



Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder

Lektion 3

Wasserstoffspeicherung

STUFE I

Feuerwehrmann/frau

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

Dieses Thema ist auch auf den Stufen II-IV verfügbar.

Diese Vorlesung ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann/frau, Gruppenführer/in (Kommantant), Einsatzleiter/in und Experte/in. 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.

Danksagungen

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

In diesem Vortrag werden verschiedene Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung - komprimiert, verflüssigt und in festen Materialien - sowie die damit verbundenen Gefahren und Sicherheitsprobleme vorgestellt. Insbesondere wird der katastrophale Bruch von Behältern vorgestellt und es werden Online-Tools vorgestellt, die verwendet werden können.

Das HyResponse-Projekt wird anerkannt, da die hier vorgestellten Materialien auf den ursprünglichen HyResponse-Vorlesungen beruhen.

Schlüsselwörter

Wasserstoffspeicherung, komprimierter Wasserstoff, Speicherbehälter, verflüssigter Wasserstoff, Wasserstoffspeichermaterialien, Berstschutz, Leck-ohne-Bruch

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
1. Zielpublikum	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Feuerwehrmann/frau	5
1.2 Kompetenzstufe: Feuerwehrmann/frau	5
1.3 Vorbildung: Feuerwehrmann/frau.....	5
2. Einleitung und Ziele	5
3. Optionen für die Wasserstoffspeicherung	6
4. Speicherung von gasförmigem Wasserstoff.....	8
4.1 Arten von cGH ₂ -Lagerbehältern	8
4.2 Wasserstoffspeicher an Bord.....	10
4.3 Druckentlastungsvorrichtungen	10
5. Folgen eines katastrophalen Versagens von Hochdruck-Wasserstoffspeichern (Druckwellen, Feuerbälle, Projektile)	11
5.1 Potenzielle Gefahren und Sicherheitsprobleme im Zusammenhang mit KH ₂ : Zusammenfassung.....	11
6. Auslauf-statt-Bruch Sicherheitstechnik.....	12
6.1 Neuer Trend 2020.....	12
7. Nutzung des e-Labors	13
Referenzen	14

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

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/in, Einsatzleiter/in und Experte/in.

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/frau

Von einem Feuerwehrmann/frau 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/frau

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 anderen 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/frau

EQR 2 Grundlegende Faktenkenntnisse in einem Arbeits- oder Studienbereich. Grundlegende kognitive und praktische Fertigkeiten, die erforderlich sind, um relevante 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. Einleitung und Ziele

Wasserstoff wird in der Regel in zwei Formen gespeichert und transportiert: als komprimiertes Wasserstoffgas oder als kryogene Flüssigkeit. Am häufigsten wird Wasserstoff in Metall- oder Verbundflaschen/-tanks unterschiedlicher Größe und Kapazität gelagert. Manchmal werden sie für den Transport zu einem Bündel zusammengeschlossen oder in einem Korb gesammelt. Aufgrund der geringen Größe seiner Moleküle kann Wasserstoff im Gegensatz zu anderen Gasen bei gleichem Druck leicht durch bestimmte Materialien, Risse oder schlechte Verbindungen in den Tanks entweichen. Obwohl Wasserstoff im Allgemeinen nicht korrosiv ist und nicht mit den für Speicherbehälter verwendeten Materialien reagiert, kann er unter bestimmten Temperatur- und Druckbedingungen in ein Metallgitter diffundieren, was zu einem Phänomen führt, das als "*Wasserstoffversprödung*" bekannt ist. Darüber hinaus können sich im Falle eines Brandes die für die Speicherbehälter verwendeten Verbundwerkstoffe zersetzen, und es kann zu einem Verlust des Wasserstoffeinschlusses kommen. Im schlimmsten Fall kann dies zu einem katastrophalen Bruch eines Wasserstoffspeichers führen, der eine Druckwelle mit anschließendem Feuerball und umherfliegenden Projektilen erzeugt. Aus diesem Grund

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

müssen Wasserstoffspeicheranlagen nach hohen Sicherheitsstandards konstruiert und gewartet werden, um die Unversehrtheit des Behälters zu gewährleisten.

