



Europäisches Train the Trainer-Programm für Einsatzkräfte

## Lektion 1

# Einführung der Wasserstoffsicherheit für Einsatzkräfte

## STUFE I

### Feuerwehrmann

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

Dieses Thema wird auch auf Stufe IV (Experte) angeboten.

Diese Vorlesung ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann, Gruppenführer, 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 Ersthelfern, 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. Außerdem wurde ein Überblick über die wichtigsten Verwendungszwecke von Wasserstoff, die wichtigsten Produktionsmethoden, Speicheroptionen und Verteilungsarten gegeben.

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, Herstellung, Speicherung, Anwendung, Wasserstoffsicherheit

## Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter .....	3
1. Zielpublikum .....	6
1.1 Beschreibung der Rolle: Feuerwehrmann .....	6
1.2 Kompetenzstufe: Feuerwehrmann.....	6
1.3 Vorbildung: Feuerwehrmann .....	6
2. Einführung, Umfang und Ziel.....	6
3. Überblick über die Produktion, Lagerung und industrielle Nutzung von H <sub>2</sub> .....	8
3.1 Wasserstoffproduktion .....	8
3.2 Wasserstoffspeicherung .....	10
3.3 Wasserstoffnutzung in der Industrie .....	12
4. FC-Fahrzeuge.....	13
4.1 Die wichtigsten Merkmale von BZ-Fahrzeugen.....	14
4.2 FC-Autos .....	14
4.2.1 Wasserstoff-Speichersystem.....	15
4.2.2 System zur Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff.....	16
4.2.3 FC-System.....	16
4.2.4 Elektrischer Antrieb und Energiemanagementsystem.....	16
4.2.5 Sicherheitsmerkmale und -konzepte .....	17
4.3 FC-Busse .....	19
4.4 FC-Gabelstapler .....	22
4.5 Luftfahrt .....	23
5. Wasserstofftransport.....	25
5.1 Schwerlastkraftwagen (Lkw) .....	25
5.1.1 Gasbetriebene Lastwagen .....	25
5.1.2 LKWs mit tiefgekühlter Flüssigkeit.....	28
5.2 Züge.....	29
5.3 Pipelines .....	30
6. Stationäre Anwendungen.....	32
6.1 Kraft-Wärme-Kopplungssysteme (KWK) .....	32
6.2 Reservestromerzeugung .....	32
7. Anwendungen in der Schifffahrt.....	35
8. Wasserstoffbasierte Energiespeichersysteme .....	39



9. Überblick über Vorfälle und Unfälle.....	44
9.1 Zwischenfälle und Unfälle in den Systemen und der Infrastruktur von FCH.....	44
9.2 Unfälle bei der Wasserstoffproduktion .....	45
9.3 Ein Zwischenfall an einer Tankstelle .....	45
10. Einführung in das e-Labor .....	46
Referenzen.....	48



## 1. Zielpublikum

Die in dieser Vorlesung enthaltenen Informationen richten sich an die STUFE 1: Feuerwehrmann. Es gibt auch Vorlesungen für die Stufen II, III und IV: Gruppenführer, Einsatzleiter und Experte.

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

### 1.1 Beschreibung der Rolle: Feuerwehrmann

Von einem Feuerwehrmann kann erwartet werden, dass er die zur Verfügung stehenden Schutzausrüstung eigenverantwortlich benutzt und mit feuerwehrtechnischen Geräten wie z. B. Leitern, Schläuche, Feuerlöscher, Kommunikations- und Rettungsgeräte sicher umgehen kann.

### 1.2 Kompetenzstufe: Feuerwehrmann

Die Ersthelfer müssen in der sicheren und korrekten Verwendung von PSA, Atemschutz und anderen Ausrüstungsgegenständen, die sie bedienen sollen, geschult sein und über entsprechende Kenntnisse und Praktiken verfügen. Verhaltensweisen, die ihre Sicherheit und die anderer Kollegen gewährleisten, sollten in Standardarbeitsanweisungen (SOP) beschrieben werden. Sie müssen in der Lage sein, das Risiko für ihre eigene Sicherheit und die Sicherheit anderer dynamisch zu bewerten.

### 1.3 Vorbildung: Feuerwehrmann

EQR 2 Grundlegende Faktenkenntnisse in einem Arbeits- oder Studienbereich. Grundlegende kognitive und praktische Fähigkeiten, die erforderlich sind, um einschlägige Informationen zu nutzen, um Aufgaben auszuführen und Routineprobleme unter Verwendung einfacher Regeln und Hilfsmittel zu lösen. Arbeit oder Studium unter Aufsicht mit einer gewissen Selbstständigkeit.

