



Europäisches Train-the-Trainer-Programm für Responder

Lektion 12

Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

STUFE I

Feuerwehrmann

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

Dieses Thema ist auch für die Stufen II (Gruppenkommandant (-führer)) - IV (Experte) geeignet.

Diese Lektion ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann, Gruppenkommandant (-führer), 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.



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 "Horizon 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 Einzelheiten über Tankstellen für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff (LHRS) und die zugehörige Infrastruktur für die Wasserstoffmobilität vorgestellt. Die Hauptelemente der Flüssigwasserstoff-Lieferkette, von der Wasserstoffproduktion bis zum Endverbraucher, werden für ein gutes Verständnis des LHRS-Betriebs einbezogen. Die Herausforderungen und potenziellen Risiken von Flüssigwasserstoff werden beschrieben.

Schlüsselwörter

Flüssiger und gasförmiger Wasserstoff, Tankstelle, kryogene Bedingungen, Verfahren, Sicherheitsmerkmale.

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
1. Zielgruppe.....	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Feuerwehrmann.....	5
1.2 Kompetenzstufe: Feuerwehrmann	5
1.3 Vorbildung: Feuerwehrmann	5
2. Einleitung und Ziele	5
3. Einführung in die Wasserstofftankstellen	7
3.1 Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff (GHRS).....	7
3.2 Flüssigwasserstoff-Tankstelle (LHRS).....	9
3.3 Vergleich zwischen Tankstellen mit flüssigem und gasförmigem Wasserstoff	9
3.4 Tankstelle mit Speicher für gasförmigen Wasserstoff - Ausrüstung.....	11
3.4.1 Speicherbehälter für gasförmigen Wasserstoff.....	11
3.4.2 Wasserstoff-Kompressor.....	12
3.4.3 Vorkühlung	14
3.4.4 Wasserstoff-Zapfsäule	17
3.5 Tankstelle mit Flüssigwasserstoffspeicher - Ausrüstung.....	20
3.5.1 Speicherung von Flüssigwasserstoff.....	22
3.5.2 Kryogenische Pumpe	24
3.5.3 LH ₂ -Verdampfer	25
3.5.4 Armaturenbrett.....	27
3.5.5 Gasförmige Puffer.....	28
3.5.6 Verbindung zur Zapfsäule.....	29
3.5.7 Zapfsäule.....	30
4. Produktion	31
4.1 Methandampfreformierung	31
4.2 Elektrolyseur	33
4.3 Verflüssiger.....	35
5. Pipelines	37
6. Sicherheitsmerkmale in HRS und anderen Infrastrukturen	38
Danksagung	41
Referenzen.....	41

1. Zielgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an die STUFE 1: Feuerwehrmann. Es gibt auch Lektionen für die Stufen II, III und IV: Gruppenkommandant (-führer), Einsatzleiter und Experte

Die Rollenbeschreibung, das Kompetenzniveau und die Lernerwartungen, die auf der Ebene der Gruppenkommandanten (-führer) vorausgesetzt werden, werden im Folgenden beschrieben.

1.1 Beschreibung der Rolle: Feuerwehrmann

Von einem Feuerwehrmann wird erwartet, dass er in der Lage ist, unter allen klimatischen Bedingungen in Bereichen und in Notfallsituationen, die nach vernünftigem Ermessen einen Einsatz erfordern, in Schutzausrüstung einschließlich Atemschutzgeräten und unter Verwendung der zur Verfügung gestellten Ausrüstung wie Fahrzeuge, Leitern, Schläuche, Feuerlöscher, Kommunikations- und Rettungsgeräte sicher zu arbeiten.

1.2 Kompetenzstufe: Feuerwehrmann

Die Ersthelfer müssen in der sicheren und korrekten Verwendung von PSA, PA 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 Standardeinsatzmaßnahmen (SEM) 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 Einsatzbereich. 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. Arbeiter unter Aufsicht mit einer gewissen Selbstständigkeit.

2. Einleitung und Ziele

Ziel des Dokuments ist es, Tankstellen für gasförmigen Wasserstoff (GHRS) und Tankstellen für flüssigen Wasserstoff (LHRS) sowie die dazugehörige Infrastruktur für Wasserstoffmobilität vorzustellen. In diesem Vortrag wird ein Vergleich zwischen GHRS und LHRS angestellt und die Komponenten von LHRS werden beschrieben, um ein gutes Verständnis für den Betrieb von LHRS, Herausforderungen und potenzielle Risiken zu erhalten.

Die erste Frage vor der Einführung von LHRS könnte lauten: "Warum Flüssigwasserstoff?". Die Rückmeldungen von HRS zeigten die folgenden Hauptprobleme:

- teure Lieferkette für gasförmigen Wasserstoff in großem Maßstab,
- und begrenzte Tageskapazität.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Da Flüssigwasserstoff viel dichter ist als Erdgas, ist es von Interesse, neue Produkte zu entwickeln, um die Tankstellenkapazität zu erhöhen und die Gesamtbetriebskosten (TCO) durch die Verwendung von Flüssigwasserstoff als Ausgangsstoff zu senken. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Elemente der Versorgungskette für flüssigen und gasförmigen Wasserstoff, von der Produktion bis zur Nutzung für die Wasserstoffmobilität.

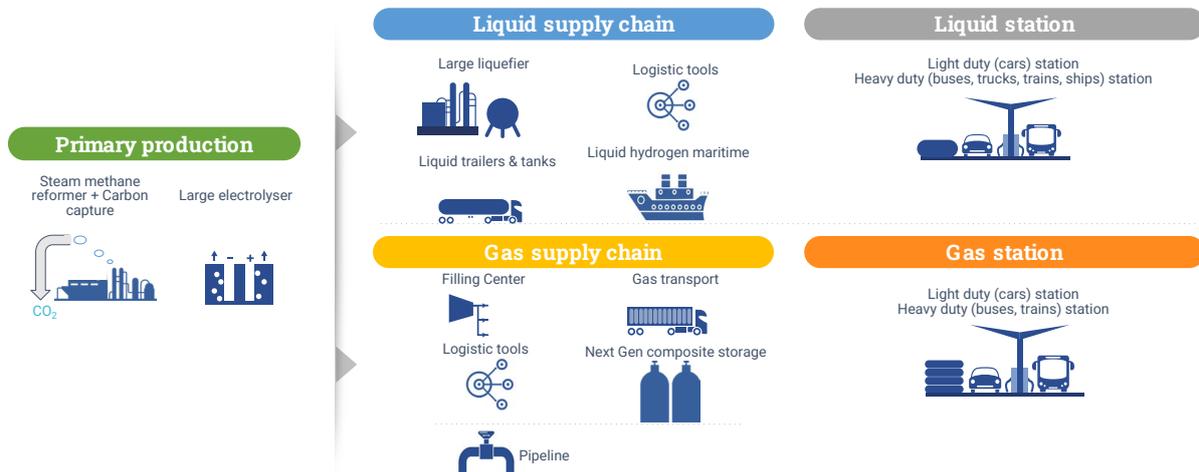


Abbildung 1. Wasserstoffversorgungskette, von der Produktion bis zur Nutzung für die H₂-Mobilität.

Abbildung 2 ist ein vereinfachtes Schema der Versorgungskette für flüssigen Wasserstoff, das zeigt, dass nach der Wasserstoffproduktion ein Verflüssiger erforderlich ist, um den Wasserstoff bei kryogener Temperatur zu verflüssigen. Dann sind LH₂-Anhänger (mit einer Kapazität von bis zu 4 t H₂) für den Wasserstofftransport zum LHRS zuständig, wo der Transfer vom Anhänger zum LHRS-Speicher mithilfe eines kleinen Verdampfers erfolgt. Die Einzelheiten dieser verschiedenen Schritte und der erforderlichen Ausrüstung sind jedoch genau das Thema dieser Lektion.

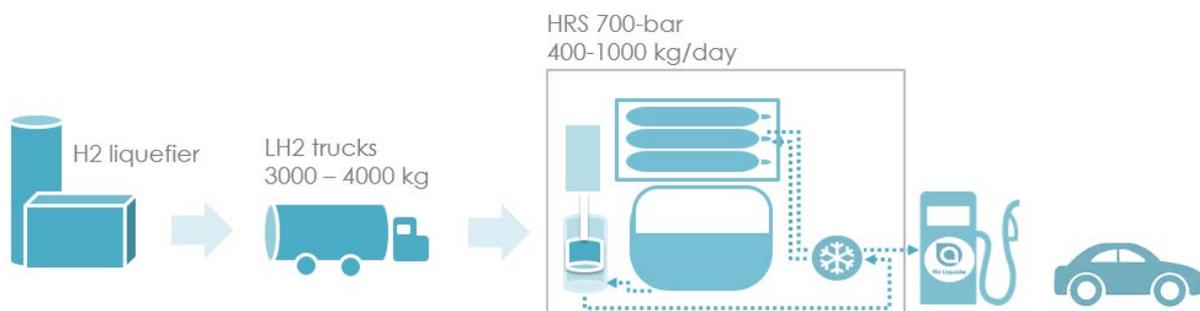


Abbildung 2. Schwerpunkt auf der Versorgung mit flüssigem Wasserstoff für Wasserstofftankstellen.