Der Vortrag gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung und geht auf die wichtigsten sicherheitsrelevanten und technischen Fragen ein, die damit verbunden sind. Außerdem werden die Themen Wechselwirkung von Wasserstoff mit verschiedenen Materialtypen und Wasserstoffpermeation behandelt, die für Wasserstoffspeichertechnologien von großer Bedeutung sind. Es sollte erwähnt werden, dass das Thema Wasserstoffspeicherung sehr umfangreich ist; daher konzentriert sich diese Vorlesung hauptsächlich auf Hochdruck-, Flüssig- und Festwasserstoffspeichersysteme, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Hochdruckspeichertechnologie gelegt wird, da diese am weitesten verbreitet ist. In den folgenden Vorträgen werden Phänomene wie z.B. nicht gezündete Freisetzungen, Brände und Explosionen behandelt.

3. Optionen für die Wasserstoffspeicherung

Die Wasserstoffspeicherung ist eine Grundlagentechnologie für das gesamte Spektrum der Brennstoffzellen- und Wasserstoffanwendungen, von Fahrzeugen bis hin zur stationären und portablen Stromerzeugung [1]. Es gibt keine Universallösung für die Wasserstoffspeicherung. Stattdessen muss die Lösung sorgfältig ausgewählt werden, um spezifische Systemanforderungen zu erfüllen. So sind z. B. Platz und Gewicht kritische Faktoren für BZ-Personenfahrzeuge, während das Gewicht ein wünschenswertes Attribut für BZ-Gabelstapler oder Schiffsanwendungen sein kann. Für Weltraumanwendungen nutzt die NASA seit Jahren flüssigen Wasserstoff [2].

Wasserstoff ist das leichteste Gas mit einer geringen Normaldichte von 0,09 g/L (bei 288 K und 1 bar). Wie aus [Tabelle 1](#) hervorgeht, hat er einen sehr hohen Energiegehalt pro Masse von allen Kraftstoffen (etwa dreimal mehr als Benzin). Aufgrund seiner geringen Dichte hat Wasserstoff jedoch einen sehr niedrigen Energiegehalt pro Volumeneinheit (etwa viermal weniger als Benzin). Daher stellt die Speicherung von Wasserstoff, insbesondere im Hinblick auf die Größe und das Gewicht eines Fahrzeugs, eine Herausforderung dar [3]. Derzeit wird an der Entwicklung einer sicheren, zuverlässigen, kompakten, leichten und kostengünstigen Wasserstoffspeichertechnologie geforscht.

Volumetrische und *gravimetrische Kapazitäten* (Dichten) sind zwei Begriffe, die bei der Beschreibung von Gasspeicherkonzepten häufig verwendet werden. Im Falle von Wasserstoff zielen die Forschungsaktivitäten darauf ab, beide Kapazitäten zu erhöhen, d. h. sowohl höhere volumetrische als auch gravimetrische¹ Kapazitäten sind wünschenswert. Wie aus [Tabelle 1](#) hervorgeht, steckt in 1 kg Wasserstoff mehr Energie als in einem 1 kg Benzin. Es ist jedoch auch klar, dass dieselbe Masse an Wasserstoff ein größeres Volumen einnimmt. Wasserstoff ist bei Umgebungstemperatur nicht flüssig, und um die für eine bestimmte Reichweite eines