## 2. Einführung, Umfang und Ziel

Brennstoffzellen- und Wasserstoffanwendungen (fuel cell and hydrogen, 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 Einsatzkräfte. Die Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse und Erdgasreformierung, dezentrale Wasserstoffherzeugungsanwendungen, die Speicherung von gasförmigem und verflüssigtem Wasserstoff, Wasserstofftransport- und Materialhandhabungsanwendungen, BZ-Fahrzeuge (z. B. Autos, 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 Einsatzkräften 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. ergänzt.

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 eine Einsatzkraft /ein Auszubildender in der Lage sein:

- die Neuartigkeit und den Reichtum der FCH-Technologien in der modernen Gesellschaft zu 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 Reformer, PEM (Protonenaustauschmembran) und alkalische Elektrolyseure gegeben, wobei der Schwerpunkt auf Sicherheitsmerkmalen und -konzepten liegt;



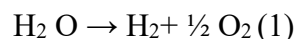
- das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle (BZ) und eines Brennstoffzellenstapels zu beschreiben;
- Funktionsprinzipien und Sicherheitsaspekte einer Reihe von FCH-Anwendungen zu erläutern, darunter BZ-Fahrzeuge, Tankstellen, stationäre Wasserstoffspeicher, Anwendungen für den Materialtransport und 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;

### 3. Überblick über die Produktion, Lagerung und industrielle Nutzung von H<sub>2</sub>

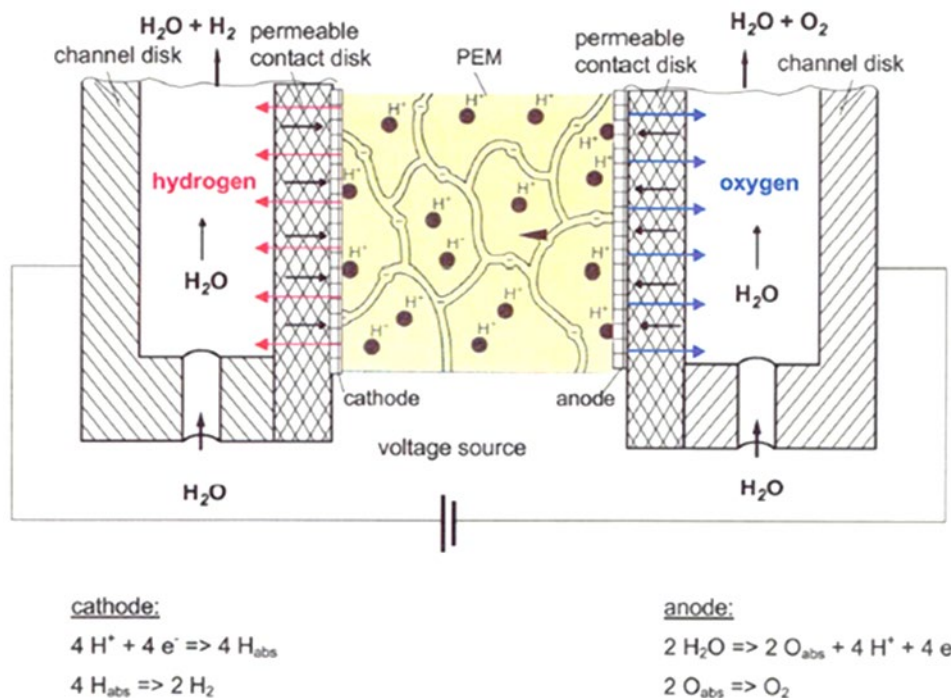
#### 3.1 Wasserstoffproduktion

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).

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







Quelle: Areva, 2015.

Abbildung 1. Funktionsprinzip des PEM-Elektrolyseurs.

Der Mechanismus der Wasserelektrolyse auf der Grundlage einer Protonenaustauschmembran (proton exchange membrane, PEM) ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei der PEM-Wasserelektrolyse wird Wasser elektrochemisch an der Kathode in Wasserstoff und an der Anode in Sauerstoff gespalten. Während des Betriebs des PEM-Wasserelektrolyseurs wird das Wasser in die Anodenkanäle gepumpt, wo es in Sauerstoff, Protonen und Elektronen aufgespalten wird. Protonen wandern durch die PEM, die zwischen Anode und Kathode liegt, und gelangen zur Kathodenseite. Die Elektronen wandern von der Anode zur Kathode durch den externen Stromkreis, der die treibende Kraft, d. h. die Zellspannung, für die Reaktion liefert. An der Kathode verbinden sich Protonen und Elektronen erneut und es entsteht Wasserstoff.

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<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gasabscheidern kontrollieren;
- den Druck und die Druckdifferenz zwischen den H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Leitungen kontrollieren;
- die Wasserstoffkonzentration am Ausgang des Sauerstoffabscheiders zu kontrollieren.

