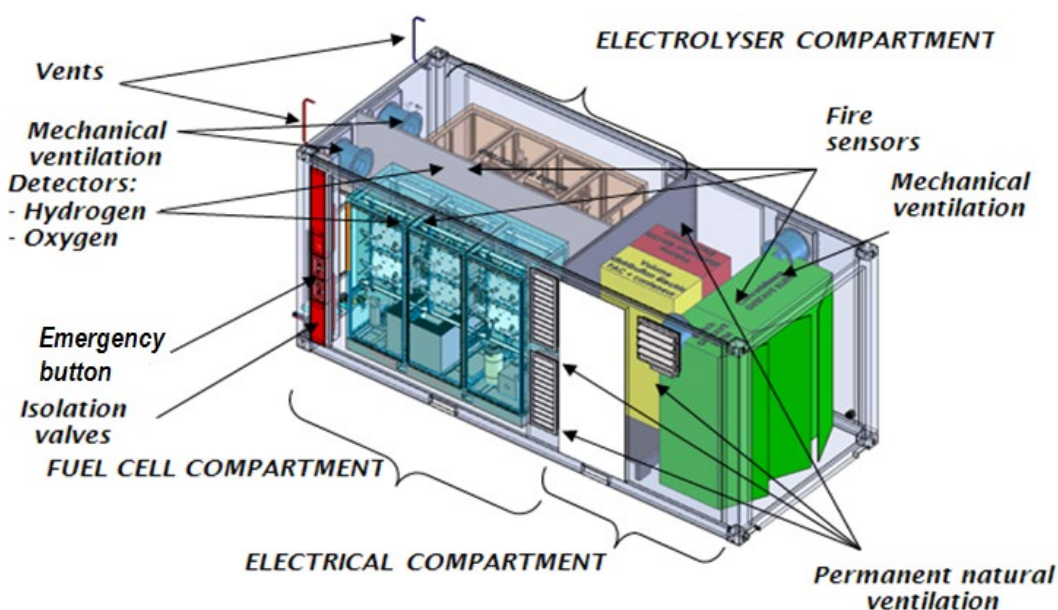


Abbildung 29. Eine schematische Darstellung der Greenenergy Box™[1]

Die Greenenergy Box™ ist CE-zertifiziert und erfüllt die Niederspannungsrichtlinie LVD 73/23/EWG, die Richtlinie über elektromagnetische Verträglichkeit EMC 89/336/EWG, die Maschinenrichtlinie MD 98/37/EG und die Druckgeräterichtlinie PED 97/23/EG. Die Risikobewertung für dieses System wird in drei Schritten durchgeführt. Zunächst wird ein Dokument mit dem Titel "Grundlegende Sicherheitsüberlegungen" erstellt, in dem die wichtigsten Sicherheitsanforderungen beschrieben werden, die bei der Architektur und Konzeption der Wasserstoffkette beachtet werden sollten. Sobald die Architektur des Systems hinreichend detailliert ist, wird eine HAZOP (HAZard and OPerability Study)-Überprüfung jedes Teilsystems durchgeführt, um die potenziellen Ursachen für jede Prozessabweichung und die damit verbundenen potenziellen Folgen zu definieren und die bestehenden Barrieren zu bewerten. Als dritte Stufe vervollständigt eine Fehlerbaumanalyse die HAZOP-Überprüfung, um Konzeptionsfehler, ungeeignete Systemkonfigurationen und externe Gefahrenquellen aufzuzeigen. Die gesamte Sicherheitsstudie ist in einem Dokument mit dem Titel "Synthese der Sicherheitsstudien der Greenenergy Box™[1]" zusammengefasst. Die Gesamtsicherheitsstrategie der Wasserstoffkette wird im Folgenden in verschiedenen Teilen beschrieben.

- Leckunterdrückung und -kontrolle.
 - Die Werkstoffe für Geräte und Rohrleitungen werden so ausgewählt, dass sie für die Verwendung von Wasserstoff und Sauerstoff geeignet sind. Insbesondere die Versprödung von Wasserstoffwerkstoffen und die Sauerstoffkorrosion werden aus der IGC15/06, ISO/TR 15916 und ISO 11114-4 ausgewählt. Für die Speicherung von Druckwasserstoff und Sauerstoff werden in der Regel Stahlflaschen verwendet. Das maximale Kohlenstoffäquivalent für Wasserstoff beträgt 0,43, wie in der IGC 121/04, § 3 beschrieben.
 - Geschweißte Verbindungen sind zu bevorzugen und werden praktisch eingesetzt, um potenzielle Leckagequellen zu minimieren. Die Anzahl der Muffen und montierten Verbindungen wird minimiert.
 - Sowohl der Elektrolyseur als auch das Brennstoffzellenfach der Greenenergy Box™ sind mit zwei Wasserstoffsensoren und einem Sauerstoffsensor ausgestattet. Ein Sicherheitsabschaltventil löst bei 10 % der Wasserstoff-LFL (0,4 Vol.-% H₂ in Luft) aus, und eine Notabschaltung erfolgt bei 25 % der LFL (1 Vol. % H₂ in Luft). Die Sauerstofferkennung wird immer dann ausgelöst, wenn die Sauerstoffkonzentration in der Luft mehr als 23 Volumenprozent erreicht.
 - Darüber hinaus werden Wasserstoff- und Sauerstofflecks auch durch Druckunterschiede während der Standby-Phasen erkannt. Verliert ein Tank oder ein Teil einer Leitung während der Bereitschaftsphase an Druck, bedeutet dies

- möglicherweise, dass ein Leck vorliegt. Bei einem geringfügigen Druckverlust während der Bereitschaftsphase wird ein Alarm ausgelöst, und wenn der Druckverlust zu groß ist, kann das System nicht neu gestartet werden.
- Vor der Inbetriebnahme werden hydraulische Prüfungen und Dichtheitsprüfungen gemäß der Druckgeräterichtlinie durchgeführt.
 - Um ein Höchstmaß an Sicherheit zu gewährleisten, werden regelmäßige Inspektionen und vorbeugende Wartungsprogramme durchgeführt. Insbesondere werden regelmäßig Dichtheitsprüfungen an Druckreglern, Ventilen, Rohren, Verbindungen und Anschlüssen usw. durchgeführt. Regelmäßige visuelle Inspektionen werden durchgeführt, um den Korrosionsgrad zu überprüfen. Informationen über die Inspektions- und Wartungshäufigkeit finden Sie in den Anhängen F der IGC 121/04 und IGC 13/02.
- Verhinderung der Bildung entzündlicher oder übermäßig sauerstoffhaltiger Atmosphären.
- Drei Fächer der Greenenergy BoxTM werden dank der seitlichen Belüftungsöffnungen an beiden Seiten des Containers natürlich belüftet (Abbildung 33).
 - Die Brennstoffzellen- und Elektrolyseurkammern sind beide mit einer ATEX-Belüftung ausgestattet, die bei einer Wasserstoff- und Sauerstoffkonzentration von mehr als 0,4 Vol.-% Wasserstoff bzw. 23 Vol. Die maximalen Durchflussraten sind für die Wärmeabfuhr festgelegt, d.h. 2.500 m³/h für den Brennstoffzellenraum und 2.700 m³/h für den Elektrolyseurraum.
 - Die Modellierung eines unfallbedingten Wasserstofflecks mit einer Durchflussmenge von 750 l/min unter Verwendung des an der Universität Ulster entwickelten LES-Ansatzes (Large Eddy Simulation) zeigt, dass es etwa 10 s dauert, bis ein Wasserstoffsensor eine Wasserstoffkonzentration von mehr als 0,4 Vol.-% in der natürlich belüfteten Elektrolysekammer erkennt. Geht man von einer konservativen Hypothese von 30 s für die Ansprechzeit des Wasserstoffsensors aus, so ist festzustellen, dass die Wasserstoff-Luft-Konzentration, die sich unter der Decke gebildet hat, nach 40 s kontinuierlicher Freisetzung immer noch unter der LFL von Wasserstoff in Luft liegt, d. h. weniger als 4 Vol. Von diesem Moment an sendet der Wasserstoffsensor ein Signal an die Steuerung, die das Ansauggebläse auf seine maximale Drehzahl bringt. Es ist zu beobachten, dass die Wasserstoff-Luftwolke in weniger als 2 s vollständig verdünnt ist.
- Unterdrückung/Verringerung von Zündquellen.
- Das Innere der Greenenergy BoxTM, in das Wasserstoff austreten oder diffundieren kann, ist nicht klassifiziert, da Sicherheitsbarrieren dafür sorgen, dass kein gefährlicher Wasserstoff in die ATEX-Zone eindringt oder sich dort ansammelt. Nichtsdestotrotz sind alle Geräte, die knapp unterhalb der Behälterdecke installiert



sind und ein entzündliches Wasserstoff-Luft-Gemisch entzünden können, für die ATEX-Zone 2 zertifiziert. Dies betrifft insbesondere die Brandmelder, Wasserstoff- und Sauerstoffsensoren und das Lüftungssystem.