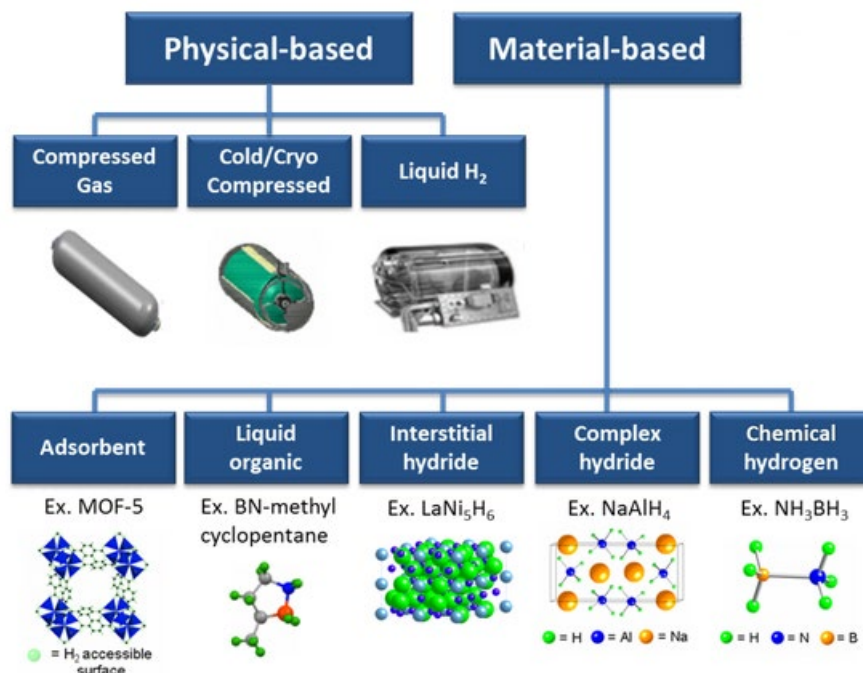
¹ Die gravimetrische Kapazität bestimmt das Gewicht eines Speichertanks, das erforderlich ist, um eine bestimmte Menge an H₂

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

Fahrzeugs (über 500 km) ausreichende Menge zu speichern, muss er entweder auf sehr hohen Druck komprimiert (z. B. auf 700 bar für Automobilanwendungen) oder stark abgekühlt werden, um eine flüssige Form zu erhalten. Diese extremen Druck- und Temperaturverhältnisse stellen ein Sicherheitsproblem für die verwendeten Materialien und für den Fall eines Verlusts des Containments dar.

Tabelle 1. Energiegehalt in Gewicht und Volumen von Wasserstoff und anderen gängigen Brennstoffen [4]

	Wasserstoff	Erdgas	Benzin
Energiegehalt pro Masseneinheit	2,8 Mal mehr als Benzin	~1,2 Mal mehr als Benzin	43 MJ/kg
Energiegehalt pro Volumeneinheit	4 Mal weniger als Benzin	1,5 Mal weniger als Benzin	120 MJ/Gallone



Quelle: US-Energieministerium (DoE): <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

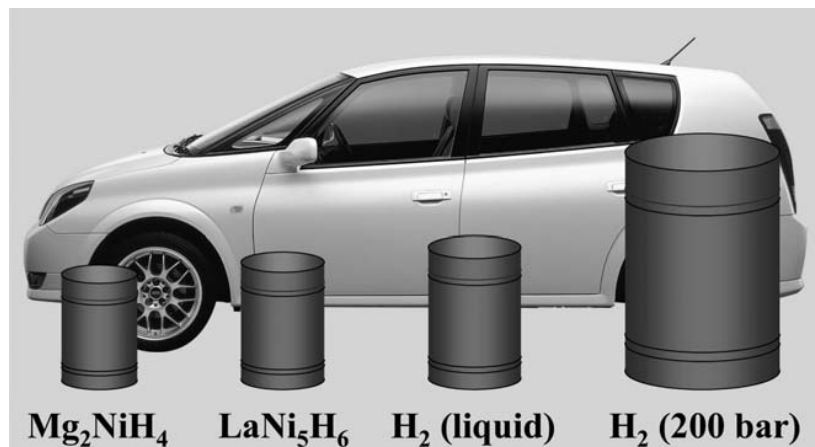
Abbildung 1. Ein Überblick über Wasserstoffspeichertechnologien

Wasserstoff kann *physisch* als komprimiertes Gas (compressed gas, cGH₂) oder als kryogene Flüssigkeit (liquid, LH₂) gespeichert werden. Für die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff sind in der Regel Druckgasbehälter, d. h. Tanks, erforderlich (die einem Druck