Am Ende dieser Lektion werden die Einsatzkräfte Folgendes wissen:

- Wasserstoffversorgungskette - von der Erzeugung bis zur Verwendung,
- Aufbau und Betrieb von GHRS und LHRS,
- die erforderliche Ausrüstung von GHRS und LHRS,
- die Methoden der Wasserstofferzeugung,
- Sicherheitsmerkmale in GHRS und LHRS und anderen Infrastrukturen

3. Einführung in die Wasserstofftankstellen

3.1 Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff (GHRS)

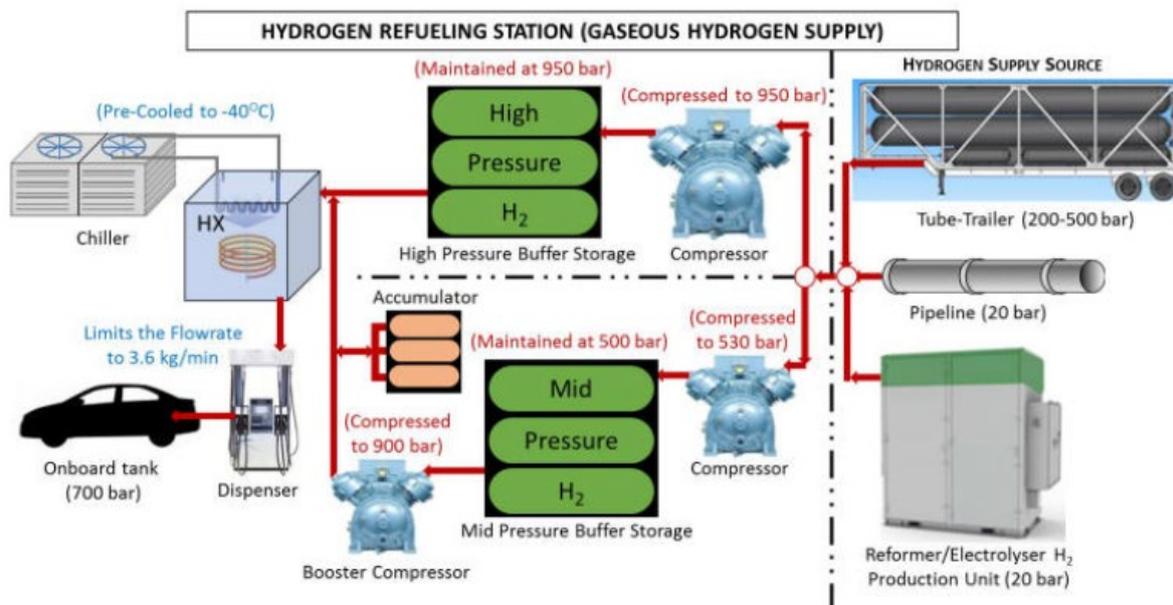


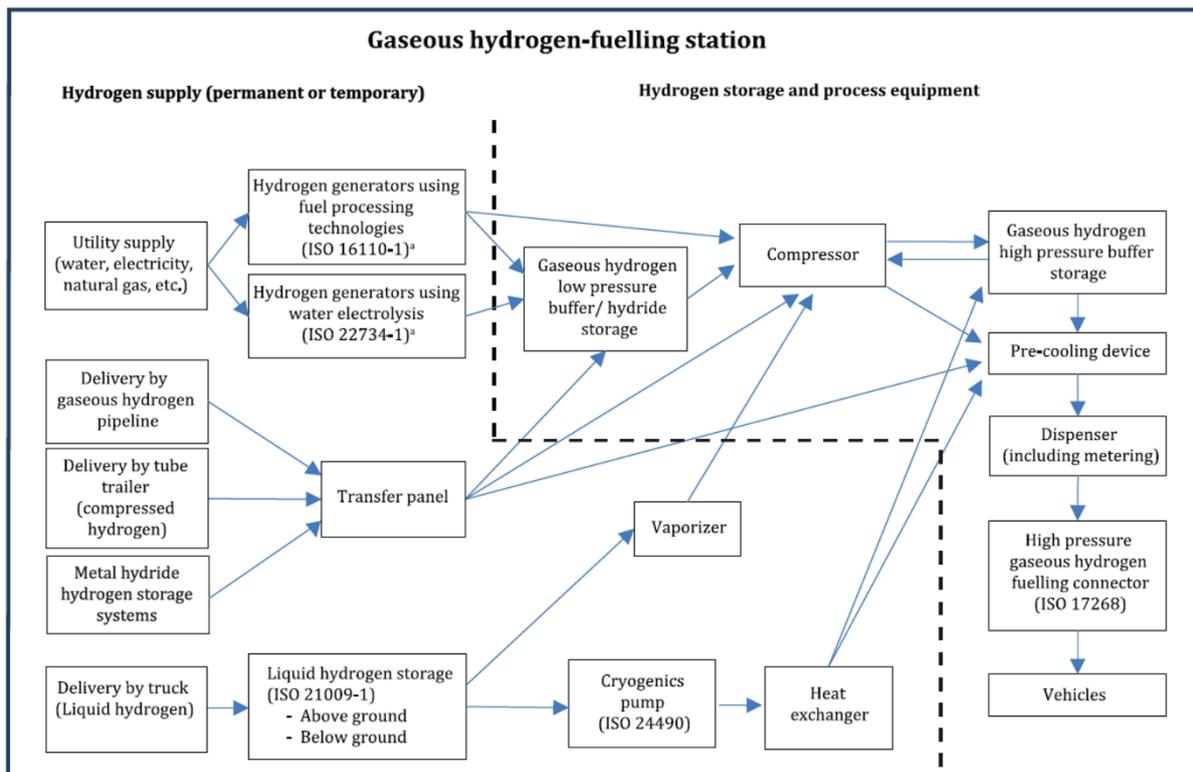
Abbildung 3. Abbildung eines Beispiels einer Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff (GHRS) [1]

Im Allgemeinen folgt der Weg des gasförmigen Wasserstoffs von der Versorgung bis zum Bordtank einem Verdichtungsprozess, um entweder 950 bar in einem Hochdruckpufferspeicher oder 500 bar in einem Mitteldruckpufferspeicher zu erreichen, dann passiert er einen Wärmetauscher und erreicht die Zapfsäule für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCV). Wie in Abbildung 3 dargestellt, umfasst ein typisches GHRS Speicherbehälter für gasförmigen Wasserstoff, Wasserstoffkompressoren, Vorkühlvorrichtungen und eine Wasserstoffzapfsäule. Die Mindestanforderungen an die Konstruktion, den Einbau, die Inbetriebnahme, den Betrieb, die Inspektion und die Wartung von öffentlichen und nicht-öffentlichen Wasserstofftankstellen, die gasförmigen Wasserstoff an leichte Straßenfahrzeuge (z. B. FCV) abgeben, wurden in der ISO-Norm 19880-1:200 (E) [2] erörtert, in der die Mindestanforderungen für GHRS festgelegt sind. Viele der allgemeinen

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Anforderungen sind auf Tankstellen für andere Wasserstoffanwendungen anwendbar, einschließlich, aber nicht beschränkt auf die folgenden:

- Tankstellen für Motorräder, Gabelstapler, Straßenbahnen, Züge, Schifffahrts- und Marineanwendungen;
- Tankstellen mit Innenabgabe;
- Anwendungen in Privathaushalten als Kraftstoff für Landfahrzeuge;
- Mobile Tankstellen; und
- Nicht-öffentliche Demonstrationstankstellen.



a - Kann einen Pufferbehälter (oder Akkumulator) zur Dämpfung oder Regulierung der Ansaugleistung des Kompressors enthalten.

Abbildung 4. Beispiel für typische Elemente einer Tankstelle mit Wasserstoffversorgung [2]

Diese Lektion konzentriert sich auf die Wasserstoffspeicher- und Prozessausrüstung (auf der rechten Seite der gestrichelten Linie in Abbildung 4), einschließlich Nieder- und Hochdruckpuffer-/Hydridspeicher für gasförmigen Wasserstoff, Kompressor, Vorkühlvorrichtung, Zapfsäule (einschließlich Dosierung), Anschluss für die Hochdruckbetankung mit gasförmigem Wasserstoff und Fahrzeuge. Hinweise zur Hochdruckverbindung für die Betankung mit gasförmigem Wasserstoff finden sich in ISO 17268.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

3.2 Flüssigwasserstoff-Tankstelle (LHRS)

Bevor die Hauptkomponenten einer Tankstelle mit Flüssigwasserstoffspeicher genauer vorgestellt werden, ist es interessant, eine bestehende und betriebene Tankstelle zu zeigen. Abbildung 5 zeigt die Linde Flüssigwasserstoff-Tankstelle in Oakland (USA).



Abbildung 5. Linde LHRS in Oakland.

In Abbildung 6 ist der Grundriss dargestellt, um den Platzbedarf einer solchen Anlage abschätzen zu können.

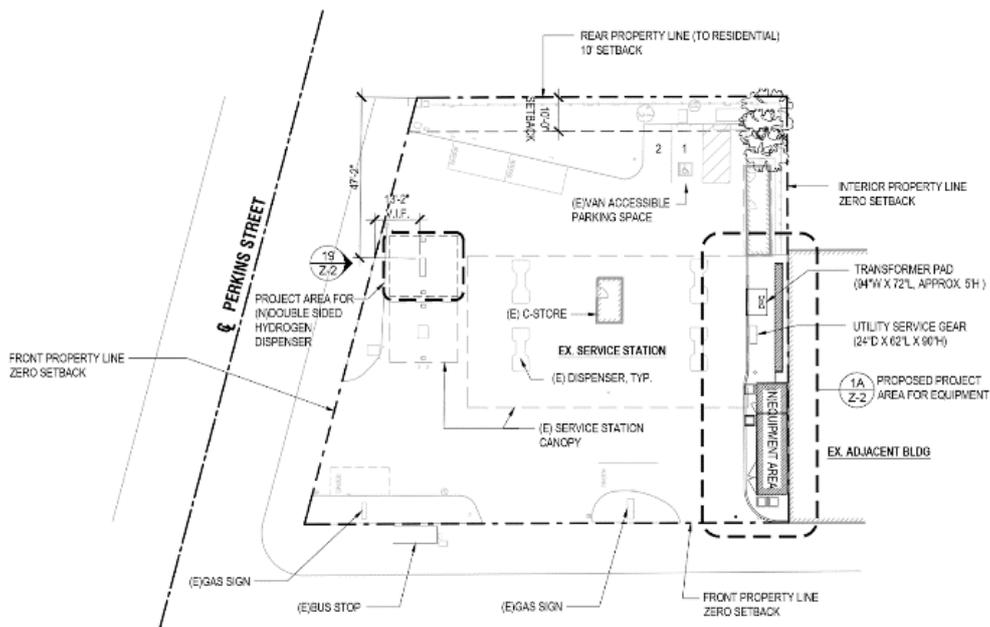


Abbildung 6. Aufbau des Linde LHRS.

3.3 Vergleich zwischen Tankstellen mit flüssigem und gasförmigem Wasserstoff

Eine LH₂-Speicher-Tankstelle besteht im Wesentlichen aus:

- ein LH₂-Tank (ca. 20 m³ - 1000 kg H₂) mit einem maximalen Betriebsdruck von 10,3 bar,
- eine isolierte Prozessleitung vom Boden des Lagertanks zur LH₂-Pumpe, die LH₂ aus dem Lagertank zu einem Verdampfer befördert; mit dieser Vorrichtung kann LH₂ bis zu 1000 bar (100 MPa) gepumpt werden,

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

- ein Heizgerät (genannt VAP: heißes Öl, elektrisch, um Wasserstoff bei 1000 bar (100 MPa) zu erhitzen),
- 1000 bar (100 MPa) Gaspuffer (einige m³); diese Puffer sind im Allgemeinen Bündel des Typs I oder II (d. h. Metallzylinder oder lange Metallrohre).