- Die Greenenergy Box TM und die Behälter sind geerdet und geklebt, um sie vor den Gefahren von Streuströmen und statischer Elektrizität zu schützen.
- Schutz gegen Überdruck.
 - Jeder Speicher und die Rohrleitungen von der Greenenergy Box TM zu den Speichertanks sind mit einem Druckbegrenzungsventil (pressure release valve, PRV) ausgestattet. Der Taradruck des Druckbegrenzungsventils ist so eingestellt, dass das PRV ausgelöst wird, wenn der Druck im Speicher 1,15 des maximalen Betriebsdrucks erreicht.
 - Die Entlüftungsöffnungen der Lagertanks sind vertikal in einer Mindesthöhe von 3 m angebracht. Sie sind mit einem "Hut" ausgestattet, dessen Gewicht so kalibriert ist, dass er sich unter Druck anhebt, um das Eindringen von Wasser in die Entlüftungsöffnung zu verhindern.
 - Die Greenenergy Box TM ist mit zwei getrennten Wasserstoff- und Sauerstoffentlüftungen ausgestattet, die sich in einer Mindesthöhe von 1 m über dem Dach des Behälters befinden und gut voneinander getrennt sind, um ein mit Sauerstoff angereichertes Wasserstoff-Luft-Gemisch zu vermeiden. Jede einzelne Entlüftungsleitung ist mit dem Elektrolyseur und dem BZ verbunden und ermöglicht die Druckentlastung des Systems in weniger als 2 Minuten im Falle einer Notabschaltung.
- Not- und Sicherheitsabschaltung.
 - Der Steuerbefehl, der für die automatische Steuerung des Systems verwendet wird, dient auch zur Auslösung der Sicherheitsfunktionen. Etwa 70 Sicherheitsfunktionen sind in den Steuerbefehl integriert, um jede Prozessabweichung, jedes Gasleck oder jeden Brand im System zu erkennen. Je nach der Größe der Abweichung im Vergleich zum Sicherheitsschwellenwert des Parameters wird eine Not- oder Sicherheitsabschaltung ausgelöst, gefolgt von einer Stromabschaltung, Druckentlastung des Systems, Inertisierung und Aktivierung der Belüftung (außer bei Bränden).
 - Die wichtigsten Sicherheitsfunktionen, d.h. Wasserstoff-, Sauerstoff- und Feuertektion, Notabschalttaste und Watchdog des Steuerbefehls, sind über Logikkabel realisiert und entsprechen einem SIL (Safety Integrity Level) 1 [1].

9. Überblick über Vorfälle und Unfälle

9.1 Zwischenfälle und Unfälle in den Systemen und der Infrastruktur von FCH

Ein Zwischenfall ist ein Ereignis, das zu einem Verlust oder einer Unterbrechung von Abläufen, Diensten oder Funktionen führen kann - und das, wenn es nicht bewältigt wird, zu einem Notfall, einer Krise oder einer Katastrophe eskalieren kann [43], und ein Unfall ist ein unvorhergesehenes und ungeplantes Ereignis oder ein Umstand, der zu einem Verlust oder einer Verletzung führt. Die Meldung von Zwischenfällen/Unfällen, die sich in den FCH-Systemen oder -Infrastrukturen ereignet haben, sowie eine komplexe Bewertung ihrer Hauptursachen und der daraus gezogenen Lehren sind sowohl für den privaten als auch für den öffentlichen Sektor äußerst wertvoll. Informationen über Unfälle oder Zwischenfälle im Zusammenhang mit FCH-Technologien können in den folgenden bekannten Datenbanken gefunden werden:

- Wasserstoff - Lehren aus Zwischenfällen und Beinahe-Unfällen: <http://h2tools.org/lessons/>
- Datenbank für Wasserstoffzwischenfälle und -unfälle HIAD-Datenbank: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- Büro für die Analyse von Risiken und Umweltverschmutzungen in der Industrie (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries, BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Alle Datenbanken sollten regelmäßig aktualisiert werden.

So wurde beispielsweise die Datenbank H2Incidents (kürzlich umbenannt in Hydrogen Tools. Lessons Learned) vom Pacific Northwest National Laboratory mit finanzieller Unterstützung des US-Energieministeriums eingerichtet (<https://h2tools.org/lessons>). In dieser Datenbank werden Vorfälle und Beinaheunfälle ohne die Namen der Unternehmen und andere Details gemeldet, so dass die Vertraulichkeit der Meldungen gefördert wird. Die Vorfälle werden nach Umgebung, Ausrüstung, Schäden und Verletzungen, wahrscheinlichen Ursachen und beitragenden Faktoren klassifiziert [3].

Rigas und Amyotte [3] definierten die folgenden Hauptursachen für Zwischenfälle/Unfälle:

- Mechanisches Material- oder Geräteversagen.
- Korrosionsangriff.
- Überdrücken.
- Wasserstoffversprödung bei niedrigen Temperaturen.
- Dampfexplosion eines sich ausdehnenden flüssigen Gases (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, BLEVE).
- Bruch eines Lagertanks durch den Aufprall von Stoßwellen oder Geschossen aus benachbarten Explosionen.

- Menschliches Versagen.

In dieser ersten Vorlesung werden wir nur einige Beispiele von Zwischenfällen/Unfällen im Zusammenhang mit FCH-Technologien erörtern. In den folgenden Vorträgen werden jedoch für jedes untersuchte FCH-System eine Reihe von relevanten Beispielen behandelt.

9.2 Unfälle bei der Wasserstoffproduktion



Quelle: Millet et al, 2011 [45]

Abbildung 30. Beschädigte Teile eines Hochdruck-PEM-Elektrolyseurs.

Eine Explosion eines Elektrolyseurs bei einem Betriebsdruck von 40 MPa ereignete sich am 7. Dezember 2005 an einem Wasserstoff-Demonstrationsstand an der Kyushu-Universität (Japan) [44]. Möglicherweise führte nach einem Membranleck ein interner Wasserstoff-Sauerstoff-Jetbrand zu einem Metallbrand (Titan) und einer Explosion oder einem Bruch des Elektrolyseurgehäuses. Die interne Flüssigkeit und die Verbrennungsprodukte wurden in die Umgebung, einschließlich des Parkplatzes außerhalb des Laborgebäudes, freigesetzt. Die Windschutzscheiben mehrerer Fahrzeuge wurden durch die Einwirkung von Fluorwasserstoff beschädigt, der sich bei der Zersetzung eines Membranpolymers bildete [44]. Eine französisch-russische Studie [45] berichtete über die Analyse der Versagensmechanismen von PEM-Wasserelektrolysezellen, die letztlich zur Zerstörung des Elektrolyseurs führen können. Es wurde ein zweistufiger Prozess nachgewiesen, bei dem es zunächst zu einer lokalen Perforation des festen Polymerelektrolyten und anschließend zu einer katalytischen Rekombination von Wasserstoff und Sauerstoff in den Elektrolysekammern kommt. Die Fotos einer Edelstahlarmlatur und einer Mutter, die von einer Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme im Inneren des PEM-Stacks perforiert wurden, sind in **Abbildung 30** dargestellt.

9.3 Ein Zwischenfall an einer Tankstelle

An der Emeryville-Tankstelle kam es zu einer Wasserstoffgasfreisetzung [60]. Ein PRD hatte versagt, 300 kg Wasserstoff wurden freigesetzt und entzündeten sich anschließend. Das Gas entzündete sich am Ausgang des Entlüftungsrohrs und brannte 2,5 Stunden lang, bis Techniker von der örtlichen Feuerwehr die Erlaubnis erhielten, die Station zu betreten und den Gasfluss



zu stoppen. Während dieses Vorfalls evakuierte die Feuerwehr nahe gelegene Unternehmen und Schulen und sperrte angrenzende Straßen.

Die ermittelten Ursachen für dieses Ereignis sind:

- die Verwendung von unverträglichen Materialien bei der Herstellung des PRD.
- unsachgemäße Montage, die zu einem zu hohen Anzugsmoment der inneren Baugruppe führt.
- Überhärtung der Werkstoffe der Innengarnitur durch den Ventilhersteller.

Diese Probleme hätten durch angemessene Qualitätssicherungs-/Qualitätskontrollverfahren während der Entwurfs- und Sicherheitsüberprüfung vermieden werden können.

10. Einführung in den Rahmen der Wasserstoffsicherheitstechnik und Normen

Wasserstoffsicherheits-Engineering (hydrogen safety engineering, HSE) ist definiert als Anwendung wissenschaftlicher und technischer Grundsätze zum Schutz von Leben, Eigentum und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen von Zwischenfällen/Unfällen mit Wasserstoff [46]. Trotz der Fortschritte, die in den letzten zehn Jahren in der Wissenschaft und Technik der Wasserstoffsicherheit erzielt wurden, insbesondere durch die HySafe-Partnerschaft [47], gibt es immer noch keine übergreifende leistungsorientierte Methodik für die Durchführung von HSE. HSE umfasst einen Gestaltungsrahmen und technische Teilsysteme. Ein an der University of Ulster entwickelter Entwurfsrahmen für HSE ähnelt der britischen Norm BS7974 für die Anwendung von Brandschutztechniken bei der Planung von Gebäuden [48] und wurde erweitert, um spezifische wasserstoffsicherheitsrelevante Phänomene zu berücksichtigen, einschließlich, aber nicht beschränkt auf unter hohem Druck stehende, unterexpandierte Lecks und Dispersion, spontane Entzündung von plötzlich in die Luft freigesetztem Wasserstoff, Strahlbrände mit hohem Impuls, Deflagrationen und Detonationen, Entschärfungstechniken, z. B. Entlüftung von Deflagrationen und natürliche/forcierte Belüftung, usw. Der GSU-Prozess umfasst drei Hauptschritte, wie in Abbildung 31 dargestellt.