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

von bis zu 700 bar standhalten müssen). Die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form erfordert extrem niedrige Temperaturen, da sein Siedepunkt bei 1 atm Druck bei -253°C liegt. Der LH -Speicher wird üblicherweise für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff in großen Mengen verwendet (siehe Vortrag "Einführung in FCH-Anwendungen und Wasserstoffsicherheit"). Wasserstoff kann auch in *Materialien* gespeichert werden: auf der Oberfläche von Festkörpern (durch Adsorption) oder in Festkörpern (durch Absorption) [1]. Ein Überblick über die Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung ist in [Abbildung 1](#) dargestellt.

[Abbildung 2](#) aus den Referenzen [5, 6] veranschaulicht die Volumendichten, die für die verschiedenen Speicheroptionen in Fahrzeuganwendungen erreicht wurden oder voraussichtlich erreicht werden. Das US DOE hat in seinem Forschungsprogramm [7] für jeden der Parameter Ziele festgelegt, so dass die Forschung eingestellt werden kann, wenn sich herausstellt, dass eines der Ziele nicht erreicht werden kann.



Quelle: Risø Energiebericht 3, 2004.

Abbildung 2. Das Volumen von 4 kg Wasserstoff, das auf unterschiedliche Weise gespeichert wird, bezogen auf die Größe eines Autos.

4. Speicherung von gasförmigem Wasserstoff

Derzeit wird Wasserstoff meist als komprimiertes Gas in Metall- und Verbundstoffflaschen mit unterschiedlichen Drücken gespeichert. Wie in den vorangegangenen Vorträgen gezeigt wurde, verwenden viele BZ-Anwendungen Wasserstoff bei höheren Drücken.

4.1 Arten von cGH_2 -Lagerbehältern

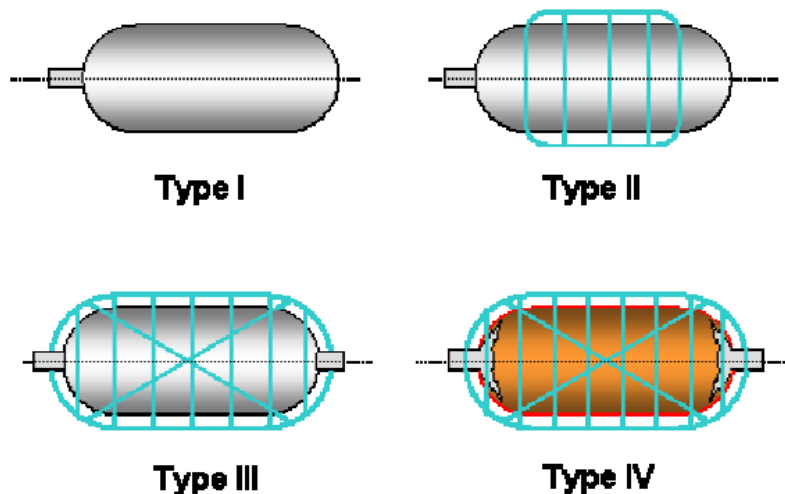
Aufgrund einer Reihe einzigartiger Eigenschaften von Wasserstoff (siehe den Vortrag "Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff") sollte Wasserstoff mit den Materialien, aus denen die Wände der Lagertanks bestehen, kompatibel sein. Vier Arten von Behältern wurden für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff entwickelt und verwendet:

- Typ I: aus Metall, nahtloser Metallbehälter

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

- Typ II: nahtloser Metallbehälter, umwickelt mit Faser-Harz-Verbundstoff
- Typ III: vollständig mit Faserverbundwerkstoff umhüllter Metall-Liner
- Typ IV: Polymerer Liner, vollständig umhüllt mit Faser-Harz-Verbundstoff

Im Jahr 2014 wurde der erste Prototyp des Typ-V-Tanks hergestellt. Dabei handelt es sich um einen Vollverbundbehälter ohne Auskleidung [8]. Die schematischen Darstellungen der für cGH_2 verwendeten Behältertypen sind in [Abbildung 3](#) zu sehen.