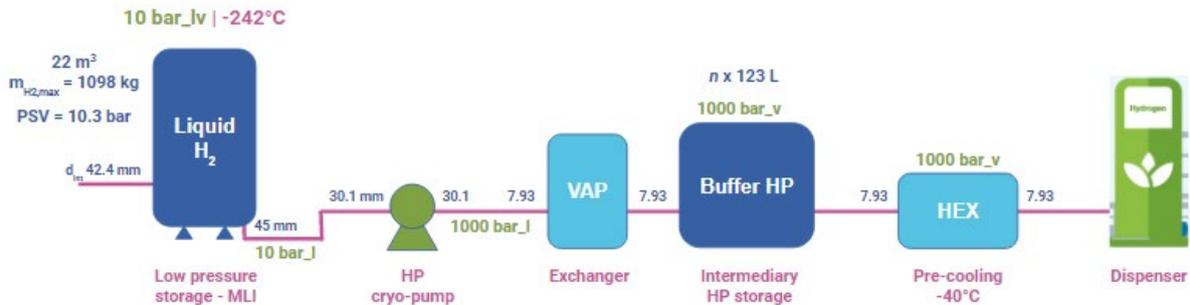


Abbildung 7. Vereinfachte Skizze einer Flüssigwasserstoff-Tankstelle.

Alle anderen Teile (z.B. Zapfsäule, Füllschlauch...) der Tankstelle sind ähnlich wie bei einer klassischen Gastankstelle (siehe Vergleich in Abbildung 8).

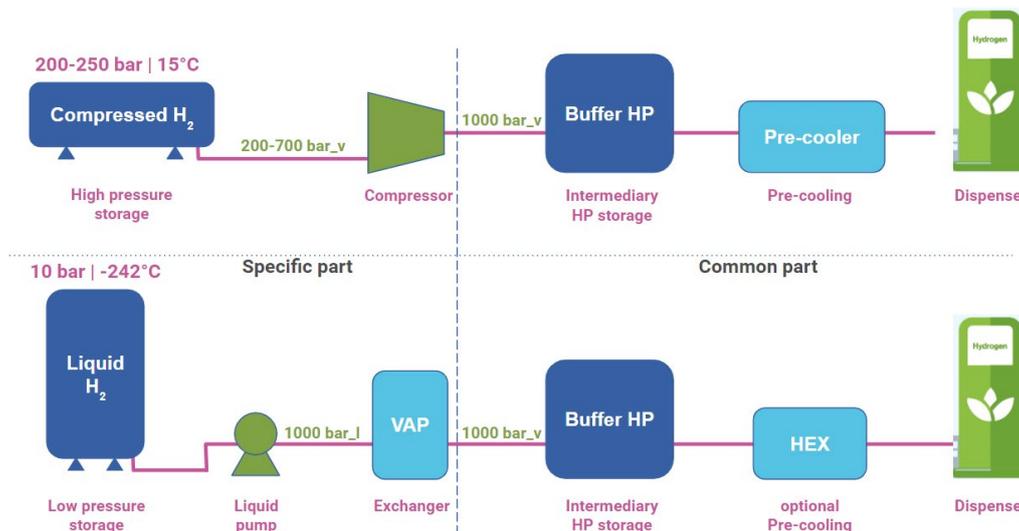


Abbildung 8. Vereinfachter Vergleich zwischen Tankstellen für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff.

Oben: gasförmiges HRS, unten flüssiges HRS.

In der nachstehenden Tabelle sind die wichtigsten Unterschiede zwischen LHRS und HRS zusammengefasst.

Tabelle 1. Vergleich zwischen LHRS und HRS

Thema	LHRS	HRS
Lagerung	Flüssiger Wasserstoff, kryogenische Temperatur (-240°C), niedriger Druck (bis zu 10 bar)	Gasförmiger Wasserstoff, Umgebungstemperatur, hoher Druck (von 200 bis 500 bar)

Nachfüllen der Station	Transfer von flüssigem Wasserstoff vom Anhänger zum Speicher	Hauptsächlich Tausch (= voll gegen leer)
Druckbeaufschlagung von Wasserstoff	Flüssigkeitspumpe und Verdampfer für die Abgabe von gasförmigem H ₂	Kompressor

3.4 Tankstelle mit Speicher für gasförmigen Wasserstoff - Ausrüstung

3.4.1 Speicherbehälter für gasförmigen Wasserstoff

Die Pufferspeicher, entweder Hochdruck- oder Niederdruckbehälter, sind für die Speicherung von komprimiertem Wasserstoff vorgesehen, der zwischen einem Wasserstoffgenerator und einem Kompressor für einen gleichmäßigen Gasfluss zum Kompressor oder zwischen dem Kompressor und dem Abgabesystem für die Akkumulation der Druckgasversorgung für die Fahrzeugbetankung angeordnet werden kann.

Speicherbehälter für die Speicherung von Wasserstoffgas sollten nach einer allgemein verwendeten nationalen/regionalen Norm hergestellt und für die voraussichtliche Zyklusdauer ausgelegt sein. Die Pufferspeicherung kann Wasserstoff umfassen, der in einem Metallhydridspeichersystem absorbiert wird.

Sind Pufferspeicher mit unterschiedlichem Auslegungsdruck zusammenschaltet, so sind sie so zu schützen, dass Behälter, die für einen niedrigen Druck ausgelegt sind, nicht durch eine Störung überbelastet werden können.

Die Auslegung des Pufferspeichers muss geeignete Vorkehrungen zur Verhinderung eines Ausfalls im Falle eines Brandes vorsehen, wenn dies aufgrund einer Risikobewertung für erforderlich gehalten wird. Geeignete Vorbeugemaßnahmen können eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen umfassen:

- Produktentlüftungssysteme, wie z. B. TPRDs;
- Thermische Abschirmung oder Brandsperre;
- Schutzmaßnahmen gegen das Ansammeln von brennbaren Flüssigkeiten unter dem Behälter;
- Fester Löschwasserschutz.

Es ist zu beachten, dass Lagerbehälter aus Verbundwerkstoffen im Vergleich zu metallischen Behältern einen erhöhten Schutz erfordern können. Die Behälter sind am Fundament zu befestigen, wobei das Fundament und die Stützen den für den Standort zu erwartenden Kräften standhalten müssen. Bei der Auslegung der Speicherbehälter für gasförmigen Wasserstoff und der Rohrleitungen ist das Risiko des direkten Auftreffens von Stichflammen aus möglichen Leckstellen oder Entlüftungsöffnungen auf einen benachbarten Behälter zu berücksichtigen.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Die Risikobewertung der Station muss Überlegungen zur Abschwächung der Gefahr einer Deflagration bis hin zur Detonation (DDT) im Druckwasserstoffbereich enthalten. Jede Gruppe von Pufferspeichern, die mit manuellen oder automatischen Ventilen isoliert werden können, sollte mit einer eigenen Reihe von Sicherheitsvorrichtungen ausgestattet sein.

Es ist zu beachten, dass bei der Lieferung von Wasserstoff in transportablen Zylindern, Tube-Trailern oder MEGC (Multiple-Element-Gas-Containern)¹ nicht immer Sicherheitseinrichtungen innerhalb des Zylinders bzw. der Behältergruppe vorhanden sind. Wenn jedoch transportable Zylinder, Schlauchanhänger oder MEGC in eine Tankstelle integriert werden, sollte nach einer angemessenen Risikobewertung, die die potenziell unterschiedlichen Konstruktionsaspekte, insbesondere die Druckzyklen, berücksichtigt, jedes Vor-Ort-Kompressionssystem, das Wasserstoff in einem solchen System komprimieren kann, eine Reihe von Sicherheitsvorrichtungen zum Schutz der Speicherrohre vor Überdruck enthalten.

3.4.2 Wasserstoff-Kompressor

Jeder Verdichter muss mit Druckentlastungsvorrichtungen oder gleichwertigen Sicherheitssystemen zur Vermeidung von Überdruck ausgestattet sein. Der Verdichter und gegebenenfalls die Hilfssysteme müssen auf die Verwendung im Rohrleitungssystem abgestimmt sein. Mögliche Vibrationen oder Bewegungen des Verdichters sollten ausreichend kompensiert werden, so dass die Rohrleitungssysteme nicht beschädigt werden und keine Leckagen auftreten. Verdichter sollten insbesondere für den Betrieb mit Wasserstoff und zur Minimierung des Eintrags von Verunreinigungen ausgelegt sein. Das Eindringen von Luft am Einlass des Verdichters ist zu jeder Zeit zu vermeiden, um die Bildung entzündlicher Gemische zu verhindern. Die mit der Installation, der Wartung und dem Betrieb von Verdichtern verbundenen Risiken sind zu bewerten, und es sind Gegenmaßnahmen festzulegen und umzusetzen, um die Ausrüstung zu schützen und das Auftreten potenziell gefährlicher Ereignisse zu verhindern. Jeder Kompressor sollte mit Mitteln ausgestattet sein, die es ermöglichen, alle Teile des Systems zu Wartungszwecken vollständig drucklos zu machen. Wird im Rahmen der Risikominderungsprüfung einer Kompressoranlage die Verwendung einer Inertisierung empfohlen, sind Mittel zur Spülung des Kompressors mit Inertgas vor Wartungsarbeiten vorzusehen, einschließlich eines schriftlichen Verfahrens, um eine wirksame Inertisierung zu ermöglichen.

Um vibrations- und bewegungsbedingte Leckagen zu vermeiden, ist für einen ausreichenden Ausgleich von Vibrationen und Bewegungen zwischen den miteinander verbundenen Systemen einer Wasserstofftankstelle sowie zwischen den Wasserstoffversorgungsleitungen und den Saugleitungen des Verdichters zu sorgen. Schwingungen, die die Festigkeit von

¹ multimodulare Zusammenstellung von Flaschen, Rohren oder Flaschenbündeln, die durch eine Sammelleitung miteinander verbunden und in einem Rahmen zusammengefügt sind, einschließlich der für den Gastransport erforderlichen Serviceeinrichtungen und baulichen Einrichtungen.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Rohrleitungen, Armaturen und Bauteilen beeinträchtigen können, dürfen sich nicht auf die Rohrleitungen übertragen.