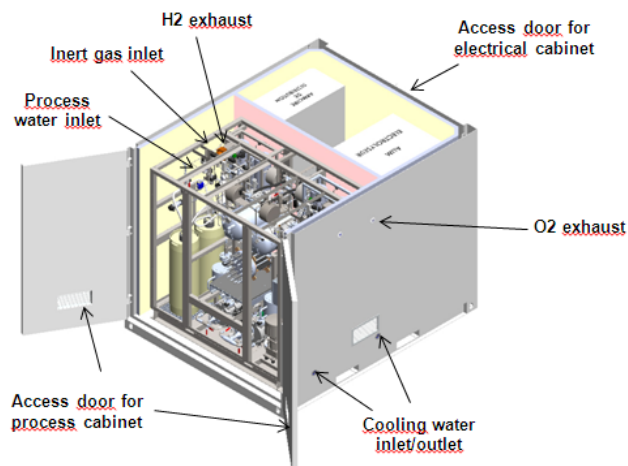


Abbildung 2. Das Schema eines PEM-Elektrolyseurs [1]

### 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 wichtig 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 2). Die Kryo-Kompressions-Technologie, 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.



a b c

Abbildung 2. 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 3a**) und chemische Reaktionen (**Abbildung 3, b-d**). Beispiele für Materialien und Verbindungen, die sich für die feste Wasserstoffspeicherung eignen, sind in **Abbildung 3** dargestellt.

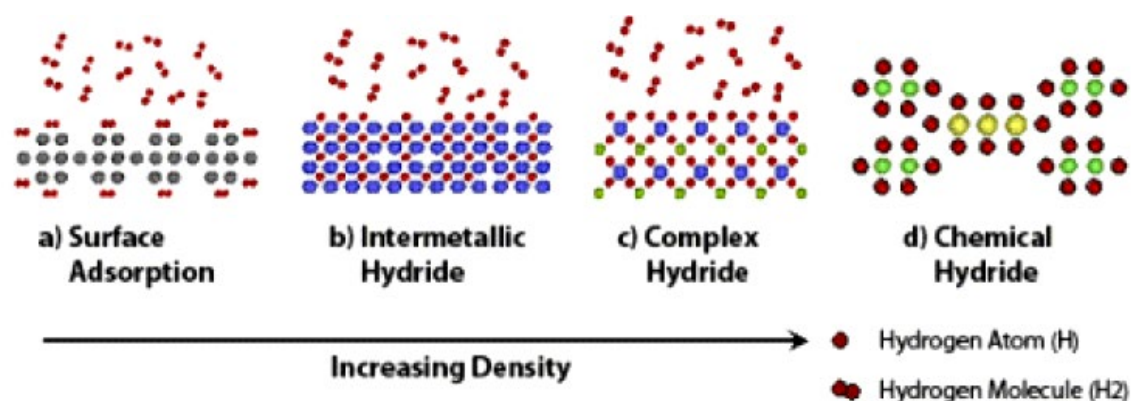


Abbildung 3. Als Feststoffspeicher für Wasserstoff verwendete Materialien [2]

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 FCH-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-Autos 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 4) sind den meisten von ihnen gemeinsam [6]:

- Wasserstoffbetankungsanlage;
- Wasserstoff-Speichersystem;
- System zur Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff;
- FC-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 das für den Betrieb des BZ geeignete Niveau. Der Wasserstoff wird im BZ-System (D) elektrochemisch mit Sauerstoff kombiniert, um elektrischen Hochspannungsstrom zu erzeugen. Diese elektrische Energie wird an das Energiemanagementsystem für den Elektroantrieb (E) weitergeleitet, wo sie zum Antrieb der elektrischen Antriebsmotoren oder zum Laden von Batterien und Ultrakondensatoren verwendet wird.

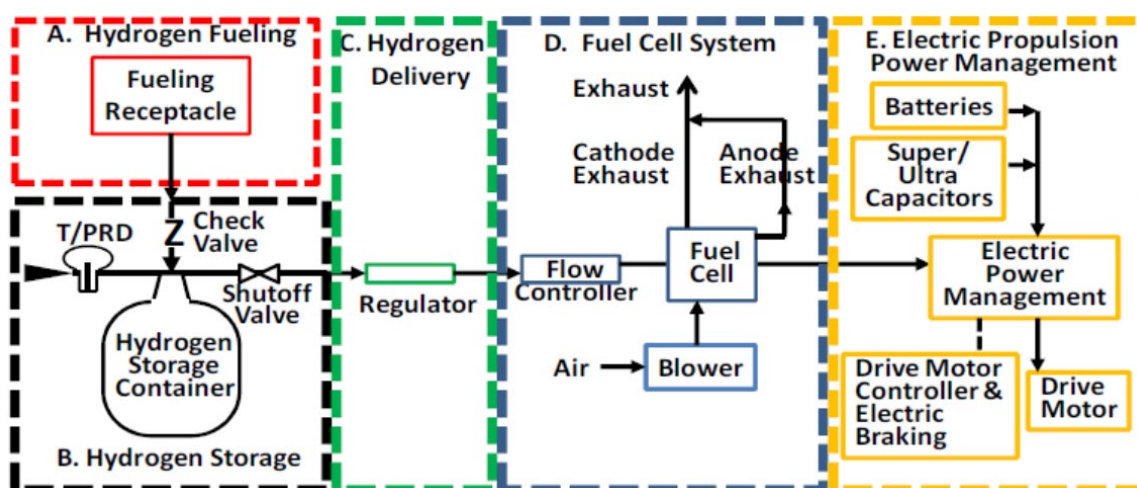


Abbildung 4. Die wichtigsten Systeme eines BZ-Fahrzeugs [6]