Quelle: Barthelemy, 2009 [10].

Abbildung 3. Typen von Wasserstofftanks für die Speicherung von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff

Zu den Beispielen für Speicherbehälter, die bei stationären Anwendungen zu finden sind, gehören: ein Flaschenbündel oder ein Flaschenkorb, feste Schlauchbündel oder Schlauchanhänger, die zur Lieferung von Wasserstoff an Tankstellen verwendet werden ([Abbildung 4](#)).



Quelle: AirLiquide Bilddatenbank

Abbildung 4. Beispiele für Wasserstoffspeicher, die für stationäre Anwendungen üblich sind: (a) ein festes Flaschenbündel, (b) ein Flaschenkorb.

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

4.2 Wasserstoffspeicher an Bord

Wie bereits erwähnt, sind die am besten geeigneten Behälter für die Speicherung von Wasserstoff an Bord von Fahrzeugen Typ III und Typ IV. Diese Technologien sind auch für die Speicherung anderer Gase (z. B. Erdgas oder Luft) weit verbreitet, aber der Hauptunterschied besteht darin, dass für die Wasserstoffspeicherung an Bord wesentlich höhere Drücke erforderlich sind: 35 bis 70 MPa für Wasserstoff im Vergleich zu 20 MPa für Erdgas. An Bord installierte Wasserstoffspeichersysteme sollten die folgenden Funktionen erfüllen:

- zur Aufnahme von Wasserstoff bei der (Wieder-)Betankung;
- um Wasserstoff zu speichern, bis er benötigt wird;
- um Wasserstoff für den Antrieb des Fahrzeugs an das BZ-System abzugeben.

Heutige leichte Personenkraftwagen mit Brennstoffzellenantrieb (fuel cell vehicles, FCV) speichern in der Regel bis zu 6 kg Wasserstoff an Bord, der für eine Reichweite von 400-500 km benötigt wird [4]. Ähnlich wie bei CNG-Bussen wird bei wasserstoffbetriebenen Bussen der Wasserstoff in mehreren Tanks auf dem Dach gespeichert. Der Brennstoffzellenstapel befindet sich normalerweise im hinteren Motorraum des Busses. In einem BZ-Bus können bis zu 50 kg Wasserstoff gespeichert werden.

4.3 Druckentlastungsvorrichtungen

Das wichtigste Sicherheitsmerkmal der Wasserstoffspeichersysteme (sowohl für Kraftfahrzeuge als auch für stationäre Anwendungen) sind *Druckentlastungsvorrichtungen* (*pressure relief devices, PRD*), die wie folgt definiert sind: Eine PRD ist eine Sicherheitsvorrichtung, die vor einem Versagen eines Speicherbehälters schützt, indem sie bei hohen Temperaturen, hohem Druck oder einer Kombination aus beidem einen Teil oder den gesamten Tankinhalt freigibt [9]. Im Falle eines Brandes sorgt die *thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtung* (*thermally activated PRD, TPRD*) für eine kontrollierte Freisetzung des gasförmigen Wasserstoffs GH_2 aus einem Hochdruckspeicherbehälter, bevor dessen Wände durch hohe Temperaturen geschwächt werden und es zu einem *katastrophalen Bruch* kommt. TPRDs lassen den gesamten Inhalt des Behälters schnell ab. Sie dichten nicht wieder ab und ermöglichen keine erneute Druckbeaufschlagung des Behälters für Wasserstoffsysteme.

5. Folgen eines katastrophalen Versagens von Hochdruck-Wasserstoffspeichern (Druckwellen, Feuerbälle, Projektile)

Was passiert, wenn TRPD bei einem Brand nicht aktiviert wird? Die am Southwest Research Institute, USA, durchgeführten Studien [10, 11] haben gezeigt, dass es zu einem katastrophalen Bruch des Tanks kommen wird.