Es sind Sicherheitskontrollen einzubauen, um sicherzustellen, dass die Temperatur- und Druckwerte die festgelegten Betriebswerte nicht über- oder unterschreiten, z. B. für den Eingangsdruck, die Austrittstemperatur und den Druck, wobei das Kontrollsystem gegebenenfalls einen Alarm und/oder eine Abschaltung auslöst oder geeignete Alternativmaßnahmen ergreift. Zusätzlich zu den Instrumenten und Kontrollen, die normalerweise für Gasverdichtungsanlagen vorgesehen sind, sollten die folgenden besonderen Sicherheitsvorkehrungen für Wasserstoff in Betracht gezogen werden.

Ein Lufteintritt am Einlass des Kompressors muss jederzeit vermieden werden, um die Bildung eines entflammbareren Gemisches zu verhindern. Ist diese Bedingung nicht mehr gewährleistet, muss der Kompressor abgeschaltet werden. Beispielsweise sollte der Einlassdruck durch einen Druckanzeiger/Schalter überwacht werden, wobei das Kontrollsystem gegebenenfalls einen Alarm und/oder eine Abschaltung auslöst, um ein Vakuum in der Einlassleitung und damit das Eindringen von Luft zu vermeiden. Dieser Druckanzeiger/Schalter sollte den Kompressor abschalten, bevor der Einlassdruck den atmosphärischen Druck erreicht.

Besteht unter normalen Betriebsbedingungen aufgrund eines niedrigen Einlassdrucks die Möglichkeit einer Sauerstoffverunreinigung, kann die Messung des Sauerstoffgehalts im Wasserstoff bei der Risikobewertung als Abhilfemaßnahme in Betracht gezogen werden. Sollte der Sauerstoffgehalt beispielsweise einen Volumenanteil von 1 % erreichen, kann der Kompressor automatisch abgeschaltet werden. Um kritische Situationen zu vermeiden, können alternative Maßnahmen ergriffen werden.

Die Temperatur nach der letzten Verdichtungsstufe oder die Temperatur nach dem Kühler, sofern vorhanden, muss durch einen Temperaturanzeiger/-schalter überwacht werden, wobei das Steuersystem bei einer vorher festgelegten Höchsttemperatur gegebenenfalls einen Alarm und/oder eine Abschaltung auslöst.

Der Druck nach der letzten Verdichtungsstufe ist durch einen Anzeiger/Schalter zu überwachen, wobei das Kontrollsystem bei einem vorher festgelegten Höchstdruck, der unter dem des Überdruckschutzes liegt, gegebenenfalls einen Alarm und/oder eine Abschaltung auslöst oder alternative Maßnahmen, wie z. B. Recycling, einleitet.

Das Kühlwassersystem sollte durch einen Anzeiger/Schalter überwacht werden, wobei das Kontrollsystem bei niedrigem Druck, Durchfluss oder hoher Temperatur gegebenenfalls einen Alarm und/oder eine Abschaltung auslöst.

Wenn der Motor und die Hilfseinrichtungen mit einem Inertgas gespült oder durch Druckbeaufschlagung mit Druckluft oder einem Inertgas geschützt sind, muss ein niedriger Druck/Durchfluss durch einen Alarm angezeigt werden, der so eingerichtet sein muss, dass der Motor und die Hilfseinrichtungen gemäß IEC 60079-2 abgeschaltet werden.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Ist das Kurbelgehäuse des Kompressors mit einem Inertgas gespült oder durch Druckbeaufschlagung mit Druckluft oder einem Inertgas geschützt, muss ein niedriger Druck/Durchfluss durch einen Alarm angezeigt werden, der den Kompressor abschaltet.

3.4.3 Vorkühlung

Die Vorkühlung ist ein Prozess der Abkühlung der Temperatur des Wasserstoffs vor der Abgabe. Die Kosten für die Vorkühleinheit machen etwa 10 % der gesamten Anschaffungskosten des GHRS aus [3], und ein tieferes Verständnis ihrer Kostenkomponente ist notwendig, um die maximal mögliche Kostenreduzierung des GHRS zu erreichen. Im Gegensatz zu den Studien über Kompressor- und Speichersysteme liegen über die Vorkühleinheit nur relativ wenige Informationen vor. Die Vorkühlung des Wasserstoffkraftstoffs vor der Abgabe in den Fahrzeugtank ist entscheidend, um eine Überhitzung des Tanks zu verhindern. Das Betankungsprotokoll SAE J2601 legt einen begrenzten Betankungsprozess fest, um ein sicheres und schnelles Betanken von Brennstoffzellenfahrzeugen zu gewährleisten [4].

Das Betankungsprotokoll SAE J2601 legt für jeden Wasserstofftankstellentyp einen Temperaturbereich für die Vorkühlung des Wasserstoffs fest; so muss eine T40-Tankstelle den Wasserstoff auf eine Temperatur zwischen -33 und -40°C vorkühlen, bevor er an die Brennstoffzellenfahrzeuge abgegeben wird. Die Vorkühleinheit befindet sich zwischen dem Hochdruckpufferspeicher und der Zapfsäule und kühlt den gasförmigen Wasserstoff innerhalb von 30 Sekunden nach Beginn der Betankung auf eine Temperatur von mindestens -33°C vor. Anschließend hält sie die Temperatur während der gesamten Dauer der Betankung in diesem vorgeschriebenen Bereich.

Die Geschwindigkeit, mit der Brennstoffzellenfahrzeuge betankt werden können, hängt unter anderem direkt von der Wasserstoff-Vorkühltemperatur, der Umgebungstemperatur und dem anfänglichen Druck im Tank ab [5]. Je höher die Umgebungstemperatur ist, desto länger dauert es, den Tank zu füllen, und umgekehrt. Von diesen drei Schlüsselfaktoren hat jedoch die Vorkühlung den größten Einfluss auf die Betankungszeit. Da die Betankungszeit einer der kritischen Parameter ist, der die Betankungserfahrung von Brennstoffzellenfahrzeugen beeinflusst, sollte das Vorkühlsystem so ausgelegt sein, dass es die erforderliche Betankungsrate und -kapazität unter extremen Bedingungen und zu den geringstmöglichen Kosten liefert.

Eine typische Vorkühleinheit in einem GHRS nutzt einen thermodynamischen Kältekreislauf; sie lässt ein Kältemittel durch einen zweistufigen Verdichter, einen Verflüssiger, ein thermostatisches Expansionsventil und einen Verdampferwärmetauscher zirkulieren (Abbildung 9). Dieser Kältekreislauf beinhaltet eine Unterkühlung des Kältemittels, um den Kühleffekt am Verdampfer zu maximieren, indem ein Teil des aus dem Verflüssiger austretenden Kältemittels durch das Expansionsventil, den Unterkühler-Wärmetauscher und die zweite Stufe des Verdichters zirkuliert. Der abgegebene Wasserstoff wird vorgekühlt,

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

indem über den Verdampferwärmetauscher Energie an das Kältemittel mit niedriger Temperatur abgegeben wird. Der Verdampfer-Wärmetauscher kann mit einer großen thermischen Masse ausgelegt sein (hauptsächlich, um als Puffer zu fungieren und dadurch die erforderliche Kälteleistung zu verringern), oder er kann für Verpackungszwecke eine kompakte Bauweise aufweisen.

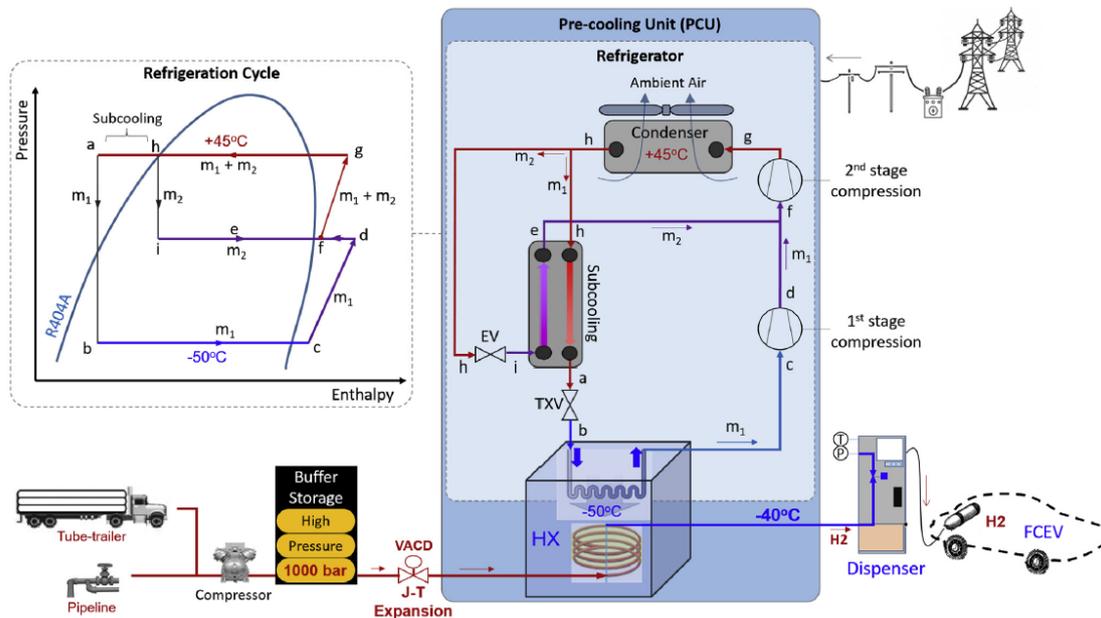


Abbildung 9. Schematische Darstellung des Betriebs der Vorkühleinheit in einem GHR, bestehend aus Kompressor, Hochdruckpufferspeicher, Vorkühleinheit und Spender.

Zwei wesentliche Faktoren wirken sich auf die Kühlleistung und die Dimensionierung der Vorkühleinheit aus: der J-T-Expansionsprozess (Lektion 2) am VACD (Variable Area Control Device) vor dem Vorkühl-Wärmetauscher und die Anforderung der Tankstelle, eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen back-to-back (B2B) betanken zu können. Der J-T-Effekt hängt mit der Einlasstemperatur des in die Vorkühleinheit fließenden Wasserstoffs zusammen, während die B2B-Betankungsanforderung mit der stündlichen Spitzenbetankungsnachfrage an der Zapfsäule zusammenhängt [6].