## 4.2 BZ-Fahrzeuge

Abbildung 5 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. Derzeit 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.

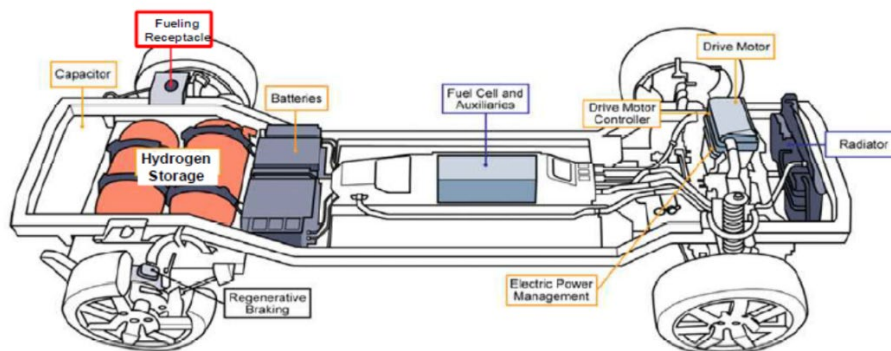


Abbildung 5. Ein Beispiel für ein BZ-Fahrzeug [6]

#### 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 ( $\text{CGH}_2$ ). 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 6). 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.



Abbildung 6. 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 erzeugen gleichzeitig Strom und Wasser, ohne Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) oder andere schädliche Emissionen zu erzeugen, wie sie 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 Klimaanlageantriebsmotors. 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 innerhalb 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 7](#) dargestellt. Das System umfasst den Behälter und alle anderen Komponenten, die die "primäre Druckgrenze" bilden, die verhindert, dass Wasserstoff aus dem System entweicht. Zum Druckwasserstoffspeichersystem gehören drei Sicherheitseinrichtungen:

- Ein Rückschlagventil;
- Ein Absperrventil;
- Eine thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtung (thermally-activated pressure relief device, TPRD).

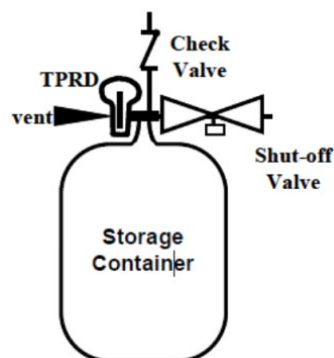


Abbildung 7. Ein typisches System zur Speicherung von Druckwasserstoff [6]



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 das Ausströmen von gespeichertem Wasserstoff, 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 Standardvorgehensweisen (standard operation procedure, SOP) für Einsatzkräfte wird der Fahrer bei Erreichen einer "Warnstufe" durch das "H<sub>2</sub>"-Symbol in der Instrumententafel gewarnt, und im Fahrer-Informationen-Zentrum für den Fahrenden (Driver's Information Centre, DIC) erscheint die Meldung "H<sub>2</sub> Detected". Wird Wasserstoff in einer "Alarmstufe" erkannt, blinkt das "H<sub>2</sub>"-Symbol, es ertönt ein Signalton und im DIC erscheint die Meldung "H<sub>2</sub> 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, Reykjavik) 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 8. 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 9** zeigt ein Layout des "All American" FC-Busses von SunLine [11]. In diesem Beispiel wird Wasserstoff als komprimiertes Gas (compressed gas, CGH<sub>2</sub>) gespeichert. Adams [12] untersuchte den optimalen Speicherdruck, der für Busse mit CGH<sub>2</sub>-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 einer Beschädigung der Betankungsschnittstellen aufgrund von Inkompatibilität zu verringern. 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.