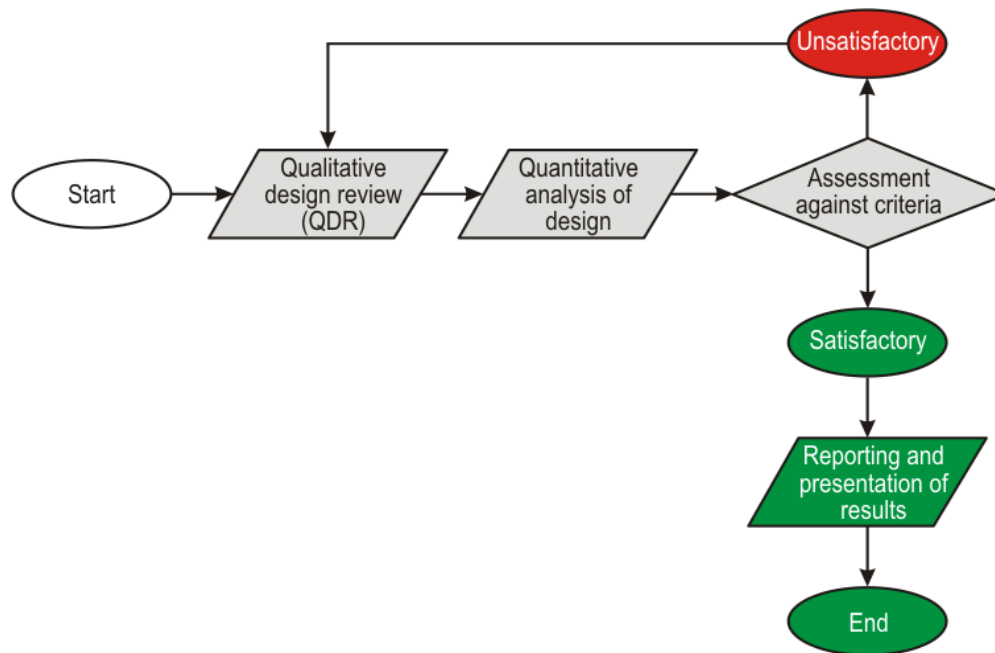


Abbildung 31. Schritte des Prozesses der Wasserstoffsicherheitstechnik [44]

Zunächst wird eine qualitative Entwurfsprüfung (qualitative design review, QDR) von einem Team durchgeführt, dem der Eigentümer, ein Wasserstoffsicherheitsingenieur, ein Architekt, ein Vertreter der zuständigen Behörden, z. B. der Notdienste, und andere Beteiligte angehören können. Das Team definiert Unfallszenarien, schlägt Sicherheitsversuche vor und formuliert Akzeptanzkriterien. Zweitens wird eine quantitative Sicherheitsanalyse ausgewählter Szenarien und Versuchsauslegungen von qualifizierten Wasserstoffsicherheitsingenieuren durchgeführt, wobei der neueste Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Wasserstoffsicherheit sowie validierte Modelle und Werkzeuge zum Einsatz kommen. Drittens wird die Leistung eines Wasserstoff- und/oder Brennstoffzellensystems unter den versuchsweisen Sicherheitsauslegungen anhand vordefinierter Akzeptanzkriterien bewertet. Der QDR ist ein qualitativer Prozess, der auf den Erfahrungen und Kenntnissen des Teams beruht. Er ermöglicht es den Teammitgliedern, eine Reihe von Sicherheitsstrategien festzulegen. Idealerweise muss der QDR-Prozess in einem frühen Stadium des Entwurfsprozesses und auf systematische Weise durchgeführt werden, so dass wesentliche Erkenntnisse und relevante Punkte in den Entwurf der HFC-Anwendung oder -Infrastruktur einfließen können, bevor die Arbeitszeichnungen erstellt werden. In der Praxis wird der QDR-Prozess jedoch wahrscheinlich einige Iterationen beinhalten, da der Entwurfsprozess von einem groben Konzept zu mehr Details übergeht. Während des QDR-Prozesses sollten Sicherheitsziele definiert werden. Sie sollten den besonderen Aspekten des Systementwurfs angemessen sein, da HSE entweder zur Entwicklung einer vollständigen Wasserstoffsicherheitsstrategie oder zur Berücksichtigung nur eines Aspekts des Entwurfs



herangezogen werden kann. Die wichtigsten Ziele der Wasserstoffsicherheit sind der Schutz von Menschenleben, die Schadensbegrenzung und der Schutz der Umwelt. Das QDR-Team sollte einen oder mehrere Sicherheitsauslegungsversuche unter Berücksichtigung ausgewählter Unfallszenarien durchführen. Die verschiedenen Entwürfe könnten dieselben Sicherheitsziele erfüllen und sollten im Hinblick auf Kostenwirksamkeit und Durchführbarkeit miteinander verglichen werden. Auf den ersten Blick ist es wichtig, dass die Versuchsdesigns die Gefahren durch die Umsetzung von Präventionsmaßnahmen begrenzen und die Verringerung der Schwere und Häufigkeit der Folgen sicherstellen. Obwohl die HSE einen gewissen Spielraum lässt, müssen die einschlägigen Vorschriften bei der Festlegung der Versuchspläne unbedingt eingehalten werden.

Das QDR-Team muss die Akzeptanzkriterien festlegen, anhand derer die Leistung eines Entwurfs beurteilt werden kann. Es können drei Hauptmethoden angewandt werden: deterministisch, vergleichend und probabilistisch. Je nach Versuchsdesign kann das QDR-Team Akzeptanzkriterien nach allen drei Methoden festlegen. Das QDR-Team sollte eine Reihe qualitativer Ergebnisse vorlegen, die bei der quantitativen Analyse verwendet werden können: Ergebnisse der Architekturprüfung, Wasserstoffsicherheitsziele, signifikante Gefahren und damit verbundene Phänomene, Spezifikationen der zu analysierenden Szenarien, ein oder mehrere Versuchsdesigns, Akzeptanzkriterien und vorgeschlagene Analysemethoden. Im Anschluss an die QDR sollte das Team entscheiden, welche(s) Versuchsdesign(s) wahrscheinlich optimal ist/sind. Das Team sollte dann entscheiden, ob eine quantitative Analyse erforderlich ist, um nachzuweisen, dass der Entwurf die Ziele der Wasserstoffsicherheit erfüllt. Im Anschluss an den QDR kann eine quantitative Analyse unter Verwendung technischer Teilsysteme (technical subsystems, TSS) durchgeführt werden, bei der verschiedene Aspekte der Analyse durch eine deterministische Studie oder eine probabilistische Studie quantifiziert werden können. Dem Quantifizierungsprozess geht das QDR-Verfahren aus zwei Hauptgründen voraus: um sicherzustellen, dass das Problem vollständig verstanden wird und dass die Analyse die relevanten Aspekte des Wasserstoffsicherheitssystems berücksichtigt; und um das Problem zu vereinfachen und den erforderlichen Berechnungsaufwand zu minimieren. Darüber hinaus sollte das QDR-Team geeignete Analysemethoden festlegen: einfache technische Berechnungen, CFD-Simulationen, einfache probabilistische Studie, vollständige probabilistische Studie, usw. Eine deterministische Studie, die vergleichende Kriterien verwendet, erfordert im Allgemeinen weniger Daten und Ressourcen als ein probabilistischer Ansatz und ist wahrscheinlich die einfachste Methode, um einen akzeptablen Entwurf zu erzielen. Eine vollständige probabilistische Studie dürfte nur dann gerechtfertigt sein, wenn ein grundlegend neues Konzept für die Auslegung von Wasserstoffsystemen oder für die Wasserstoffsicherheitspraxis gewählt wird. Die Analyse kann eine Kombination aus einigen deterministischen und einigen probabilistischen Elementen sein. Nach der quantitativen Analyse sollten die Ergebnisse mit den während der QDR-Übung ermittelten Akzeptanzkriterien verglichen werden. Es gibt drei



Grundtypen von Ansätzen, um die Leistung des Sicherheitssystems mit den Kriterien zu vergleichen:

- Der deterministische Ansatz zeigt, dass auf der Grundlage der ursprünglichen Annahmen eine bestimmte Reihe von Bedingungen nicht eintreten wird;
- Der vergleichende Ansatz zeigt, dass der Entwurf ein Sicherheitsniveau bietet, das dem ähnlicher Systeme entspricht und/oder mit den vorgeschriebenen Normen übereinstimmt (als Alternative zu leistungsbezogenen HSE);
- Der probabilistische Ansatz zeigt, dass das Risiko des Eintretens eines bestimmten Ereignisses akzeptabel niedrig ist, z. B. gleich oder niedriger als das für ähnliche bestehende Systeme festgestellte Risiko.

Erfüllt keine der vom QDR-Team entwickelten Versuchsauslegungen die festgelegten Akzeptanzkriterien, sollten QDR und Quantifizierung so lange wiederholt werden, bis eine Wasserstoffsicherheitsstrategie die Akzeptanzkriterien und andere Auslegungsanforderungen erfüllt. Bei der erneuten Durchführung der QDR können mehrere Optionen in Betracht gezogen werden, die den Empfehlungen [48] folgen: Entwicklung zusätzlicher Versuchspläne; Anwendung eines differenzierteren Entwurfsansatzes, z. B. Verwendung deterministischer Techniken anstelle einer vergleichenden Studie; Neubewertung der Entwurfsziele, z. B. wenn die Kosten der Wasserstoffsicherheitsmaßnahmen zur Verhinderung von Sachschäden den potenziellen Nutzen überwiegen. Wenn eine zufriedenstellende Lösung gefunden wurde, sollte die daraus resultierende GSU-Strategie vollständig dokumentiert werden. Je nach den Besonderheiten und dem Umfang der GSU-Studie könnte die Berichterstattung über die Ergebnisse und Erkenntnisse die folgenden Informationen enthalten, ähnlich den Anforderungen [48]:

- Zielsetzung der Studie;
- Vollständige Beschreibung des HFC-Systems/der HFC-Infrastruktur;
- Ergebnisse des QDR;
- Quantitative Analyse (Annahmen; technische Beurteilungen; Berechnungsverfahren; Validierung von Methoden; Sensitivitätsanalyse);
- Bewertung der Analyseergebnisse anhand von Kriterien;
- Schlussfolgerungen (Strategie für die Wasserstoffsicherheit, Anforderungen an das Management, etwaige Einschränkungen der Verwendung);
- Referenzen (z. B. Zeichnungen, Konstruktionsunterlagen, Fachliteratur usw.). Um die Bewertung eines HSE-Entwurfs zu vereinfachen, wird der Quantifizierungsprozess in mehrere technische Teilsysteme (TSS) aufgeteilt.



Die folgenden Anforderungen sollten bei der Entwicklung der einzelnen TSS berücksichtigt werden:

- Die TSS sollten alle möglichen Aspekte der Wasserstoffsicherheitstechnik so weit wie möglich abdecken;
- Bei den TSS sollte ein ausgewogenes Verhältnis zwischen ihrer Einzigartigkeit oder ihrer Fähigkeit, einzeln genutzt zu werden, und ihren Komplementaritäten und Synergien mit anderen TSS bestehen;
- Die TSS sollten eine Auswahl des neuesten Stands der Technik auf dem Gebiet der Wasserstoffsicherheit, validierter technischer Hilfsmittel, einschließlich empirischer und halbempirischer Korrelationen, und moderner Hilfsmittel wie CFD-Modelle und -Codes sein;
- Die TSS sollten flexibel sein, um die Aktualisierung bestehender oder den Einsatz neuer geeigneter und validierter Methoden zu ermöglichen, die den jüngsten Fortschritten in Wissenschaft und Technik der Wasserstoffsicherheit Rechnung tragen.