Der J-T-Effekt bezieht sich auf die Temperaturänderung eines Gases, wenn es mit konstanter Enthalpie durch ein Ventil gedrückt wird (adiabatische Expansion). Alle Gase haben eine "Inversionstemperatur", unterhalb derer sie während des J-T-Expansionsprozesses einen Temperaturabfall erfahren. Die Inversionstemperatur korreliert direkt mit der kritischen Temperatur des Gases. Stoffe mit extrem niedriger kritischer Temperatur (z. B. Wasserstoff, Helium und Neon) haben Inversionstemperaturen, die weit unter der Umgebungstemperatur liegen, und daher steigen ihre Temperaturen während der isenthalpischen Expansion über ihre Inversionstemperaturen (< 224 K für Wasserstoff). Wenn der Hochdruckwasserstoff aus dem Pufferspeicher durch einen VACD strömt, erfährt er während der Expansion einen Druckabfall. Die Ausdehnung des Wasserstoffs und der Druckabfall in der VACD führen zu einem Anstieg der Temperatur des Wasserstoffgases, da Wasserstoff bei Ausdehnungsdruck und -temperatur

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

negative J-T-Koeffizienten aufweist (etwa $-0,05$ K/bar bei 900 bar und $-0,03$ K/bar bei 1 bar und 25 °C) [7]. Allerdings könnte der maximale Druckabfall über die VACD theoretisch dazu führen, dass die Temperatur des Wasserstoffkraftstoffs um 40 °C ansteigt, bevor er in den Vorkühlungswärmetauscher gelangt. Dieser beträchtliche Temperaturanstieg könnte eine zusätzliche Belastung für die Vorkühleinheit darstellen, so dass mehr Kühlleistung benötigt wird, um den größeren erforderlichen Temperaturabfall am Wärmetauscher auszugleichen. Ebenso kann ein Anstieg der Anzahl der B2B-Tankfüllungen, die die Station bedienen muss, die erforderliche Kapazität der Vorkühleinheit erhöhen, da der Wärmetauscher für die B2B-Spitzennachfrage dimensioniert wird, auch wenn die Nachfrage während des größten Teils des Tages viel geringer ist.

Die gewünschte Anzahl von B2B-Füllungen wirkt sich stark auf die Kapazitäten und Kosten der Betankungskomponenten aus. Beim B2B-Tanken fährt ein Fahrzeug nach dem anderen zum Tanken an die Zapfsäule heran, wobei zwischen den Tankvorgängen eine kurze Pause von etwa 2 Minuten liegt [6]. Da es während einer Reihe von B2B-Tankvorgängen keine Leerlaufzeit gibt, bleibt den GHRS-Komponenten nur wenig Zeit, sich zu erholen und aufzuladen. Eine hohe Anzahl von B2B-Füllungen (z. B. 5) erhöht die Belastung des Wärmetauschers, so dass die Fähigkeit seiner thermischen Masse, die Wasserstofftemperatur unter -33 °C zu halten, gefährdet ist. In solchen Fällen hat das Kältesystem möglicherweise nicht genügend Zeit, um den Wärmetauscher zwischen den Befüllungen zu kühlen. Wird bei der Auslegung der Betankungskomponenten der mit der B2B-Betankung verbundene Spitzenbedarf nicht berücksichtigt, kann die Vorkühleinheit unterdimensioniert sein, wodurch die Betankungsleistung und die Kundenzufriedenheit gefährdet werden.

Neben dem J-T-Effekt und der B2B-Betankung ist es wichtig, den Kompromiss zwischen verschiedenen Konzepten für die Vorkühlung zu berücksichtigen. Eine Vorkühleinheit kann einen Wärmetauscher mit einer größeren thermischen Masse verwenden, der in der Lage ist, eine kleine Temperaturänderung aufrechtzuerhalten, während er den Wasserstoffstrom kühlt, und somit weniger Kühlleistung vom Kältesystem benötigt. Andererseits muss ein kompakter Wärmetauscher auf eine Kälteleistung abgestimmt werden, die der momentanen Kühllast entspricht (d. h. Kühlung bei Bedarf). Darüber hinaus ist die Kühlleistung eines kompakten Wärmetauschers wegen seiner geringeren Pufferwirkung (aufgrund seiner geringeren thermischen Masse) empfindlicher gegenüber Faktoren, die sich auf seine Eintrittstemperatur auswirken, wie die Umgebungstemperatur und der J-T-Effekt vor dem Wärmetauscher.

Bei höheren Umgebungstemperaturen steigt die Wasserstofftemperatur am Einlass des Wärmetauschers an, so dass ein Wärmetauscherblock mit einer größeren thermischen Masse erforderlich sein kann, um seine Temperatur innerhalb des Auslegungsbereichs zu halten. In einem kompakten Wärmetauschersystem muss jedoch eine höhere Umgebungstemperatur durch eine höhere bedarfsgerechte Kühlleistung ausgeglichen werden. Einer der thermodynamischen Nachteile eines Wärmetauschers mit großer thermischer Masse besteht darin, dass er mehr Energie für die Deckenkühlung verbraucht (um den Wärmetauscher auf -

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

40°C zu halten) als sein kompaktes Gegenstück. Andererseits benötigt eine kompakte Konfiguration mit bedarfsgesteuerter Wärmetauscherkühlung einen leistungsfähigeren Kühler, verbraucht aber weniger Energie für die Deckenkühlung. Mit anderen Worten: Es besteht ein Kompromiss zwischen der Kühlleistung und der thermischen Masse des Wärmetauschers. Was die Kosten betrifft, so hat ein kompakter Wärmetauscher in der Regel eine komplexere Struktur für die schnelle Wärmeübertragung bei Bedarf, so dass seine Herstellungskosten wahrscheinlich höher sind als die eines Wärmetauschers mit einer großen thermischen Masse. Dennoch sind die Material-, Transport- und Installationskosten von Kompaktwärmetauschern im Vergleich zu Wärmetauschern mit großer thermischer Masse aufgrund der geringen Systemgröße niedrig.

Wird der abgegebene Wasserstoff vorgekühlt, muss das Abgabesystem mit einer Vorrichtung ausgestattet sein, die bestätigt, dass die Temperatur des vorgekühlten Kraftstoffs in der Zapfsäule korrekt ist und dass die Steuerung sowohl die oberen als auch die unteren Temperaturgrenzen des Betankungsprotokolls einhält. Verwendet das Betankungsprotokoll die Kommunikation der Tanktemperatur im Fahrzeug und kommt es zu einem Ausfall der Kommunikation, sollte das Protokoll eine Abschaltung bewirken oder mit einer Betankung ohne Kommunikation fortfahren, wenn das Protokoll dies zulässt.

3.4.4 Wasserstoff-Zapfsäule

Das Zapfsäulensystem ist dem Wasserstoffversorgungssystem nachgeschaltet und umfasst alle für die Betankung des Fahrzeugs erforderlichen Geräte, über die der komprimierte Wasserstoff dem Fahrzeug zugeführt wird. Die Wasserstoffzapfsäule ist ein Teil des Zapfsystems, zu dem auch der Zapfsäulenschrank und die Tragkonstruktion gehören, die sich im Betankungsraum befinden.

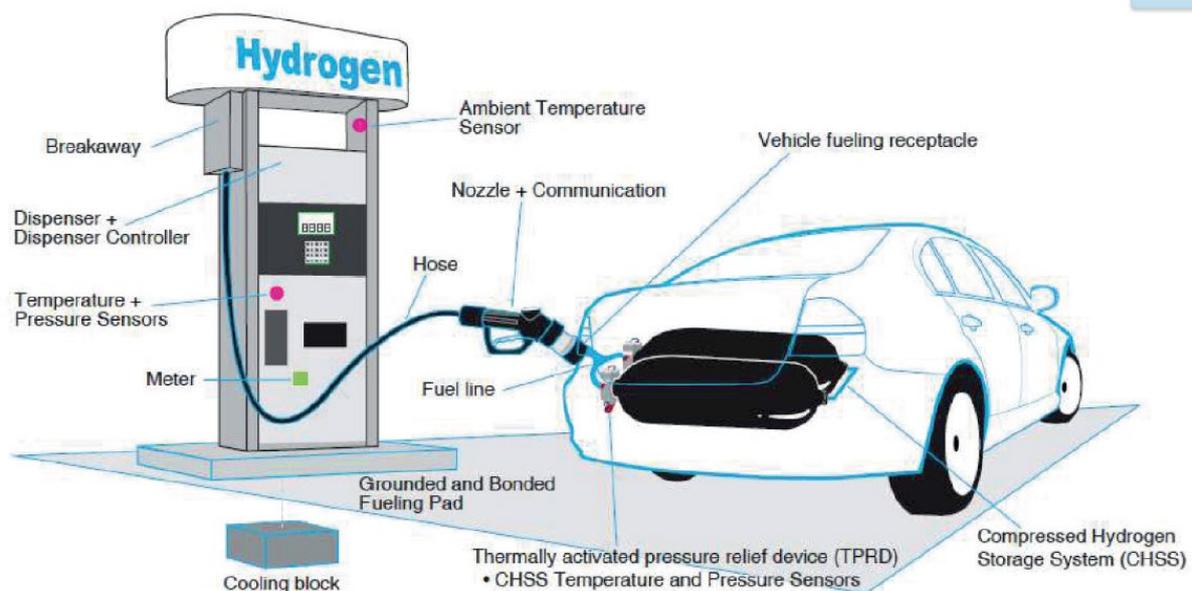


Abbildung 10 Beispiel für die wichtigsten Komponenten des Zapfsäulensystems an der Tankstelle [2]

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für die Hauptkomponenten des Tankstellenzapfsystems einschließlich des Brennstoffzellenfahrzeug-Hochdruckwasserstoffsystems, das unter anderem den Behälter und das Druckwasserstoffspeichersystem (CHSS) mit Sensoren sowie Druckentlastungsvorrichtungen umfasst. Das CHSS verfügt über eine thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtung zum Schutz vor Überdruck im Falle eines Brandes. Auf der Stationsseite gibt es ein automatisches Steuerungssystem für die Betankung (z. B. über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)) sowie Verfahren zur Fehlererkennung und -verwaltung. Die Station verfügt auch über eine Überdruckschutzvorrichtung, wie z. B. eine Druckentlastungsvorrichtung oder etwas Gleichwertiges, um das Zapfsystem und das Fahrzeug vor Überdruck zu schützen.