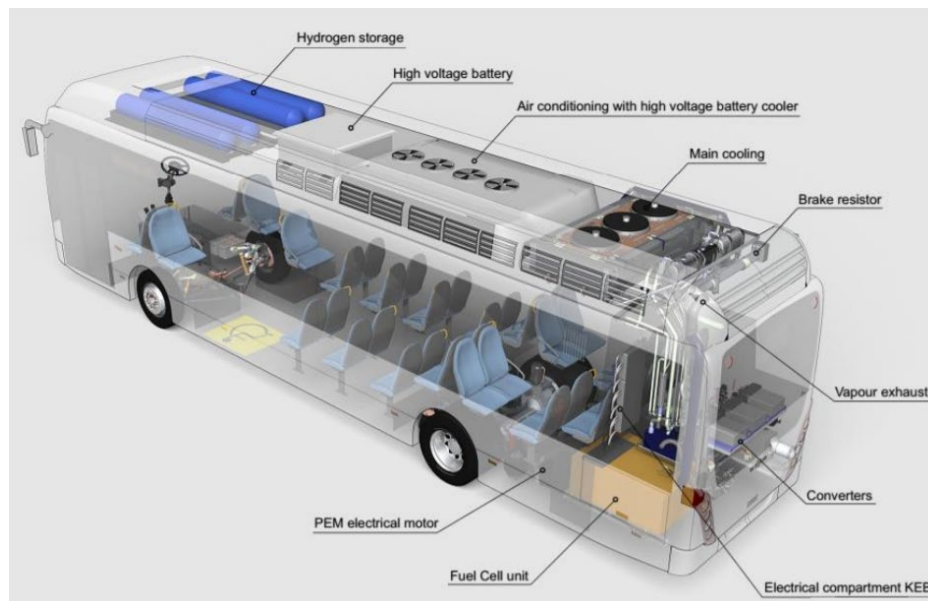


Abbildung 9. Aufbau der Hauptkomponenten eines FC-Busses [11]

Die Einsatzkräfte 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 sein kann 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 das Trennen eines Niederspannungskabels alle Fahrzeugsysteme (z. B. Wasserstoffspeicher, Hoch- und Niederspannungssysteme) in einem BZ-Fahrzeug isoliert und abschaltet.

#### 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 benötigt werden, 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 10** zu sehen.



Ein BZ-Gabelstapler



Brennstoffzelle eines Gabelstaplers

Abbildung 10. Ein FC-Gabelstapler und seine FC-Einheit [1]

Die Hauptbestandteile einer BZ-Einheit sind in **Abbildung 11** 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.

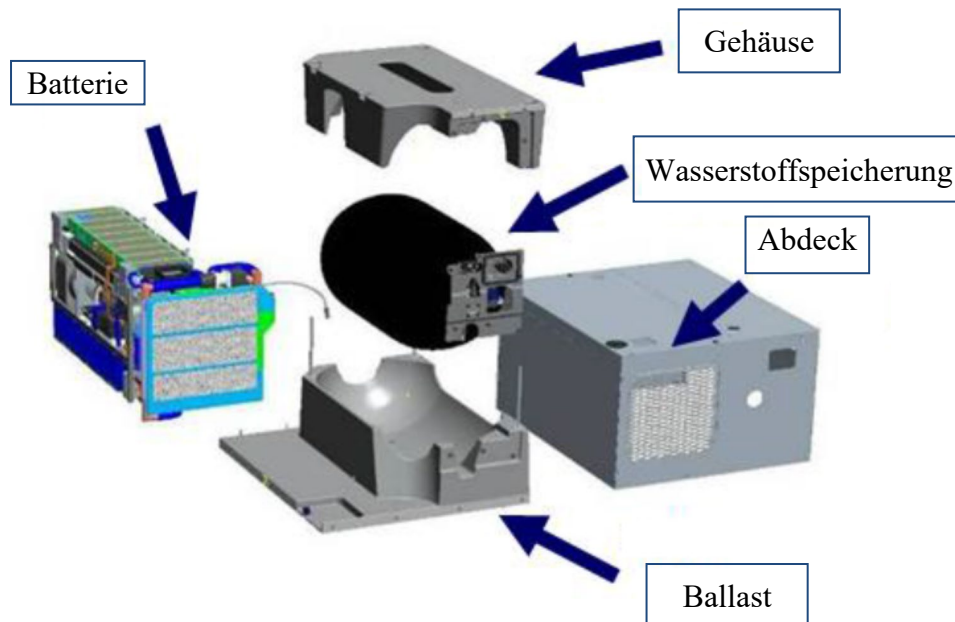


Abbildung 11. Komponenten der Brennstoffzelleneinheit für Gabelstapler

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 Flüssigwasserstoff 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 11](#) 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.