Die folgenden TSS werden derzeit für [46] vorgeschlagen und entwickelt:

- TSS1: Auslösung der Freisetzung und Ausbreitung;
- TSS2: Zündungen;
- TSS3: Deflagrationen und Detonationen;
- TSS4: Brände;
- TSS5: Auswirkungen auf Menschen, Strukturen und Umwelt;
- TSS6: Abschwächungstechniken;
- TSS7: Einsatz der Notdienste.

Die Wasserstoff-Sicherheitstechnik ist ein Schlüssel zum Erfolg der Wasserstoffwirtschaft. Sie ist das leistungsfähige Instrument für die Bereitstellung von Wasserstoffsicherheit durch qualifizierte Fachleute auf dem wachsenden Markt der HFKW-Systeme und -Infrastruktur. Nicht zuletzt kann die GSU ein hohes Maß an Wettbewerbsfähigkeit für Wasserstoff- und Brennstoffzellenprodukte sicherstellen.

11. Einführung in das e-Labor

Die Aus- und Weiterbildung für den aufstrebenden Brennstoffzellen- und Wasserstoffsektor (FCH) ist entscheidend für die berufliche Entwicklung der derzeitigen und künftigen Arbeitskräfte. Dies untermauert die Führungsrolle und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen FCH-Produkte. Im Rahmen des europäischen Projekts "Novel Education and Training Tools based on digital Applications related to Hydrogen and Fuel Cell Technology" (neuartige Lehr- und Trainingswerkzeuge basierend auf digitalen Anwendungen in Verbindung zu Wasserstoff-



und Brennstoffzellentechnologie, NET-Tools) wurde zunächst ein Online-Repository mit digitalen Werkzeugen - das e-Laboratorium - entwickelt. Das ursprüngliche NET-Tools e-Laboratorium umfasst eine umfangreiche Reihe von digitalen Werkzeugen. Diejenigen Tools, die für Einsatzkräfte als besonders relevant erachtet werden, wurden über das e-Labor für Wasserstoffsicherheit zur Verfügung gestellt, das über die HyResponder e-Plattform (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) oder direkt unter <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/> zugänglich ist.

Die leistungsabhängige Berechnung von Gefahrenabständen, ein Begriff, der kürzlich von ISO TC197 Hydrogen Technologies eingeführt wurde, ist ein Schlüsselement der Wasserstoffsicherheitstechnik für FCH-Systeme und -Infrastrukturen, z. B. Tankstellen. Die dem e-Labor für Wasserstoffsicherheit zugrunde liegenden Prinzipien ermöglichen die Bewertung von Gefahrenabständen für nicht gezündete Freisetzungen (Größe der brennbaren Hülle), gezündete Freisetzungen (Düsenbrände), den Zerfall von Druckwellen durch Deflagrationen, Detonationen und den Bruch von Hochdruck-Wasserstoffspeichern bei Bränden, Feuerbällen usw. Diese von der Wasserstoffindustrie seit langem erwartete Toolbox ermöglicht die Bestimmung von Gefahrenabständen für nicht gezündete Freisetzungen und Strahlbrände im interaktiven Modus, z. B. durch Variation von Systemparametern wie Druck und Rohr-(Leck-)Durchmesser. Die hochmodernen Sicherheitstools des e-Laboratory of Hydrogen Safety sind eine frei zugängliche, erweiterte europäische Analogie des HyRAM-Tools (Hydrogen Risk Assessment Methods, Wasserstoff Risikobewertungsmethoden), das von den Sandia National Laboratories (SNL) im letzten Jahrzehnt mit finanzieller Unterstützung des US-Energieministeriums entwickelt wurde. Das e-Labor demonstriert die europäische Führungsrolle im Bereich der Wasserstoffsicherheitstechnik, z. B. durch die Fähigkeit, die durch die thermischen und druckbedingten Auswirkungen eines Feuerballs und einer Druckwelle nach dem Bruch eines Tanks bei einem Brand ermittelten Gefahrenabstände zu berechnen, die im HyRAM-Tool nicht vorhanden sind, und ein ähnlicher kanadischer (UTRQ) Rahmen wird mit der Smalltalk-Seaside-Webentwicklungsumgebung implementiert.

11.1 Wissenschaftliche Grundsätze

In diesem Abschnitt werden die wissenschaftlichen Grundsätze beschrieben, die den technischen Werkzeugen des e-Labors für Wasserstoffsicherheit zugrunde liegen. Die Werkzeuge sind nach Ähnlichkeit der Anwendungen in Gruppen zusammengefasst.

11.1.1 Ungezündete Freisetzungen

Die Theorie des unterexpandierten Strahls [44, 49] steht hinter den "Strahlparametern" und anderen Werkzeugen im Zusammenhang mit unterexpandierten Strahlen. Sie ermöglicht die Berechnung der Wasserstoffströmungsparameter in realen und fiktiven Düsen. Die Dichte in der realen Düse wird für die Verwendung im Ähnlichkeitsgesetz für den Konzentrationsabfall im Wasserstoffstrahl [54, 50] und die Parameter in der fiktiven Düse benötigt, die weithin als Randbedingungen für numerische Strömungssimulationen (CFD) verwendet werden. Das Tool



ermöglicht die Berechnung des Massendurchsatzes der Hochdruck-Wasserstofffreisetzung sowohl durch eine Öffnung in einem Speicherbehälter als auch durch einen engen Kanal mit Verlusten. Das Tool zur Vorhersage des axialen Konzentrationsabfalls eines austretenden Wasserstoffs für Unterschall-, Überschall- und Überschallstrahlen verwendet das Ähnlichkeitsgesetz, das in einem breiten Spektrum von Bedingungen von expandierten bis zu stark unterexpandierten Strahlen validiert ist [44]. Dieses Tool berechnet die Gefahrendistanz, d. h. die Länge der brennbaren Hülle, für impulsdominierte Strahlen, die praktisch alle realistischen Freisetzungen aus Hochdruck-Wasserstoffanlagen und -speichern darstellen.

Die Theorie des unterexpandierten Strahls wird verwendet, um das im nächsten Abschnitt beschriebene universelle Ähnlichkeitsgesetz zu erstellen und zu validieren, das sowohl für expandierte als auch für unterexpandierte Strahlen im impulskontrollierten Regime gültig ist. Die Theorie wird angewandt, um die universelle Korrelation für die Länge der Wasserstoffstrahlflamme, das Werkzeug für die Berechnung der Abblaszeit der Wasserstofffreisetzung aus dem Speicherbehälter usw. abzuleiten. Die Theorie ist von grundlegender Bedeutung für die Durchführung von Wasserstoffsicherheitstechniken für verschiedene Anwendungen.

11.1.2 Das Ähnlichkeitsgesetz

Es ist zu beachten, dass die thermischen Auswirkungen von Düsenbränden, die Druckauswirkungen einer Deflagration oder Detonation sowie die Druck- und thermischen Auswirkungen des Bruchs eines Hochdruckspeichers bei einem Brand (Druckwelle und Feuerball) die durch die Größe der brennbaren Hülle oder die Gefahrenabstände eines Düsenfeuers bestimmte Gefahrendistanz überlagern können. Daher ist die Kenntnis der Gesetze zur Beschreibung der Wasserstoffausbreitung und der Bildung brennbarer Wolken, einschließlich des axialen Konzentrationsabfalls für beliebige Strahlen, für die Wasserstoffsicherheitstechnik von wesentlicher Bedeutung.

Abbildung 32 zeigt das Ähnlichkeitsgesetz zur Vorhersage des axialen Konzentrationsabfalls eines austretenden Gases für Unterschall-, Überschall- und Überschallstrahlen, das in [44, 50] abgeleitet und vorgestellt wurde. Es gilt für einen weiten Bereich von Bedingungen von expandierten bis zu stark unterexpandierten Strahlen. Sie kann für die Berechnung von Gefahrenabständen verwendet werden, die von der Größe der brennbaren Hülle abhängen. Das nicht-ideale Verhalten von Wasserstoff bei hohen Drücken und die Unterexpansion der Strömung in einem Düsenausgang werden unter Verwendung der Abel-Noble-Zustandsgleichung (equation of state, EoS) für reales Gas berücksichtigt.

Für Wasserstoffstrahlen in stehende Luft bei einer festen Konzentration, ausgedrückt in Massenprozent C_{ax} , ist das Verhältnis zwischen einem Abstand x und dem Düsendurchmesser eine Konstante, d. h. $x/D = \text{const}$. Das bedeutet, dass der Abstand zur unteren Entflammbarkeitsgrenze (Gefahrenabstand) direkt proportional zum Leckdurchmesser ist. Bei der Auslegung von Wasserstoff- und Brennstoffzellensystemen muss daher berücksichtigt

werden, dass der Innendurchmesser der Rohrleitungen, d. h. die Leckgröße für ein konservatives VollbruchszENARIO, minimiert werden muss, wobei die technischen Anforderungen an den Massendurchsatz einzuhalten sind.