5.1 Potenzielle Gefahren und Sicherheitsprobleme im Zusammenhang mit cGH_2 : Zusammenfassung

Zu den potenziellen Gefahren, die mit der Speicherung von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff an Bord verbunden sind, gehören:

- Schwierigkeiten bei der Identifizierung der Freisetzung von Wasserstoff, da das Gas geruchlos, farblos und geschmacklos ist. Die Geruchsstoffe können dem Wasserstoff nicht zugesetzt werden.
- Wasserstoff kann zur *Versprödung* von Metallen führen. Dies kann zu einer Abnahme der Materialfestigkeit und folglich zum Bruch des Behälters führen, was wiederum ein Wasserstoffleck zur Folge hat.
- Ansammlung von Wasserstoff über einen längeren Zeitraum in Räumen wie Garagen, mechanischen Werkstätten oder Fahrzeuginnenräumen. Durch die Verdrängung von Luft durch Wasserstoff kann es zu *Erstickungen* kommen.
- Bildung von brennbaren Wasserstoff-Sauerstoff- oder Wasserstoff-Luft-Gemischen. Der Eintritt von brennbaren Gemischen in eine Gebäudebelüftungsanlage kann zu einer Verpuffung oder sogar zu einer Detonation führen.
- Hochdruck-Wasserstoffstrahlen können die nackte Haut zerschneiden [12].
- Ein Überdruck und Impuls kann zu Trommelfellverletzungen bei Personen, zum Bersten des Tanks, zu umherfliegenden Trümmern, zerbrochenem Glas usw. führen.
- Das *Phänomen der Druckspitzen* kann in nur einer Sekunde zu einem Garageneinsturz führen (wird in den folgenden Vorträgen behandelt).
- Wasserstoff kann leicht entzündet werden, da sein MIE 0,017 mJ beträgt (was im Vergleich zu anderen Brennstoffen 10 Mal niedriger ist). Ein statischer Funke kann freigesetzten Wasserstoff entzünden.
- Wenn reiner Wasserstoff brennt, sind seine Flammen bei Tageslicht unsichtbar.
- Wasserstoff brennt schnell und ohne Rauchentwicklung.

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

- Ein von außen einwirkendes Feuer, Hitze oder Wärmestrahlung kann aufgrund der thermischen Zersetzung der Polymer- und Verbundwerkstoffe einen mechanischen Bruch des Tanks verursachen. Der derzeitige (öffentlich zugängliche) Wert der Feuerbeständigkeit beträgt bis zu 12 Minuten, bevor es zu einem katastrophalen Versagen kommen kann.
- Im Falle einer TPRD-Fehlfunktion ist ein Worst-Case-Szenario möglich: ein Bruch (d. h. ein katastrophales Versagen) des Wasserstoffspeichers, der einen Feuerball, Druckwellen und brennende Geschosse erzeugt.

6. Auslauf-statt-Bruch Sicherheitstechnik

Behälter aus Verbundwerkstoffen für die Speicherung von Hochdruck-Wasserstoff an Bord wurden in vielen Ländern der Welt für den Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr hergestellt und in Betrieb genommen. Der schwächste Punkt von Verbundstoffbehältern ist ihr Brandverhalten. So kann bei einem lokal begrenzten Brand die TPRD nicht ausgelöst werden, wie beispielsweise Unfälle mit Erdgasfahrzeugen in den USA gezeigt haben. Außerdem könnte die TPRD bei einem Unfall durch ein Feuer blockiert werden usw. Diese potenziellen Mängel in der Wasserstoffsicherheitstechnik können aufgrund der verheerenden Folgen eines Tankbruchs, d. h. Druckwelle, Feuerball und Projektile, für den Schutz von Leben und Eigentum äußerst kritisch werden.