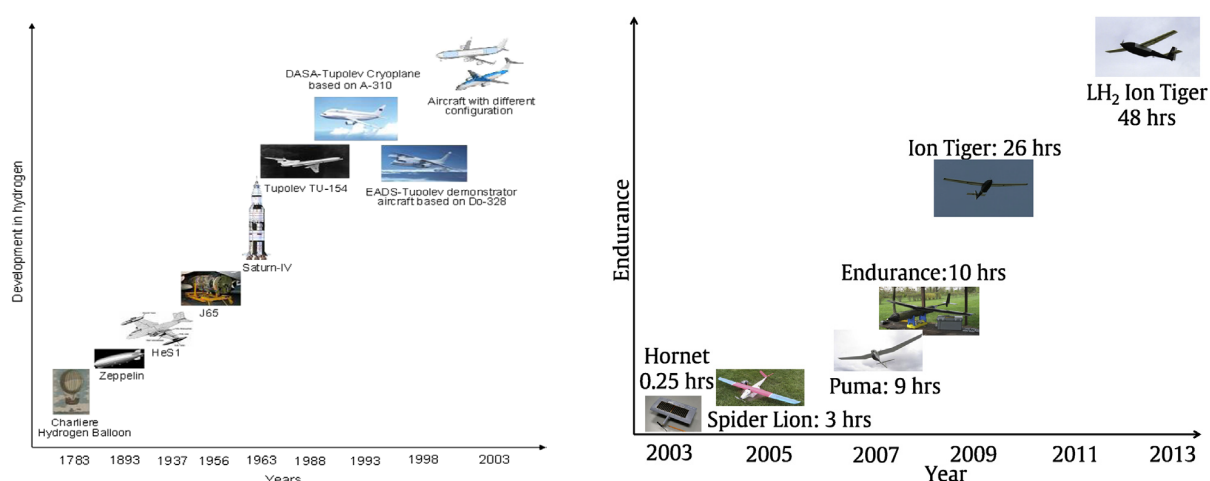


Abbildung 12 Historischer Entwicklungszeitplan für wasserstoff- (links) und brennstoffzellenbetriebene Flugzeuge (rechts)





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].

## 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 (CGH<sub>2</sub>) über Entfernungen von 200-300 km von einer zentralen Produktionsstätte eingesetzt. Auf den Anhängern sind Einzelflaschen, Mehrflaschenbündel oder lange zylindrische Rohre installiert (Abbildung 13). Der Speicherdruck liegt zwischen 200 und 300 bar, und ein Anhänger kann 2.000 bis 6.200 Nm<sup>3</sup> CGH<sub>2</sub> 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. 13. Zwei Typen von CGH2-Anhängern, die von AirLiquide in Europa betrieben werden: (a) Röhrenanhänger mit 2.000 bis 3.000 Nm<sup>3</sup>Wasserstoff und (b) Verbundflaschenanhänger mit 6.200 Nm<sup>3</sup>Wasserstoff.

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 epoxyimprägnierten 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 14](#) 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 14. 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 ( $\sim 150$  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 sind alle Wasserstoffspeicher 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 Sattelanhänger ab,
- Der Fahrer koppelt 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  $-253\text{ °C}$ ), um größere Mengen (Hunderte  $\text{m}^3/\text{h}$ ) zu verteilen. Superisolierte Flüssigwasserstoff-Lkw (liquid,  $\text{LH}_2$ ) können bis zu zehnmals mehr Wasserstoff transportieren als die für den Transport von CGH verwendeten Röhrenanhänger<sup>2</sup>, was das Gewicht angeht. LH-Lkw<sup>2</sup>, 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 15). Es handelt sich um eine bevorzugte Verteilungsart für mittlere/große Wasserstoffmengen über lange Strecken, was erklärt, warum das  $\text{LH}_2$ -Geschäft in Nordamerika am weitesten entwickelt wurde (die Wasserstoffverflüssigungskapazität in Nordamerika ist etwa zehnmals 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 15. Ein von Air Liquide betriebener Straßentankwagen für den Transport von  $\text{LH}_2$  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) [21]. Die Elektrizitätskosten machen 50-80 % der Verflüssigungskosten aus. Die Entfernung ist der wichtigste Faktor, der über den Transport von  $\text{LH}_2$  und gasförmigem Wasserstoff  $\text{CGH}_2$  entscheidet. Die Anzahl der  $\text{LH}_2$ -Transporter 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<sub>2</sub> 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 langen <sup>3</sup>Behälter). 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 16](#)).



Quelle: NPROXX, 2020

Abbildung 16. 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  $\text{m}^3/\text{h}$ ) 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 17 zeigt Teile des weltweiten Wasserstoff-Pipelinenetzes. Die 1998 von Air Liquide erworbene 240 km lange Pipeline im Ruhrgebiet (Abbildung 17 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.