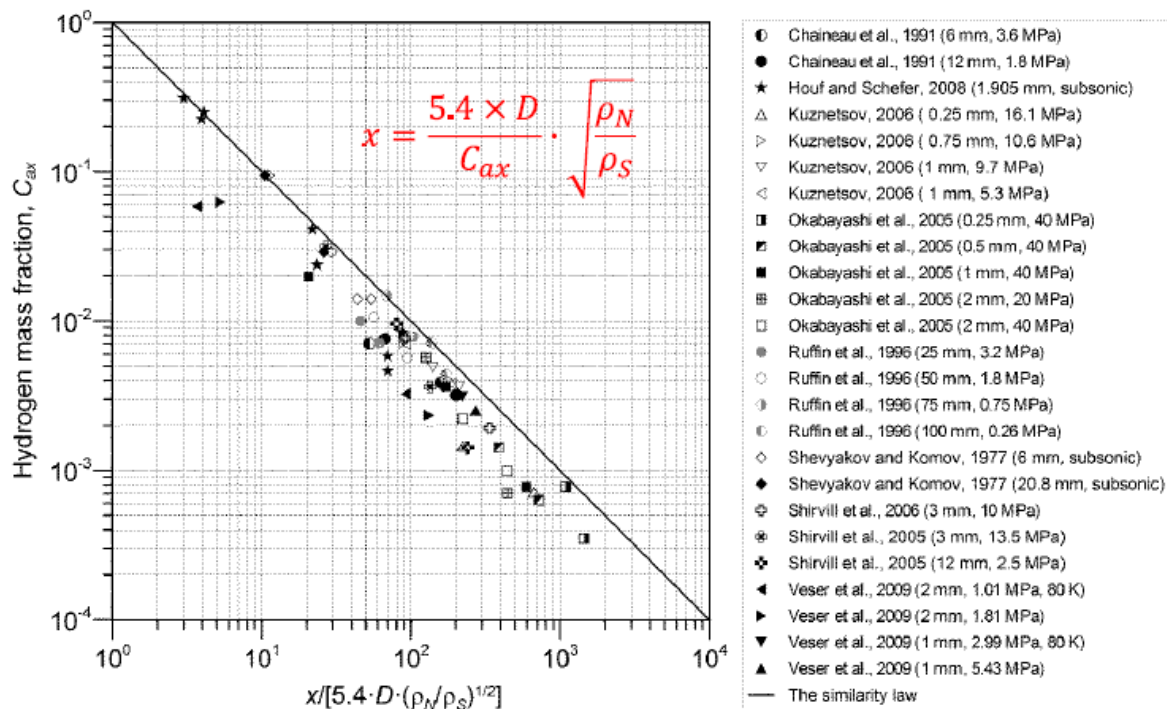


Abbildung 32. Ähnlichkeitsgesetz [44]

11.1.3 Wirkung des Auftriebs

Mit dem Tool "Auswirkung des Auftriebs" kann die Verringerung der Gefahrendistanz für ursprünglich impulsdominierte Wasserstoffstrahlen berechnet werden, wenn sie sich in einen auftriebsgesteuerten Strahl verwandeln. Es basiert auf der an Experimenten validierten Theorie von Shevyakov, die an anderer Stelle zu finden ist [44]. Das technische Verfahren [44] bestimmt, welcher Teil des Wasserstoffstrahls (sowohl der expandierte als auch der unterexpandierte) impuls gesteuert ist, während der Rest des Strahls stromabwärts durch Auftrieb gesteuert wird.

Es gibt drei Arten von Strahlen, die von der Rolle des Auftriebs abhängen Abbildung 33 (links): Vollständig impuls gesteuerte Strahlen werden vom Auftrieb nicht beeinflusst; vollständig auftriebs gesteuerte Strahlen werden schnell von der horizontalen in die vertikale Strömungsrichtung umgeleitet; die dritte Art von Strahlen ist ein Übergang mit einem impulsdominierten Teil näher an der Düse und einer auftriebs gesteuerten Strömung weiter stromabwärts, wenn die Strahlgeschwindigkeit abnimmt und der Durchmesser zunimmt. Für die Wasserstoffsicherheitstechnik ist es wichtig zu wissen, wann dieser Übergang stattfindet.

Dies hat direkte Auswirkungen auf die Gefahrenentfernung und damit auf die Infrastrukturkosten.

Fünf theoretische Kurven (durchgezogene Linien) und experimentelle Daten für expandierte Strahlen sowie Daten anderer Forscher für unterexpandierte Strahlen sind in Abbildung 33 (rechts) dargestellt. Praktisch alle unterexpandierten Strahlen bei Wasserstoffzwischenfällen/-unfällen befinden sich im impuls-gesteuerten Bereich, wie aus den verfügbaren Tests zur Validierung der Korrelation hervorgeht. Vier der fünf theoretischen Kurven im Diagramm beziehen sich auf Wasserstoffkonzentrationen von 4 %, 17 %, 30 % bzw. 60 % des Volumens. Jede dieser vier Kurven hat einen ansteigenden Auftriebsteil und einen "Plateau"-Teil. Die fünfte Kurve "Abwärts gerichtete Strahlen" ist von besonderem Interesse. Sie gibt für einen senkrecht nach unten gerichteten Strahl einen dimensionslosen Abstand von der Düse bis zum Wendepunkt an, an dem der Strahl seine Strömungsrichtung von unten nach oben ändert. Die fünfte Kurve schneidet erwartungsgemäß jede der vier anderen Kurven im Diagramm im Bereich des Übergangs von der impulsdominierten zur auftriebs-gesteuerten Strömung.

Die einfach anzuwendende Technik in Abbildung 33 (rechts) kann sehr nützlich sein, um kosteneffiziente technische Lösungen für die Wasserstoffsicherheit zu entwickeln. So kann beispielsweise der Gefahrenabstand bei einer horizontalen Strahlfreisetzung wesentlich verringert werden, da nur die Länge des impulsdominierten Teils des Strahls als Hinweis auf die Trennung herangezogen werden kann und nicht der aggregierte Abstand, d. h. sowohl impuls- als auch auftriebs-gesteuerte Teile des Strahls bis zur unteren Entflammbarkeitsgrenze (LFL) von 4 Volumenprozent Wasserstoff.

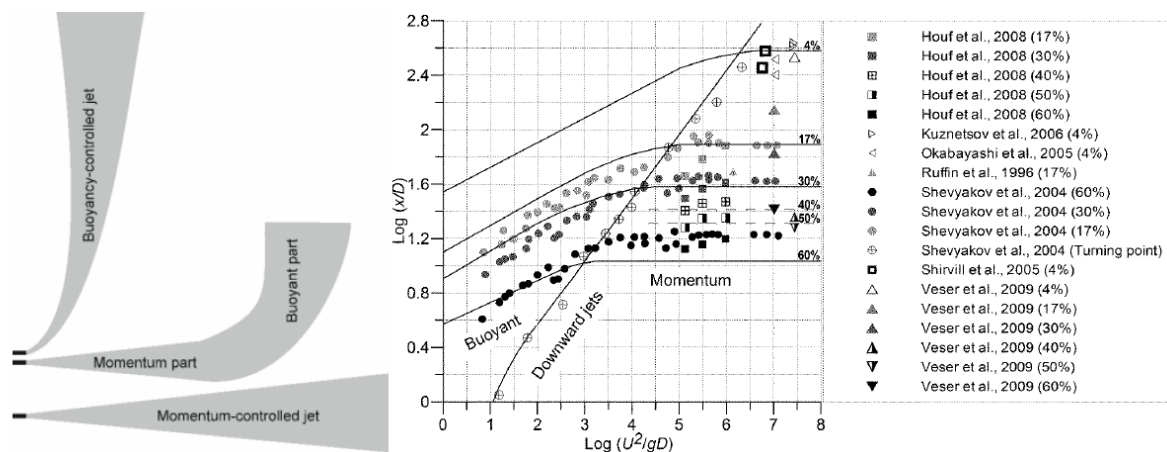


Abbildung 33. Strahltypen in Abhängigkeit von der Rolle des Auftriebs (links), Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Abstand und Düsendurchmesser x/D bei einer bestimmten Wasserstoffkonzentration in der Luft von der Froude-Zahl (rechts).

11.1.4 Ausblasung

Das Tool "Blowdown of storage tank" berechnet die Druckdynamik im Tank während der Freisetzung für adiabatische und isotherme Bedingungen, die kombiniert werden können, um



die Blowdown-Dynamik realitätsnäher abzubilden. Beide Modelle ergeben eine ähnliche Druckdynamik, aber eine unterschiedliche Temperaturdynamik des freigesetzten Wasserstoffs.

Das adiabatische Abblasemodell basiert auf der Annahme einer schnellen Freisetzung aus einem Hochdruckreservoir und vernachlässigbarer Wärmeübertragungseffekte auf die Temperatur des freigesetzten Wasserstoffs. Das adiabatische Modell ergibt eine niedrigere Temperatur des freigesetzten Wasserstoffs am Ende des Prozesses. Bei der isothermen Abschlämmung eines Speichertanks wird hingegen von einer relativ langen Freisetzung aus einem Hochdruckspeicher ausgegangen, so dass die Wärmeübertragung die Temperatur des ausströmenden Wasserstoffs erheblich verändert. Die Kombination aus einem adiabatischen Modell zu Beginn und einem isothermen Modell am Ende des Prozesses liefert eine gute Annäherung an die in Experimenten beobachtete Temperaturdynamik des freigesetzten Wasserstoffs.

Beide Modelle basieren auf dem Modell für expandierte und unterexpandierte Strahlparameter, das die Parameter eines expandierten und unterexpandierten Strahls in den charakteristischen Stadien seiner Entwicklung - im Speicher, in der Öffnung und am fiktiven (effektiven) Düsenaustritt - beschreibt und die Abel-Noble EoS sowie die Erhaltungsgleichungen für Masse und Energie verwendet.

Das Tool kann zur Formulierung von Abhilfemaßnahmen und Sicherheitsstrategien auf der Grundlage der Feuerwiderstandsfähigkeit des Wasserstoffspeichers an Bord verwendet werden. Die Feuerwiderstandsklasse sollte größer sein als die Summe der Zeit für die Auslösung einer thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtung (TPRD) und der Abblasezeit des Speichertanks, um ein katastrophales Versagen im Brandfall auszuschließen. Natürlich würde die Verwendung einer TPRD mit einem größeren Durchmesser eine größere brennbare Wolke oder eine Stichflamme erzeugen. Sie würde bei der "verzögerten Zündung" oder der Verpuffung der turbulenten brennbaren Wolke einen höheren Überdruck erzeugen. Aus diesem Grund sollte der TPRD-Durchmesser so weit wie möglich verringert werden, sofern die Feuerwiderstandsfähigkeit entsprechend erhöht wird.