6.1 Neuer Trend 2020

In den letzten 10 Jahren waren große Composite Overwrapped Pressure Tanks eine praktikable Lösung für die Integration des Wasserstoffspeichersystems in die derzeitige Fahrzeugarchitektur, die hauptsächlich für Verbrennungsmotoren entwickelt wurde. Mit der raschen Verbreitung von BEV weltweit haben die Automobilhersteller das Bedürfnis, die gleiche Fahrzeugarchitektur zu nutzen und nach neuen Designs von Speichersystemen mit anpassungsfähigen Tanks zu suchen. Die Integration beider Energiesysteme in dieselbe Fahrzeugkarosserie würde Größenvorteile ermöglichen, die Konstruktions- und Fertigungsprozesse vereinfachen und reduzieren und eine flexible Produktion erlauben, die Nachfrageschwankungen abfedern könnte, ohne die Kundenerwartungen an Platz, Leistung, Sicherheit oder Kosten zu beeinträchtigen. Die Rechtfertigung für die von den Automobilherstellern gewünschten neuen Geometrien besteht also zum einen darin, dieselbe Plattform für BEV- und FCEV-Fahrzeuge verwenden zu können (Abbildung 5). Dazu gehören "kastenförmige" Tanks. Andererseits soll die Reichweite der Fahrzeuge durch die Nutzung des verlorenen Raums erhöht werden.