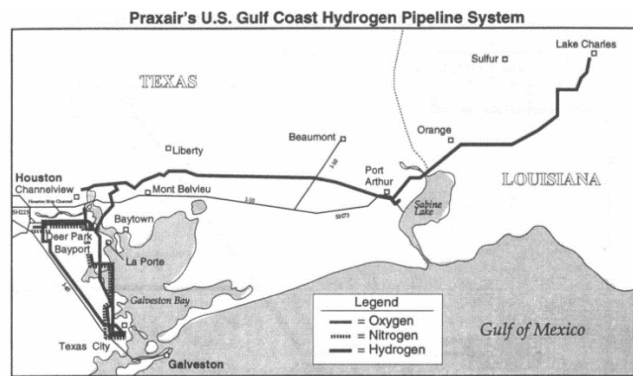
a



b

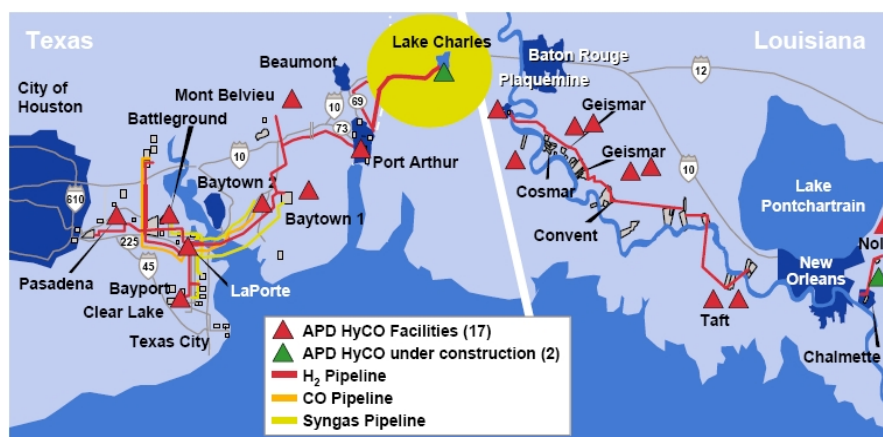


c



Source: Praxair, Inc.

d



e

Abbildung 17. Die wichtigsten Wasserstoffpipelines 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).

## 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 (solide oxide fuel cell, 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://enefield.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 Anwendungen gehören: Telekommunikation, Rechenzentren, Krankenhäuser, Militär, Industrie, Luxushotels usw. Ein Beispiel für das System ist in [Abbildung 18](#) 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 ermöglicht eine Betriebskapazität von 4 Stunden.



Abbildung 18. 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 Weltkulturerbe des Landes gehören: Diese Resolution sieht vor, dass alle Emissionen von Kreuzfahrtschiffen und Fähren in den Fjorden bis 2026 eingestellt werden [22].
- 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 19. Ballard 100 kW Brennstoffzellenmodul für die Schifffahrt

Die PEM-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane) von Ballard sind modular aufgebaut (Abbildung 19) 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 Schiffen mit Eigenantrieb. Ballard arbeitet bereits an einem Demonstrationsprojekt zum Antrieb von Flussschiffen in Lyon, Frankreich ([Abbildung 20](#)). Im Rahmen dieses Projekts wird ein Schubboot als Versorgungsschiff auf einem der anspruchsvollsten Flüsse der Welt, der Rhône, betrieben.



Abbildung 20. Ballards Flusschiff-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 Box<sup>TM</sup> 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 Box<sup>TM</sup> 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 21](#) 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].

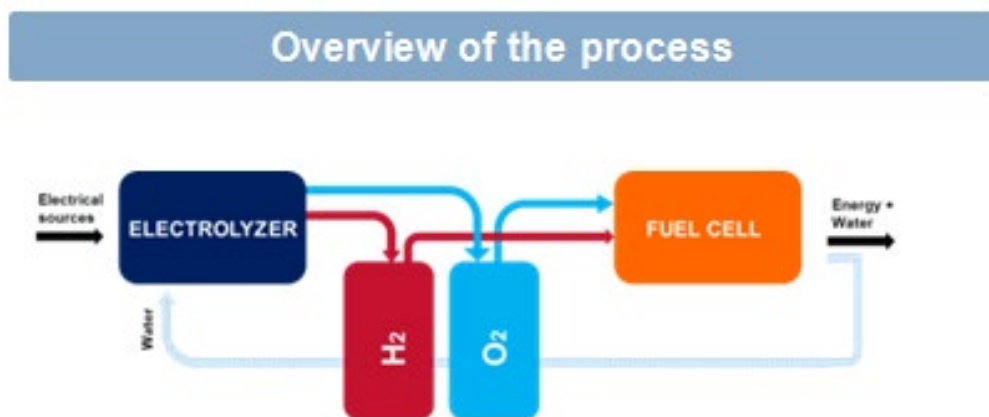


Abbildung 21. Ein Überblick über den Greenenergy Box Prozess.

Die Photovoltaik-Paneele liefern Strom an das Stromnetz und der Überschuss wird vom Elektrolyseur zur Erzeugung von gasförmigem Wasserstoff und Sauerstoff verwendet. Nach der Erzeugung werden gasförmiger Wasserstoff und Sauerstoff in separaten Tanks gespeichert, die neben der Greenenergy Box installiert sind<sup>TM</sup>. 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<sup>TM</sup> verwaltet 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<sup>TM</sup> hat drei verschiedene Kammern: eine elektrische Kammer, eine Brennstoffzellenkammer und eine Elektrolysekammer (siehe Abbildung 22).