11.1.5 Passive Belüftung

Das Tool "Passive Belüftung" ermöglicht die Berechnung der Wasserstoffkonzentration in einem Gehäuse mit bekannter Entlüftungsgröße für die gegebene Freisetzungsrate oder die Lösung der Methode des umgekehrten Problems (Berechnung der Entlüftungsgröße, um die Konzentration bei bekannter Wasserstofffreisetzungsrate unter dem gewünschten Wert zu halten).

Das Modell wurde unter der Annahme einer perfekten Durchmischung entwickelt, und die Gleichungen für die passive (Freisetzung von brennbaren oder toxischen Gasen) und die natürliche Belüftung (Luftqualitätsprobleme) wurden verglichen [51], um den wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Ansätzen aufzuzeigen. Die Gleichungen für die natürliche

Belüftung werden in der Regel unter der Annahme abgeleitet, dass sich die neutrale Ebene auf halber Höhe der Entlüftungsöffnung befindet; bei der passiven Belüftung einer unbeabsichtigten Freisetzung in einem geschlossenen Raum kann die neutrale Ebene jedoch überall unterhalb der halben Entlüftungshöhe liegen. Die Entwicklung des Modells für die passive Belüftung hat gezeigt, dass die genaue analytische Lösung für die passive Belüftung von der Näherungslösung für die natürliche Belüftung um mehr als das Zweifache für magere und fette Gemische abweicht, wie in Abbildung 34 dargestellt, wobei X der Wasserstoffmolanteil ist.

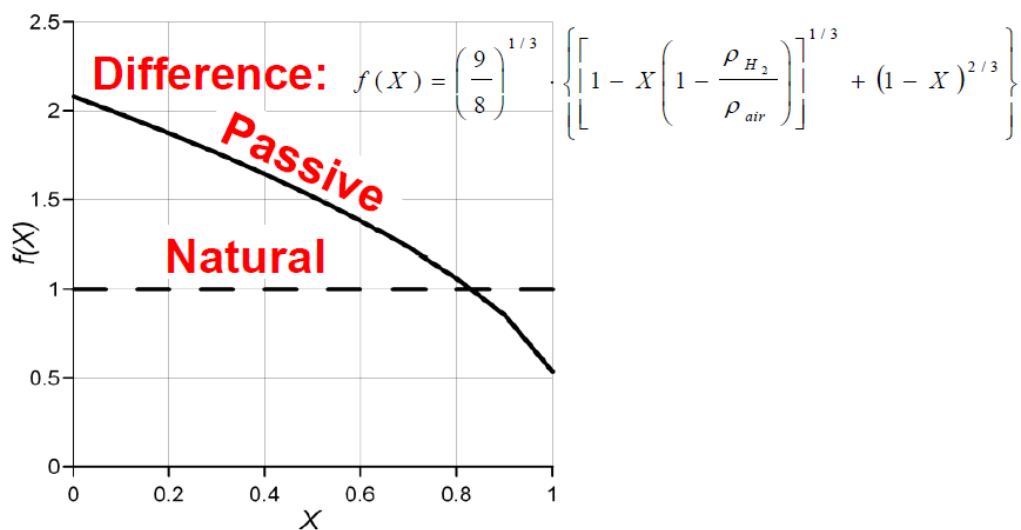


Abbildung 34. Unterschied zwischen passiver und natürlicher Belüftung

Dies könnte schwerwiegende Auswirkungen auf die Sicherheit haben und sollte bei der Durchführung von Sicherheitstechnik im Zusammenhang mit Wasserstofffreisetzungen mit Vorsicht behandelt werden. Die Theorie der passiven Belüftung besagt, dass eine vertikale Entlüftung im Vergleich zu einer horizontalen Entlüftung desselben Bereichs effizienter ist, was bei der Planung von passiven Belüftungssystemen berücksichtigt werden sollte.

11.1.6 Zwangsweise Belüftung

Das Tool "Zwangsbelüftung" berechnet die Parameter des mechanischen Belüftungssystems, um die Wasserstoffkonzentration unter dem erforderlichen Niveau zu halten. Zu den Parametern gehört der Volumenstrom der Luft, der erforderlich ist, damit der gegebene Massendurchsatz des Wasserstoffs unter dem festgelegten Grenzwert liegt, wobei von einer perfekten Durchmischung ausgegangen wird. Das Modell basiert auf den Grundsätzen der passiven Belüftung und der Berechnung des Belüftungsdurchsatzes, der erforderlich ist, um die Wasserstoffkonzentration in einem Raum unter dem erforderlichen Niveau zu halten. Die Anwendung der Zwangsbelüftung in numerischen Experimenten bestätigte die Berechnungen und zeigte eine Verringerung der Gaskonzentration auf das erforderliche Niveau. Dies bestätigt, dass die vorgeschlagene Methodik zur Berechnung der Belüftungsrate für

Brennstoffzellen- und Wasserstoffsysteme angewandt werden kann und als Werkzeug für die Wasserstoffsicherheitstechnik geeignet ist.

11.1.7 Druckspitzenphänomen

Das 2010 in Ulster entdeckte Druckspitzenphänomen (pressure peaking phenomen, PPP) [52] ist eine weitere Besonderheit des e-Laboratory of Hydrogen Safety, die in anderen ähnlichen Programmen zur Gefahren- und Risikobewertung nicht verfügbar ist. Es ermöglicht die Berechnung der Druckdynamik in einem geschlossenen Raum wie einer Garage im Falle einer ungeplanten Freisetzung von Wasserstoff. Es sind sowohl Optionen für die Freisetzung von Wasserstoff durch Abblasen als auch für die Freisetzung mit konstantem Massendurchsatz verfügbar. Das Tool ist sowohl für gezündete (Brand durch TPRD) als auch für nicht gezündete (TPRD-Ausfall) Freisetzungen einsetzbar.

Das Phänomen der Druckspitze ist nur für Gase charakteristisch, die leichter als Luft sind, wenn sie in ein Gehäuse mit einem begrenzten Bereich von Entlüftungsöffnungen freigesetzt werden. Das PPP ist bei einer gezündeten Freisetzung stärker ausgeprägt als bei einer nicht gezündeten Freisetzung aus derselben Quelle [53], siehe Abbildung 35. Die ISO-Norm schreibt vor, dass das PPP bei der Durchführung von Wasserstoffsicherheitstechniken für die Verwendung von Wasserstoff- und Brennstoffzellensystemen in Innenräumen berücksichtigt werden muss.

Die Verhinderung und Abschwächung des PSM kann nur durch die Verringerung des Massendurchsatzes des TPRD, d. h. seines Düsendurchmessers, erreicht werden. Dies wiederum erfordert eine höhere Feuerwiderstandsfähigkeit der fahrzeugseitigen Lagertanks.

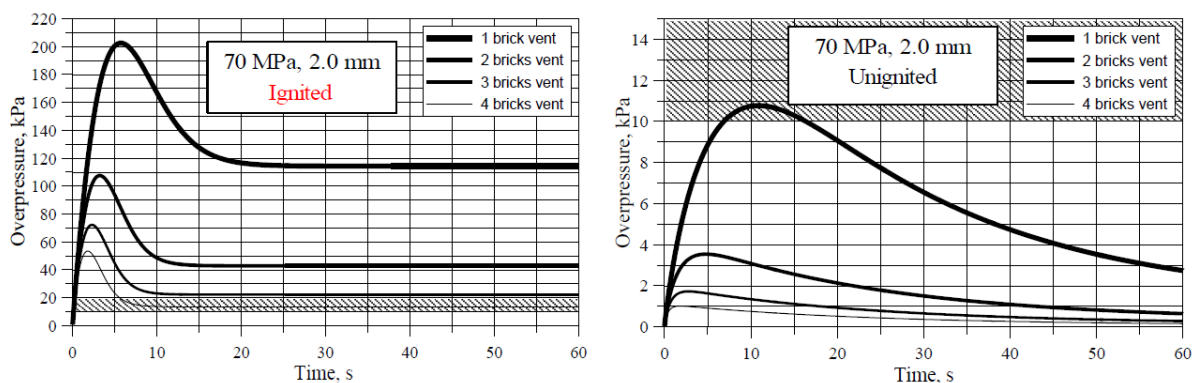


Abbildung 35. Überdruckdynamik eines Wasserstoffstrahlfeuers in der Garage: TPRD-Durchmesser 2 mm und Speicherdruck 70 MPa (Freisetzungsrates 107 g/s) gezündet (links) vs. nicht gezündet (rechts) [53].

11.1.8 Entfernungen für Strahlenfeuer

Das "Jet fire"-Tool verwendet die dimensionslose Wasserstoff-Flammenlängenkorrelation [50] zur Berechnung von drei Gefahrenabständen, d. h. "no harm"-Abstand bis $T=70^{\circ}\text{C}$, der dem

3,5-fachen der Flammenlänge entspricht; "pain limit" (115 °C, 5 min), der dem 3-fachen der Flammenlänge entspricht; und "fatality limit" (309° C, 20 s), der dem 2-fachen der Flammenlänge entspricht. Die universelle Flammenlängenkorrelation umfasst laminare und turbulente Flammen, auftriebs- und impulsgesteuerte Brände, expandierte (Unterschall- und Schall-) und unterexpandierte (Schall- und Überschall-) Strahlbrände und deckt damit das gesamte Spektrum der Wasserstoffreaktionslecks ab [50]. Theoretische und experimentelle Ergebnisse zeigen, dass die Flammenlänge nicht nur von der Froude-Zahl (Fr), sondern auch von der Reynolds-Zahl (Re) und der Mach-Zahl (M) abhängt, und in dieser Korrelation werden alle berücksichtigt. Einer ihrer Vorteile ist das Fehlen von Parametern am fiktiven Düsenaustritt, die unter der Annahme einer Schallströmung an der fiktiven Düse mit begrenztem Gültigkeitsbereich abgeleitet werden. Für die Vorhersage der Flammenlänge werden nur die Parameter am tatsächlichen Düsenaustritt benötigt: Durchmesser, Wasserstoffdichte und Strömungsgeschwindigkeit, die Schallgeschwindigkeit bei Druck und Temperatur am realen Düsenaustritt. Die dimensionslose Korrelation für die Länge der Wasserstoffstrahlflamme in ruhender Luft ist $L_F/D - (\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$ und in Abbildung 36 dargestellt. Dabei ist L_F die Flammenlänge, D der Düsendurchmesser ρ_N und die ρ_S Freisetzungsdichte an der Düse bzw. der umgebenden Luft, während U_N und C_N die Geschwindigkeit an der Düse und die Schallgeschwindigkeit des freigesetzten Gases in der Düse sind.