Die Zapfsäule an einer öffentlichen Tankstelle für leichte Nutzfahrzeuge ist in der Regel mit separaten Zapfpistolen ausgestattet, um Fahrzeuge mit einem Nennbetriebsdruck von 35 MPa und/oder 70 MPa zu betanken. Die Zapfpistole der Tankstelle kann einen Kommunikationsempfänger und das Fahrzeug einen Kommunikationssender (z. B. SAE J2799) enthalten. Das IrDA-Kommunikationssystem des Fahrzeugs kann das SAE J2799-Protokoll verwenden, um die gemessene Temperatur und den Druck des Druckwasserstoffspeichers im Fahrzeug an die Wasserstoffzapfsäule zu übertragen. Das Steuerungssystem der Zapfsäule kann diese Daten zur Steuerung des Betankungsvorgangs verwenden.

Um den maximalen Betriebsdruck (MOP) zu erreichen, der für die Betankung des CHSS des Wasserstofffahrzeugs unter allen Betriebsbedingungen erforderlich ist, werden in Tabelle 2 die empfohlenen Mindestdruckstufen der Komponenten des Wasserstoffzapfsystems in Bezug auf die Wasserstoffversorgungslevel (HSL) der Zapfsäule, die Druckklasse (gemäß ISO 17268) und den höchstzulässigen Betriebsdruck (MAWP) des Zapfsystems angegeben.

Tabelle 2 Druckstufen des Schanksystems und empfohlene Mindestdruckstufen der Komponenten

Wasserstoffversorgungslevel(HSL)	Druckklasse	Maximaler Betriebsdruck (MOP)	Maximal zulässiger Betriebsdruck des Ausgabesystems (MAWP)
Entspricht dem NWP des betankten Fahrzeugs		1,25 HSL× Höchster Druck bei normaler Betankung	1.375 HSL× Höchster zulässiger Sollwert für die Druckabsicherung der Schankanlage
25 MPa	H25	31,25 MPa	34,375 MPa
35 MPa	H35	43,75 MPa	48,125 MPa
50 MPa	H50	62,5 MPa	68,75 MPa
70 MPa	H70	87,5 MPa	96,25 MPa

Werden Bauteile verwendet, die unter dem in Tabelle 2 angegebenen Nenndruck liegen, so ist der höchstzulässige Betriebsdruck des Schanksystems entsprechend dem Bauteil mit dem

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

niedrigsten Nenndruck herabzusetzen. Die Zapfanlage muss außerdem gegen Überdruck geschützt sein.

Zusätzlich zur Druckstufe sollten die Bauteile des Wasserstoffabgabesystems die folgenden Anforderungen erfüllen:

- einen Umgebungstemperaturbereich von -40°C bis $+50^{\circ}\text{C}$, es sei denn, die örtlichen Gegebenheiten erlauben oder erfordern andere Temperaturgrenzen;
- Verträglichkeit von Materialien, die normalerweise mit Wasserstoff in Berührung kommen;
- eine bestimmte Lebensdauer vor der Wartung oder dem Austausch.

Die angestrebte Zykluslebensdauer sollte 100.000 Zyklen für die Betankungseinheit betragen. Unabhängig davon, ob dieses Ziel erreicht wird oder nicht, sollte die Zykluslebensdauer definiert und angegeben werden, damit geplante Wartungsmaßnahmen einem Ausfall zuvorkommen können.

Die Bauteile des Hochdruck-Wasserstoffabgabesystems dürfen nur dann mit der Druckklasse gekennzeichnet werden, wenn die Bauteile so konstruiert und geprüft sind, dass sie die oben genannten Anforderungen an Druck, Temperatur, Materialverträglichkeit und Lebensdauer erfüllen oder übertreffen. Hochdruckbauteile sind unter strikter Einhaltung der Anweisungen des Lieferanten und nach einem genau festgelegten Montageverfahren zu montieren. Der Hersteller muss sicherstellen, dass der Druckabfall zwischen dem Drucksensor der Zapfsäule, der den Fahrzeugdruck überwacht, und der Zapfpistole den im Betankungsprotokoll festgelegten Wert während des Wasserstoffflusses zum Fahrzeug nicht überschreitet.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

3.5 Tankstelle mit Flüssigwasserstoffspeicher - Ausrüstung

Das LHRS ist in der Regel in den LH₂-Speicher integriert und besteht aus dem LHRS-Container, dem LH₂-Tank, den Verbindungsleitungen, dem Wasserstoffspender und dem Prüfgerät als Hauptbestandteilen (siehe Abbildung 11).

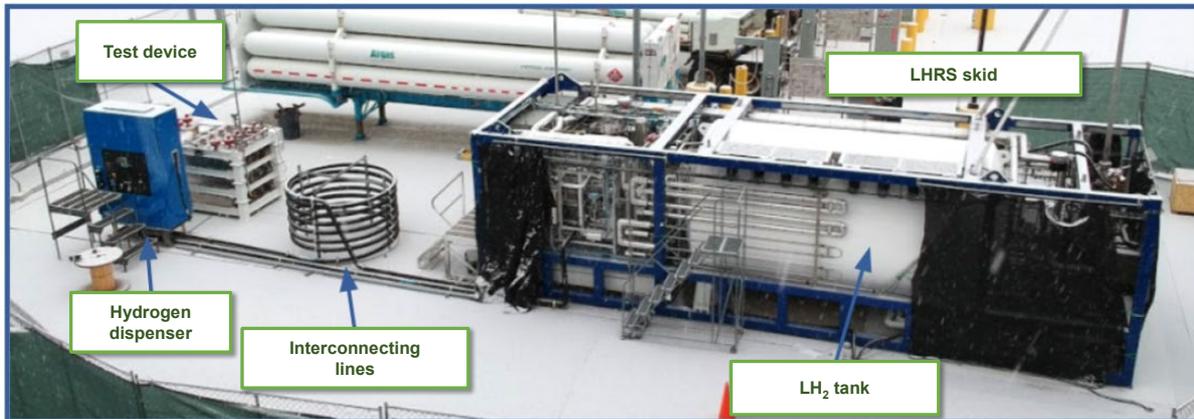


Abbildung 11. Überblick über die Hauptbestandteile eines LHRS-Typs mit integriertem LH₂-Speicher.

Das allgemeine Ablaufdiagramm einer Flüssigwasserstoff-Tankstelle ist in Abbildung 12 dargestellt.

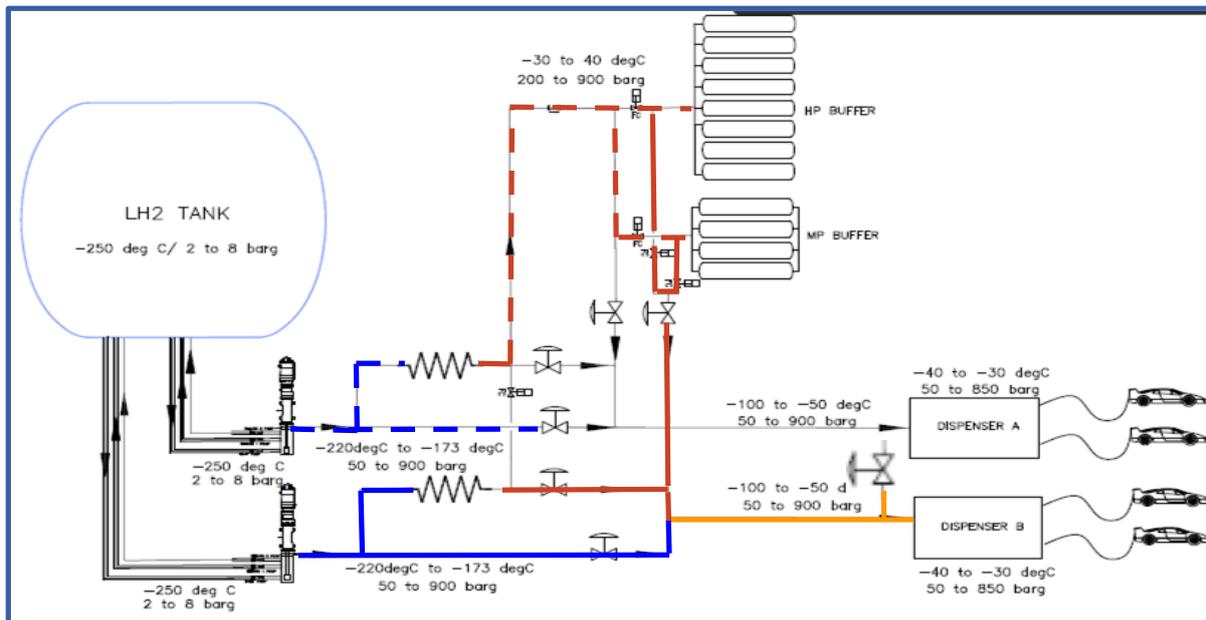


Abbildung 12. LH₂-basierten Tankstelle.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Die wichtigsten Geräte des LHRS sind:

- den LH₂-Tank,
- die Kryopumpe,
- den Verdampfer,
- die Ventilplatte,
- den Puffern,
- die Verbindung zur Zapfsäule,
- den Spender.

Die folgende Abbildung zeigt einen Typ des LHRS-Hauptgestells mit der Kennzeichnung der Hauptfunktionsausrüstung:

- in Abbildung 13, für die "kryogene" Seite,
- in Abbildung 14, für die "warme" Seite.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Geräte und ihre Funktionen genauer beschrieben.



Abbildung 13. Übersicht über das LHRS-Container - Seite "Cryogenic".

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur



Abbildung 14. Übersicht über die LHRS-Container - "warme" Seite.

3.5.1 Speicherung von Flüssigwasserstoff

Bei LHRS kann der Flüssigwasserstofftank in einen Container integriert werden, wie es in diesem Dokument dargestellt ist und wie es bei Linde LHRS in Oakland gezeigt wird. Der LH₂-Speicher kann jedoch auch ein eigenständiger Behälter sein, der vertikal oder horizontal aufgestellt wird.

Bei dem in Abbildung 15 dargestellten LHRS beträgt das LH₂-Speichervolumen etwa 20 m³ und bietet eine Kapazität von 1 t H₂. Die Speichertemperatur beträgt etwa -250°C, der Speicherdruck liegt zwischen 2 und 8 bar.