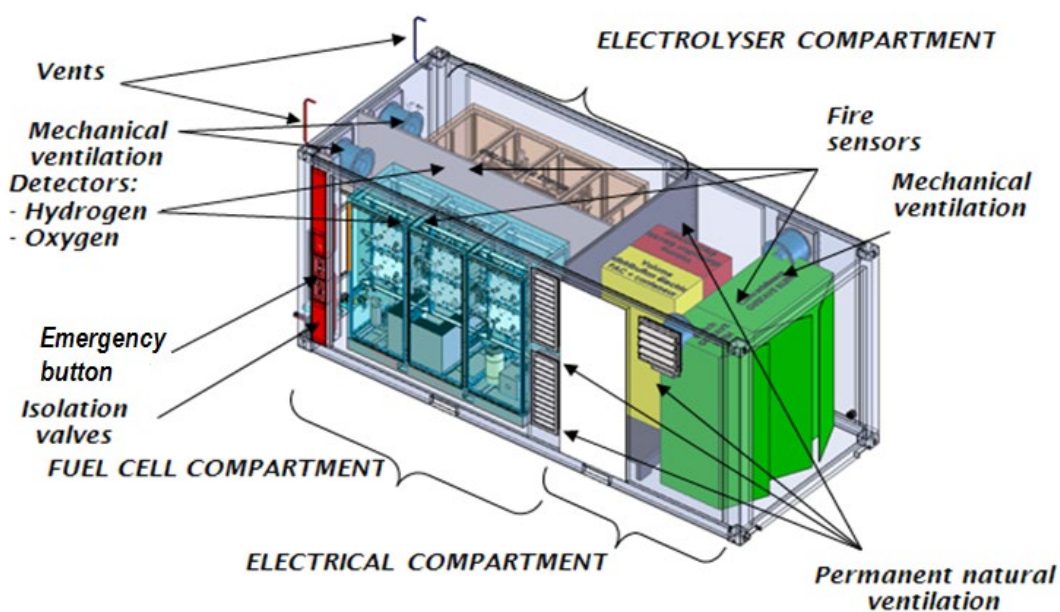




Abbildung 22. Eine schematische Darstellung der Greenenergy Box™[1]

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.-% H<sub>2</sub> in Luft) aus, und eine Notabschaltung erfolgt bei 25 % der LFL (1 Vol. % H<sub>2</sub> 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 Standby-Phase 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 Box<sup>TM</sup> werden dank der seitlichen Belüftungsöffnungen an beiden Seiten des Containers natürlich belüftet (Abbildung 22).
  - Die Brennstoffzellen- und Elektrolysekammern 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 m<sup>3</sup>/h für den Brennstoffzellenraum und 2.700 m<sup>3</sup>/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 Wasserstoffsensoren 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 Wasserstoffsensoren 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 Box<sup>TM</sup>, 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 <sup>TM</sup> 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 <sup>TM</sup> 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 <sup>TM</sup> 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 Feuerdetektion, 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 - was, wenn es nicht bewältigt wird, zu einem Notfall, einer Krise oder einer Katastrophe eskalieren kann 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.
- Überdruckerzeugung.
- 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 23. 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) [19]. 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 [19]. In einer französisch-russischen Studie [20] wurden die Versagensmechanismen von PEM-Wasserelektrolysezellen analysiert, 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 Edelstahlarmatur und einer Mutter, die von einer Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme im Inneren des PEM-Stacks perforiert wurden, sind in [Abbildung 23](#) dargestellt.

## 9.3 Ein Zwischenfall an einer Tankstelle

An der Emeryville-Tankstelle [23] kam es zu einer Wasserstoffgasfreisetzung. 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 Tankstelle zu betreten und den



Gasfluss zu stoppen. Während dieses Vorfalles 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 das e-Labor

Die Aus- und Weiterbildung für den aufstrebenden Brennstoffzellen- und Wasserstoffsektor (FCH) ist von entscheidender Bedeutung 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.

## 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). Next 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 die potenzielle Nutzung 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. Vogel, L. (2011). Wörterbuch der Begriffe des Geschäftskontinuitätsmanagements. Business Continuity Institute. Verfügbar unter: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [Zugriff am 27.12.15].
19. Molkov, V. (2012). Grundlagen der Wasserstoffsicherheitstechnik, Teil I und Teil II. Verfügbar unter: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), kostenloser Download E-Book.
20. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Verfügbar unter: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en>
21. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. Int J Hydrogen Energy (2017) 42:7254-7262.
22. 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]
23. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Untersuchung des Zwischenfalls mit der Wasserstofffreisetzung in der AC-Transit-Anlage in Emeryville (überarbeitet). Sandia report. SAND2012-8642.