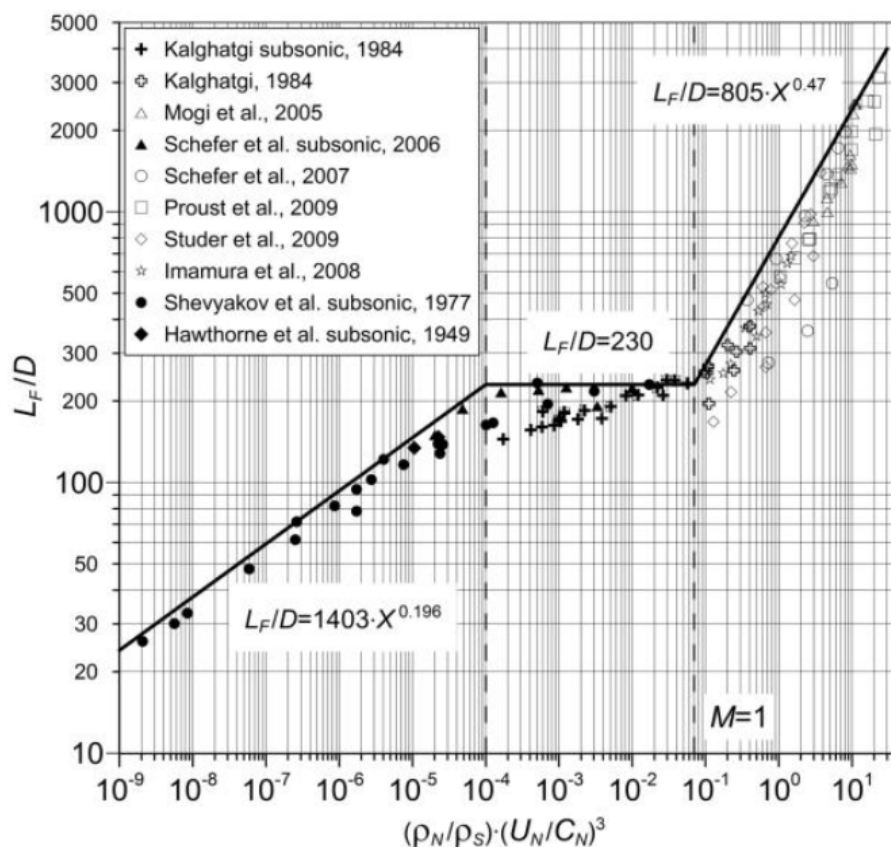


Abbildung 36. Dimensionslose Flammenlängenkorrelation [50]



Die Verwendung der Korrelation erfordert die Anwendung einer unterexpandierten Strahltheorie zur Berechnung dieser Parameter. Die Unsicherheiten bei der Berechnung der Strömungsparameter am tatsächlichen Düsenausgang sind geringer als die Unsicherheiten an der fiktiven Düse. Tatsächlich gibt es eine starke Ungleichmäßigkeit der Geschwindigkeit stromabwärts der Mach-Scheibe, die von der für alle unterexpandierten Strahltheorien üblichen Annahme einer gleichmäßigen Geschwindigkeit am fiktiven Düsenausgang abweicht.

11.1.9 Entschärfung von Verpuffungen

Im e-Laboratorium für Wasserstoffsicherheit gibt es drei Werkzeuge zur Deflagrationsminderung: Dimensionierung der Entlüftungsöffnungen von Umschließungen mit gleichmäßigem Wasserstoff-Luft-Gemisch [54], Dimensionierung der Entlüftungsöffnungen von Umschließungen mit örtlich ungleichmäßigem Gemisch [55], Berechnung der Obergrenze des Wasserstoffinventars, das in einem geschlossenen Raum wie einem Lager zugelassen werden kann [55].

Die Korrelation für die Dimensionierung von Entlüftungsöffnungen für ein gleichmäßiges Wasserstoff-Luft-Gemisch in einem entlüfteten Gehäuse [54] basiert auf den jüngsten Fortschritten im Verständnis und in der Modellierung von Verbrennungsphänomenen, die für entlüftete Wasserstoff-Luft-Deflagrationen relevant sind, sowie auf einzigartigen Großversuchen, die von verschiedenen Forschungsgruppen durchgeführt wurden. Zu den Verbrennungsphänomenen, die durch die Korrelation berücksichtigt werden, gehören: die von der Flammenfront selbst erzeugte Turbulenz; der Mechanismus des führenden Punktes, der sich aus der bevorzugten Diffusion von Wasserstoff in Luft in gestreckten Flammen ergibt; das Wachstum der fraktalen Fläche der turbulenten Flammenoberfläche; die anfängliche Turbulenz im brennbaren Gemisch sowie die Auswirkungen des Seitenverhältnisses des Gehäuses und der Anwesenheit von Hindernissen. Das Tool ermöglicht die Berechnung der Entlüftungsfläche, um den Deflagrationsdruck auf den gewünschten Grenzwert zu reduzieren, und die Abschätzung des Überdrucks in der entlüfteten Umhüllung für die Entlüftungsöffnung einer bestimmten Größe.

Das Modell für örtlich begrenzte ungleichmäßige Gemische [55] beschreibt Deflagrationen von Wasserstoff-Luft-Gemischen und definiert Sicherheitsanforderungen für entlüftete Deflagrationen von örtlich begrenzten Gemischen in einer Umschließung. Beispiele für örtlich begrenzte Gemische sind "Gastaschen" innerhalb eines Gehäuses sowie geschichtete Gasverteilungen, die für Wasserstofffreisetzungen besonders relevant sind. Es ermöglicht die Abschätzung des maximalen Überdrucks innerhalb der entlüfteten Umschließung sowie die Berechnung der Größe der Entlüftungsöffnung, um die erforderliche Sicherheitsgrenze nicht zu überschreiten.

Ein thermodynamisches Modell zur Vorhersage der maximalen Masse an Wasserstoff, die in einem Gehäuse mit einem bestimmten Volumen freigesetzt werden kann, ohne dass es zu einem zerstörerischen Deflagrationsüberdruck kommt, wurde entwickelt [55] und als



Werkzeug im e-Labor eingesetzt. Das Modell geht davon aus, dass ein Gehäuse teilweise mit Luft und einem Wasserstoff-Luft-Gemisch gefüllt ist. Wird dieses Wasserstoff-Luft-Gemisch in einem geschlossenen Gehäuse verbrannt, kann die Modelllösung für den resultierenden Absolutdruck gefunden werden. Das Tool ermöglicht die Berechnung der Masse des Inventars für den gegebenen Überdruck und das Volumen des Gehäuses sowie des Volumens des Gehäuses für den gegebenen Überdruck und die Masse des Inventars.

11.1.10 Druckwelle und Feuerball nach dem Bruch eines Tanks bei einem Brand

Das Überdruckabbau-Tool "Druckwelle" ist für eigenständige Szenarien und Szenarien mit Lagertanks unter Fahrzeugen verfügbar. Das entwickelte Modell berücksichtigt die realen Gaseffekte und die Verbrennung des in die Luft freigesetzten brennbaren Gases (chemische Energie) als Beitrag zur Stärke der Druckwelle [56]. Die chemische Energie der Verbrennung wird dynamisch zur mechanischen Energie addiert und in der energieskalierten dimensionslosen Entfernung berücksichtigt. Das Modell kann als sicherheitstechnisches Hilfsmittel für typische Anwendungen der Wasserstoffspeicherung eingesetzt werden, z. B. in Fahrzeugtanks und in Tanks von Tankstellen, die für sich allein stehen. Das Vorhersagemodell für die Berechnung von Gefahrenabständen, die durch die Parameter einer Druckwelle definiert sind, die durch den Bruch eines Hochdruck-Gasspeichers im Brandfall erzeugt wird.

Das Tool zur Berechnung des Durchmessers des "Feuerballs" nach dem Bruch eines Wasserstofftanks bei einem Brand basiert auf der Annahme einer vollständigen Verbrennung des freigesetzten Wasserstoffs in der Luft [56, 57]. Es basiert auf einer begrenzten Menge an experimentellen Daten und bedarf daher einer weiteren Validierung.

11.2 Zusammenfassung des e-Labors

Die wissenschaftlichen Grundsätze hinter den technischen Werkzeugen des e-Labors für Wasserstoffsicherheit, das unter <https://hyresponder.eu/e-platform/> verfügbar ist, werden im Überblick dargestellt. Die entwickelten technischen Hilfsmittel werden für den freien Zugang der Interessengruppen implementiert. Die in den Online-Tools implementierten Modelle beruhen auf Veröffentlichungen in Fachzeitschriften mit Peer-Review und wurden anhand von Experimenten validiert.