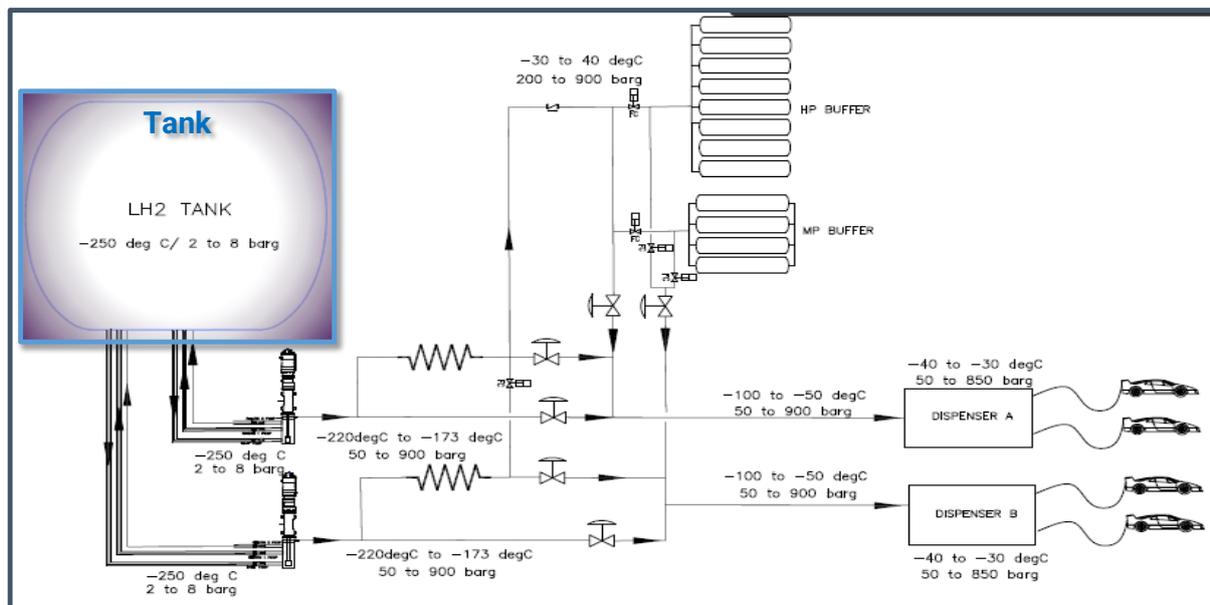


Abbildung 15. LH₂-basierten Tankstelle - LH-Lagertank₂

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Die wichtigsten Parameter in diesem Teil des LHRS sind:

- Die gewählte Isolierung ist eine mehrschichtige Isolierung (MLI) mit Vakuum, um die kryogene Temperatur zu halten (siehe Abbildung 16),
- Der Tank ist waagrecht und kann in einen Container integriert werden, um den Genehmigungsanforderungen gerecht zu werden (andere Konfigurationen sind möglich, z. B. mit einem freistehenden Tank mit größerem Fassungsvermögen),
- Alle Schnittstellen befinden sich auf einer Seite des Tanks,
 - o Vorlauf- und Rücklaufleitungen für jede Pumpe (+ eine dritte zur Kontrolle des Füllstands im linken Pumpensumpf)
 - o Entweder konventioneller Modus oder Thermosiphon-Modus
 - o Sicherheit, Entlüftungsleitungen
 - o Fülllinien (unten und oben)
- Der Aufprallschutz ist in den Rahmen integriert (siehe Abbildung 17).



Abbildung 16. MLI-Isolierung.



Abbildung 17. Aufprallschutz (in blau) am Boden.

Der LH₂-Tank wird von einem LH₂-LKW geliefert. Dieser LH₂-Tankwagen besteht aus einem 40 m langen liegenden Tank, der zwischen 1 und 12 bar arbeitet (Bestand: 4 t H₂). Die

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Verbindung zwischen dem Speicher und dem LKW erfolgt über eine flexible Transferleitung. Der Transfer wird ohne Pumpe durchgeführt. Auf dem Anhänger befindet sich ein kleiner Verdampfer, um einen Druckaufbau im Tank des Lastwagens zu erzeugen und den Transfer des flüssigen Wasserstoffs in den stationären Vertikalspeicher zu ermöglichen.

3.5.2 Kryogenische Pumpe

Die im LHRS installierten Kryopumpen sind in Abbildung 18 dargestellt.

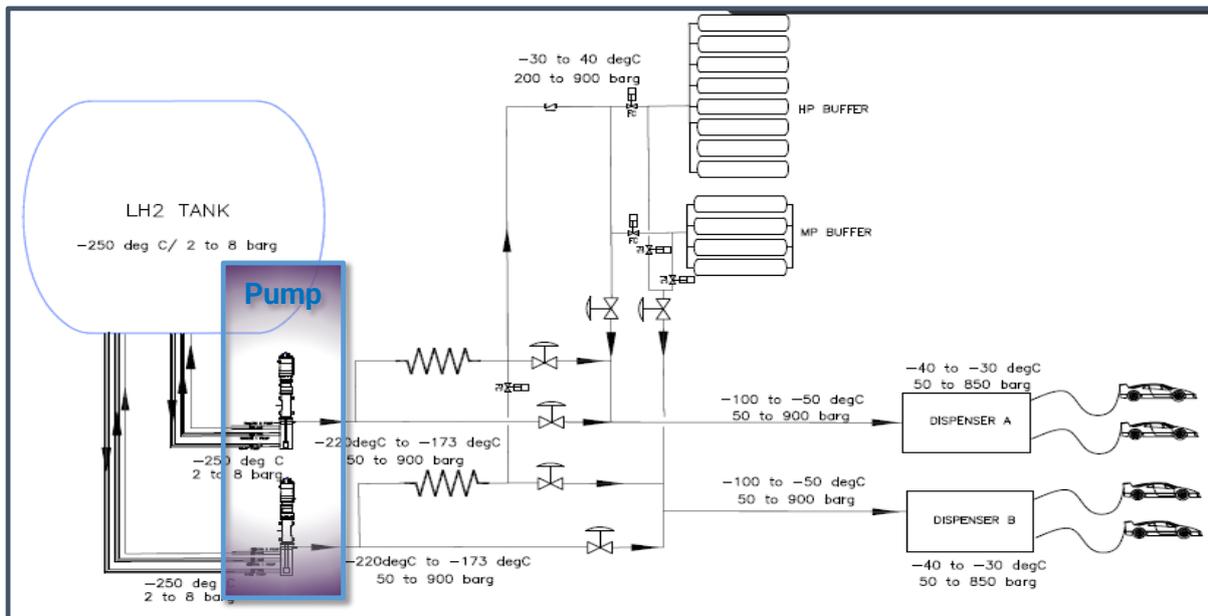


Abbildung 18. 2LH-basierten Tankstelle - LH-Pumpe.2

Die in Abbildung 19 gezeigte Kryopumpe ermöglicht den Flüssigkeitstransfer vom Speicher zum Wärmetauscher. Der Druck des flüssigen Wasserstoffs wird zwischen Speicher und Wärmetauscher leicht erhöht.



Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Abbildung 19. Kryopumpe.

Die Pumpe ist in einen vakuumummantelten Sumpf getaucht, wie in Abbildung 20 dargestellt.

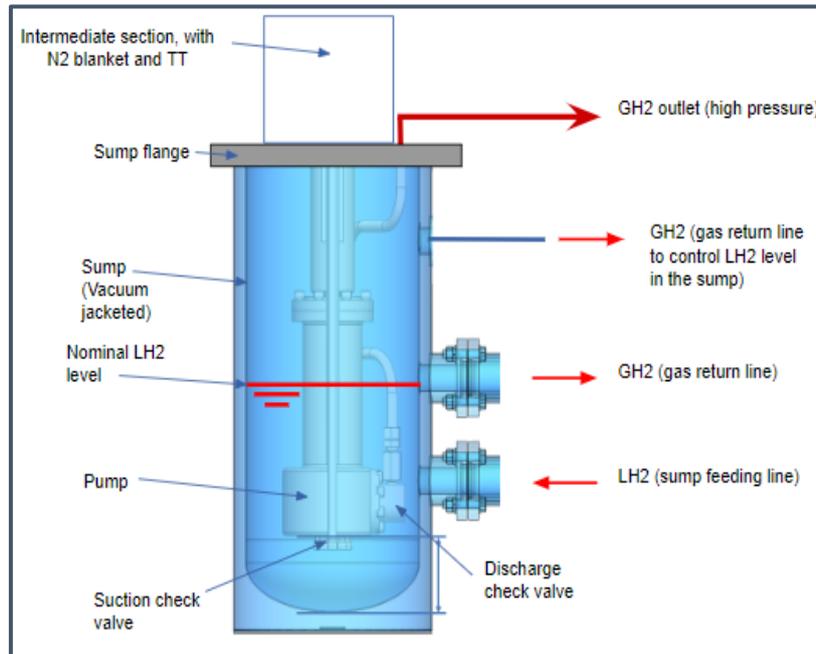


Abbildung 20. Pumpe im vakuumummantelten Sumpf.

3.5.3 LH₂-Verdampfer

Der Verdampfer in LHRS ist in Abbildung 21 dargestellt.

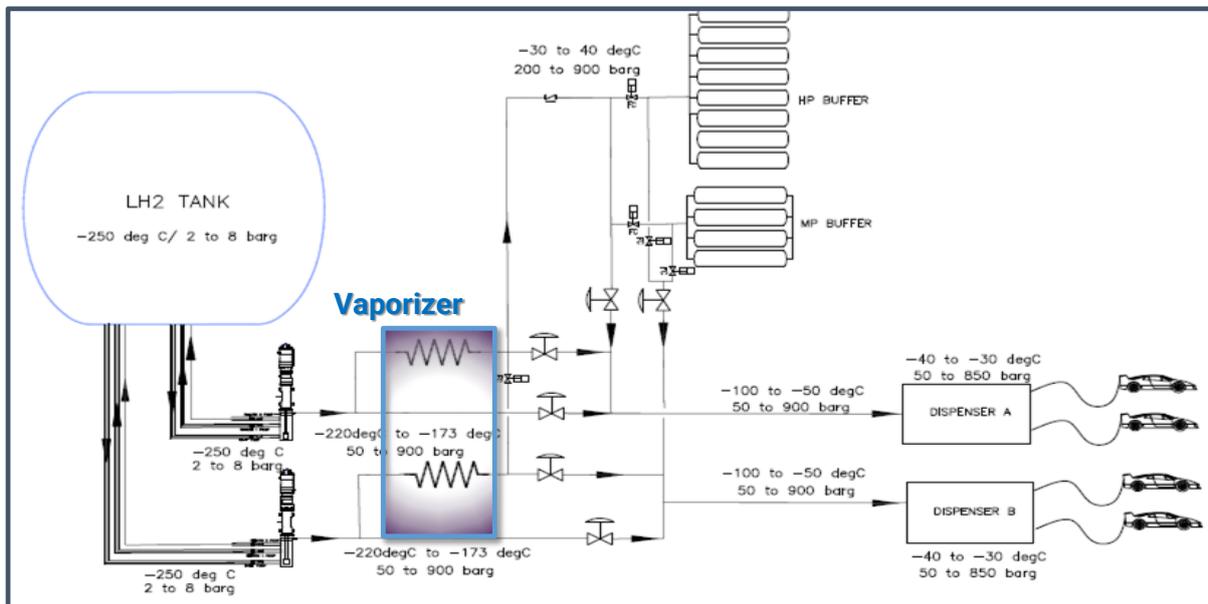


Abbildung 21. LH-basierten Tankstelle - Verdampfer.