Lektion 3: Wasserstoffspeicherung

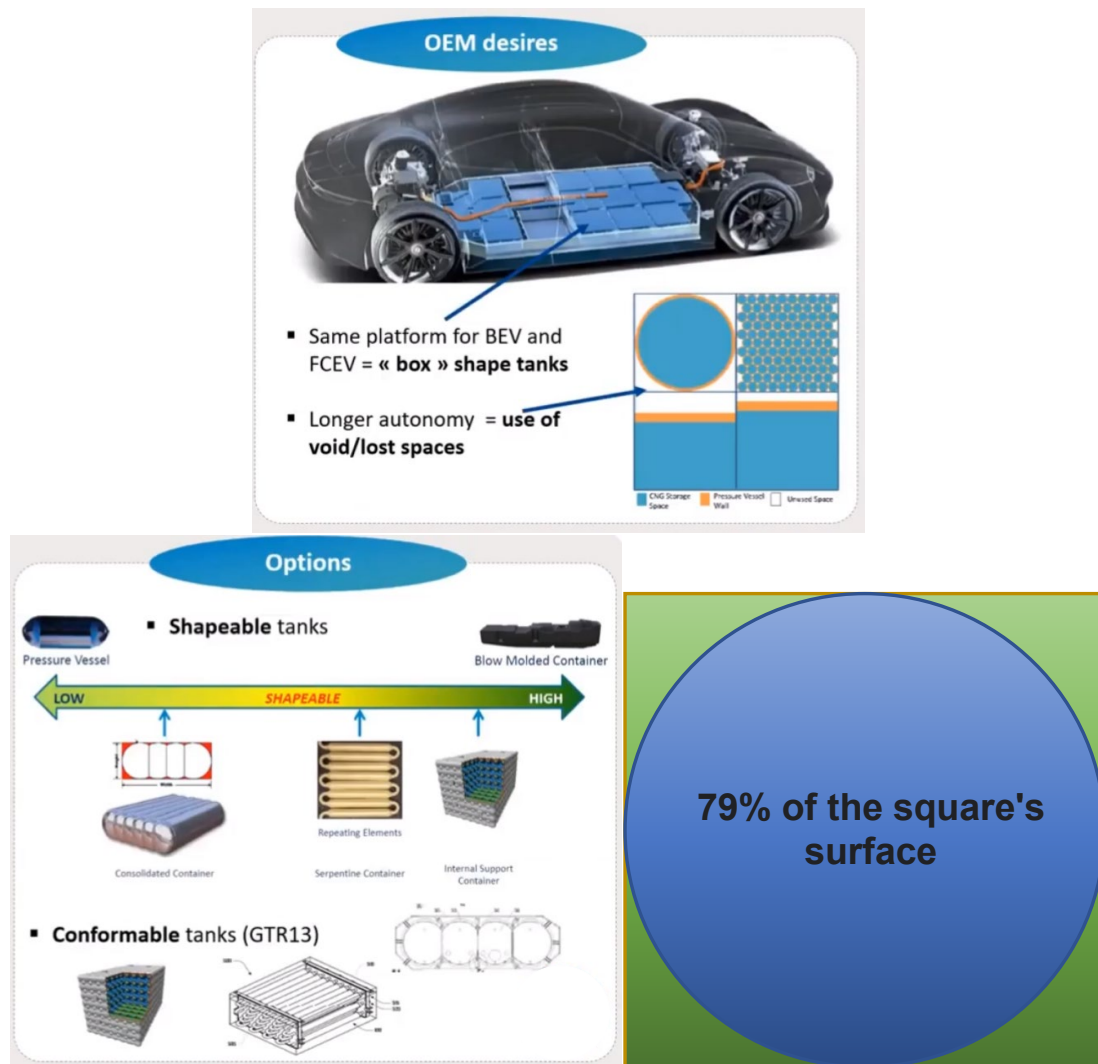


Abbildung 5 Neuer Trend bei der Integration von Druckspeichersystemen und Geometrien

7. Nutzung des e-Labors

Das e-Laboratorium für Wasserstoffsicherheit wurde in Vortrag 1 vorgestellt. Eine Reihe von Werkzeugen ist besonders nützlich für Speicheranwendungen. Dazu gehören die Berechnung der Dynamik des Abblasens eines Lagertanks, die Zeit bis zum Bruch des Tanks und die Korrelation von Feuerbällen.

Referenzen

1. DoE. Hydrogen storage (2015). Verfügbar unter: <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> [Zugriff am 06.11.20].
2. NASA. Zusammenfassung: Weltraumanwendungen von Wasserstoff und Brennstoffzellen. Verfügbar unter: http://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen_2009.html [Zugriff am 06.11.20].
3. Introduction to Hydrogen for Code Officials, U.S. Department of Energy, Washington DC. Verfügbar unter: http://www.hydrogen.energy.gov/training/code_official_training/ [Zugriff am 06.11.20].
4. US DoE, US Department of Energy (2008). Wasserstoff-Sicherheitstraining für Ersthelfer. Verfügbar unter: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [Zugriff am 06.11.20].
5. Risø Energiebericht 3: Wasserstoff und seine Konkurrenten (2004). Herausgegeben von Larsen, H., Feidenhans, R. und Petersen, LS. Risø National Laboratory. ISBN 87-550-3349-0.
6. Zuettel, A. (2013). Wasserstoff: Produktion, Speicherung, Anwendungen und Sicherheit. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23-27 September 2013, Kreta, Griechenland.
7. DoE-Ziele für Wasserstoffspeichersysteme an Bord von leichten Nutzfahrzeugen (2009). Veröffentlicht auf der Website des DOE/EERE. Verfügbar unter: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/targets_onboard_hydro_storage.pdf [Zugriff am 06.11.20].
8. Mafeld, A. (2015). CPVs: Regionale Trends auf dem globalen Markt. JEC Asia: Composite Pressure Vessels Forum. Singapur, 22. Oktober 2015.
9. Sunderland, P. (2010a). Hydrogen vehicles and safety regulations in the U.S. Teaching materials of the 8th ISCARW, Belfast, UK, June 2010.
10. Zalosh, R. (2007). Explosionswellen und Feuerbälle, die durch den Bruch eines Wasserstofftanks während einer Brandexposition entstehen. Proceedings on the 5th Seminar on Fire and Explosion Hazard, Edinburgh, UK, 23-27 April 2007, S. 2154-2161.
11. Weyandt, N. (2006). Fahrzeugbrand zur Herbeiführung eines katastrophalen Versagens eines 5000-psig-Wasserstoffzylinders, der in einem typischen SUV installiert ist, Motor Vehicle Fire Research Institute. Bericht. Dezember, 2006. Verfügbar unter: www.mvfri.org [Zugriff am 06.11.20].
12. Hammer, W. (1989). Occupational Safety Management and Engineering, 4. th Auflage, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989, ISBN 0-13-629379-4, Kapitel 19.