Referenzen

1. HyResponse Deliverable D2.1 -Beschreibung ausgewählter FCH-Systeme und -Infrastrukturen, relevante Sicherheitsmerkmale und Konzepte (2014). Verfügbar unter: <http://www.hyresponse.eu> [Zugriff am 10.10.20].
2. Mays, T. (2014). Wissenschaftlicher Fortschritt und technologische Engpässe bei der Wasserstoffspeicherung. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23-27 Juni 2014, Kreta, Griechenland.
3. Rigas, F. und Amyotte, P. (2013). Hydrogen safety. Boca Raton: CRC Press. Taylor and Francis Group.
4. Rigas, F. und Amyotte, P. (2013). Mythen und Fakten über Wasserstoffgefahren. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
5. UMWELT GRAFFITI ALPHA (2010). Die Hindenburg-Katastrophe in Bildern. Verfügbar unter: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenbergdisaster-accident-waiting-happen>. [Zugriff am 24.12.11].
6. Weltforum für die Harmonisierung der Regelungen für Kraftfahrzeuge (WP.29), 160. Sitzung, Genf, 25-28 Juni 2013.
7. US DoE, US Department of Energy (2008). Wasserstoff-Sicherheitstraining für Ersthelfer. Verfügbar unter: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [Zugriff am 06.11.20].
8. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Verfügbar unter: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [Zugriff am 01.05.14].
9. HyFLEETE-CUTE (2006-2009). Verfügbar unter: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [Zugriff am 04.11.2020].
10. Zaetta, R. und Madden, B. (2011). Das nächste HyLights-Projekt. Deliverable 3.1: Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review.
11. California Fuel Cells Partnership, 2014. Verfügbar unter: <http://cafcp.org/> [Zugriff am 06.11.20].
12. Adams, P. (2004). Ermittlung des optimalen Speicherdrucks an Bord von Stadtbussen mit gasförmigem Wasserstoff. European Integrated Hydrogen project - Phase 2 (EIHP2), März 2004.
13. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [Zugriff am 06.11.2020]
15. Dincer, I., Acar, C. (2016). Ein Überblick über den potenziellen Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt. International Journal of Sustainable Aviation, 2: 74-100.
16. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [Zugriff am 06.11.2020].



17. Bicer, Y., Dincer, I. (2017). Life Cycle Evaluation of Hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 10722-10738
18. Koroneos, C. J., & Moussiopoulos, N. (2002). Kryoplane -Wasserstoff vs. Kerosin als Flugzeugtreibstoff. *Proceedings of the Geophysical Society XXVII General Assembly, Nizza, Frankreich*, S. 21-26.
19. Contreras, A., Yiğit, Özay, K., & Veziroğlu, T. N. (1997). Wasserstoff als Flugkraftstoff: ein Vergleich mit Kohlenwasserstoff-Kraftstoffen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22: 1053-1060
20. Lee DS, Pitari G, Grewe V, Gierens K, Penner JE, Petzold A, Prather MJ, Schumann U, Bais A, Bernsten T, Iachetti D, Lim LL, Sausen R. Transport impacts on atmosphere and climate: aviation. *Atmos Environ* 2010;44(37):4678-734
21. Contreras A, Yiğit S, Özay K, Veziroğlu TN. Wasserstoff als Flugkraftstoff: ein Vergleich mit Kohlenwasserstoff-Kraftstoffen. *Int J Hydrog Energy* 1997;22(10-11):1053-60.
22. Khandelwal B, Karakurt A, Sekaran PR, Sethi V, Singh R. Hydrogen powered aircraft: the future of air transport. *Prog Aerosp Sci* 2013;60:45-59.
23. Verstraete D. Langstreckentransportflugzeuge mit Wasserstoff als Kraftstoff. *Int J Hydrog Energy* 2013;38(34):14824-31.
24. Verstraete D. Das Potenzial von Flüssigwasserstoff für den Antrieb von Langstreckenflugzeugen; 2009
25. Sharpe JE, Bimbo N, Ting VP, Rechain B, Joubert E, Mays TJ. Modellierung des Potenzials von adsorbiertem Wasserstoff für den Einsatz in der Luftfahrt. *Microporous Mesoporous Mater* 2015;209:135-40
26. Nojumi H, Dincer I, Naterer GF. Bewertung der Treibhausgasemissionen von wasserstoff- und kerosinbetriebenen Flugzeugantrieben. *Int J Hydrog Energy* 2009;34(3):1363-9
27. Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications. *Int J Hydrog Energy* 2014;39(20):10731-47
28. Verstraete D. On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft. *Int J Hydrog Energy* 2015;40(23):7388-94.
29. Fernandes MD, de ST, Andrade P, Bistrizki VN, Fonseca RM, Zacarias LG, Gonçalves HNC, de Castro AF, Domingues RZ, Matencio T. SOFC-APU systems for aircraft: a review. *Int J Hydrog Energy* 2018;43(33):16311-33
30. S. Eelman, de Poza, Krieg T. Fuel cell APU'S in commercial aircraft - an assessment of SOFC and PEMFC concepts. In: *Proceedings of 24th international congress of aeronautical sciences*; 2004.



31. Staffell I, Scamman D, Velazquez Abad A, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, Shah N, Ward KR. Die Rolle von Wasserstoff und Brennstoffzellen im globalen Energiesystem. *Energy Environ Sci* 2019.
32. DOE finanziert den Einsatz von Brennstoffzellen für Gepäckfahrzeuge auf Flughäfen. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 5; 2012. p. 3–4.
33. McConnell VP. Brennstoffzellen in Gabelstaplern erweitern die kommerzielle Reichweite. *Fuel Cells Bull* 2010;2010(9):12-9. 33. 44. Brennstoffzellen-Gabelstapler aus deutscher Partnerschaft. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 12; 2003. p. 9.
34. Plug Power, FedEx-Projekt führt Brennstoffzellen-Flughafentraktoren ein. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 5; 2015. p. 2–3.
35. Toyota und Hino liefern Brennstoffzellenbus für die Strecke zum Flughafen Haneda in Tokio. *Fuel Cells Bull*, Bd., Nr. 1; 2011, S. 3.
36. US Hybrid und BYD entwickeln Brennstoffzellenbus für den Flughafen Honolulu. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 6; 2018. p. 2.
37. Belmonte N, Staulo S, Fiorot S, Luetto C, Rizzi P, Baricco M. Fuel cell powered octocopter for inspection of mobile cranes: design, cost analysis and environmental impacts. *Appl Energy* 2018;215:556-65.
38. Brennstoffzellen- und Hybridenergiesysteme bieten einen überzeugenden Mehrwert für UAVs, deren Einsätze eine längere Laufzeit erfordern, als Batterien unterstützen können. [Online]. Available: [http:// www.ballard.com/markets/uav](http://www.ballard.com/markets/uav) . [Accessed 20. Oct 2018].
39. AeroVironment fliegt das erste wasserstoffbetriebene Flugzeug der Welt. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 9; 2005. p. 2-3.
40. Bradley TH, Moffitt BA, Mavris DN, Parekh DE. Entwicklung und experimentelle Charakterisierung eines brennstoffzellenbetriebenen Flugzeugs. *J Power Sources* 2007;171(2):793-801.
41. Gong A, Verstraete D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: current status and research needs. *Int J Hydrog Energy* 2017;42(33):21311-33.
42. Kim T, Kwon S. Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft. *Int J Hydrog Energy* 2012;37(1):615-22
43. Vogel, L. (2011). Wörterbuch der Begriffe des Geschäftskontinuitätsmanagements. Business Continuity Institute. Verfügbar unter: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [Zugriff am 27.12.15].
44. Molkov, V. (2012). Grundlagen der Wasserstoffsicherheitstechnik, Teil I und Teil II. Verfügbar unter: www.bookboon.com, kostenloser Download E-Book.

45. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Verfügbar unter: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [Zugriff am 01.05.14].
46. Saffers, J-B und Molkov, V (2014). Rahmenwerk für die Wasserstoffsicherheitstechnik und elementare Sicherheitswerkzeuge für die Konstruktion. International Journal of Hydrogen Energy, 39 (11). S. 6268-6285.
47. BRHS, Zweijährlicher Bericht über die Sicherheit von Wasserstoff (2009). Das europäische Exzellenznetz "Sicherheit von Wasserstoff als Energieträger" (NoE HySafe). Verfügbar unter: www.hysafe.org [Zugriff am 06.11.20].
48. BSI (2001) Britische Norm BS7974:2001 "Anwendung der Brandschutztechnik bei der Planung von Gebäuden - Leitfaden für die Praxis". Veröffentlichtes Dokument PD 7974-0:2002 (2002) Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Part 0: Guide to design framework and fire safety engineering procedures, British Standard Institution.
49. V. Molkov und M. Bragin, High-Pressure Hydrogen Leak Through a Narrow Channel, Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere, (2009), 332-338.
50. V. Molkov und J.-B. Saffers, Hydrogen Jet Flames, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, no. 19, (2013) 8141-8158.
51. V. Molkov, V. Shentsov, and J. Quintiere, Passive Ventilation of a Sustained Gaseous Release in an Enclosure With One Vent, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 39, no. 15, (2014) 8158-8168.
52. S. Brennan und V. Molkov, Safety Assessment of Unignited Hydrogen Discharge From Onboard Storage in Garages With Low Levels of Natural Ventilation, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, (2013) 8159-8166.
53. D. Makarov, V. Shentsov, M. Kuznetsov, and V. Molkov, Pressure Peaking Phenomenon: Model Validation Against Unignited Release and Jet Fire Experiments, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, no. 19, (2018) 9454-9469.
54. V. Molkov and M. Bragin, Hydrogen-Air Deflagrations: Vent Sizing Correlation For Low-Strength Equipment and Buildings, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, no. 2, (2015) 1256-1266.
55. D. Makarov, P. Hooker, M. Kuznetsov, and V. Molkov, Deflagrations of Localised Homogeneous and Inhomogeneous Hydrogen-Air Mixtures in Enclosures, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, (2018) 9848-9869.
56. V. Molkov and S. Kashkarov, Blast Wave From a High-Pressure Gas Tank Rupture in a Fire: Stand-Alone and Under-Vehicle Hydrogen Tanks, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, no. 36, (2015) 12581-12603.
57. M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov, and V. Molkov, "Socio-Economic Analysis and Quantitative Risk Assessment Methodology for Safety Design of Onboard Storage Systems, in International Conference on Hydrogen Safety, Hamburg, Germany, (2017) vol. 184.



58. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. *Int J Hydrogen Energy* (2017) 42:7254-7262.
59. Norwegisches Parlament beschließt Null-Emissionsvorschriften in den Fjorden des Weltnaturerbes. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [Zugriff am 04.11.2020]
60. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Untersuchung des Zwischenfalls mit der Wasserstofffreisetzung in der AC-Transit-Anlage in Emeryville (überarbeitet). Sandia report. SAND2012-8642.