Ziel des Verdampfers ist es, den Druck des gasförmigen Wasserstoffs zu erhöhen, der in Zwischenpuffern bei einem Druck von bis zu 900 bar gespeichert werden soll. Die Temperatur des Wasserstoffs wird ebenfalls von -220 auf -30°C erhöht.

Für diesen Wärmetauscher gibt es mehrere Technologien. Die wichtigsten sind:

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

- atmosphärischer Verdampfer,
- und Rohr-in-Rohr-Verdampfer.

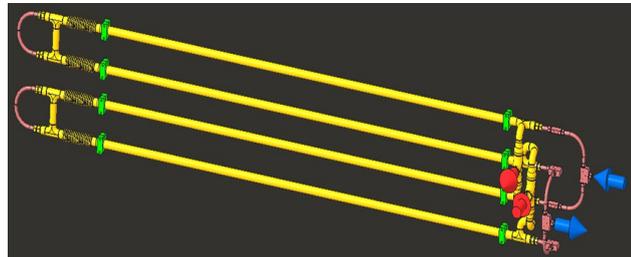
Der Rohr-in-Rohr-Verdampfer, wie in Abbildung 22 dargestellt, wird aus den folgenden Gründen für Tankstellen bevorzugt:

- einfach und leicht zu fertigen,
- kompakte Lösung im Vergleich zum atmosphärischen Verdampfer,
- keine Schaffung einer angereicherten O₂-Zone,
- geringer Stromverbrauch im Vergleich zu elektrischen Heizgeräten (8-mal weniger).

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur



(A)



(B)

Abbildung 22. (A) Rohr-in-Rohr-Wärmetauscher im LHR-Container, (B) Verdampfung des LH₂-Prinzips (blaue Pfeile).

3.5.4 Armaturenbrett

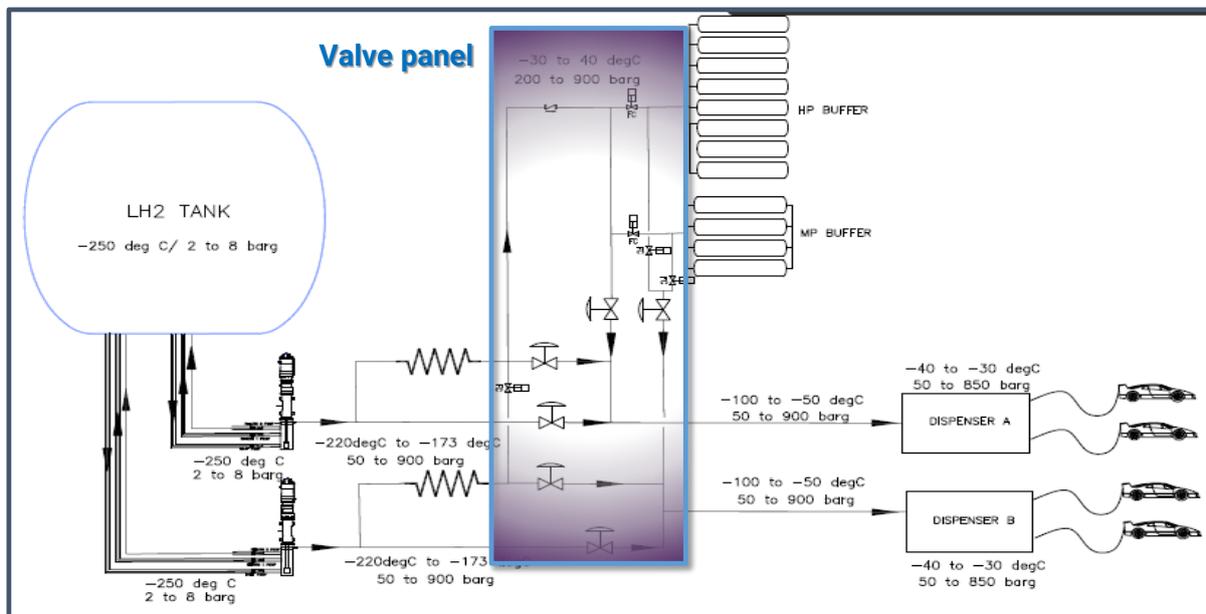


Abbildung 23. LH₂-basierten Tankstelle - Ventiltafel.

Die Ventiltafel in LHR-Container ist in Abbildung 23 dargestellt.

Abbildung 24 zeigt eine Ansicht der Ventiltafel. Dieser Teil des Prozesses ist recht einfach, stellt aber aufgrund der großen Anzahl von Anschlüssen für Ventile, Druckbegrenzer und andere für den Betrieb der Station erforderliche Geräte eine potenzielle Quelle für das Austreten von gasförmigem Wasserstoff dar.



Abbildung 24. Armaturenbrett.

In diesem Stadium ist der Wasserstoff gasförmig, und der Höchstdruck erreicht 900 bar.

3.5.5 Gasförmige Puffer

Die Gaspuffer im LHRS sind in Abbildung 25 dargestellt.

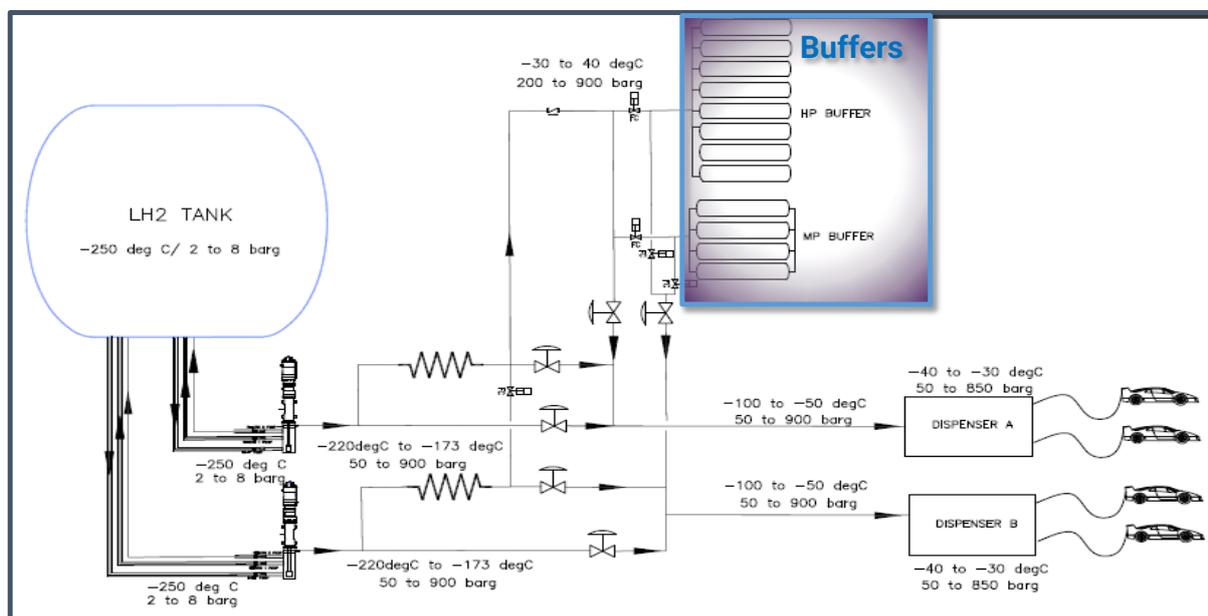


Abbildung 25. Prozessablauf einer LH2-Tankstelle - Gaspuffer.

Der maximal zulässige Betriebsdruck (MAWP) der Puffer beträgt 1000 bar (100 MPa). Es werden Typ-II-Flaschen aus Stahl und Kohlenstoff verwendet, die zur Verstärkung der mechanischen Festigkeit der Flaschen umwickelt sind. In der vorgestellten Stationskonfiguration haben die ausgewählten Zylinder ein Volumen von 123 l. Diese Zylinder

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

sind zu 4 in 3 Bündeln gepackt, wie in Abbildung 26 dargestellt, und in den Hauptrahmen integriert.

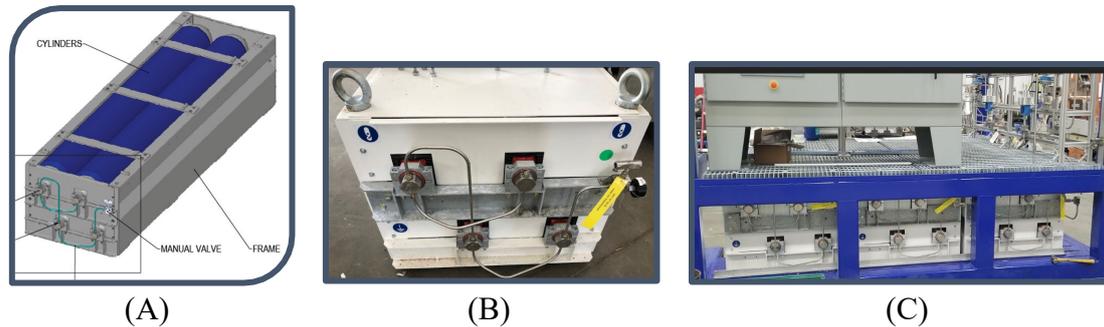


Abbildung 26. Hochdruckpuffer. (A) 4 Typ-II-Puffer in einem Bündel, (B) Verbindungen an den Pufferköpfen, (C) Integration der Bündel in das LHRS-Container.

Jedes Bündel hat ein Gewicht von 3 t. Die Puffer sind dank einer speziellen Isolierung brandgeschützt.

3.5.6 Verbindung zur Zapfsäule

Die Verbindung zur Zapfsäule im LHRS ist in Abbildung 27 dargestellt.

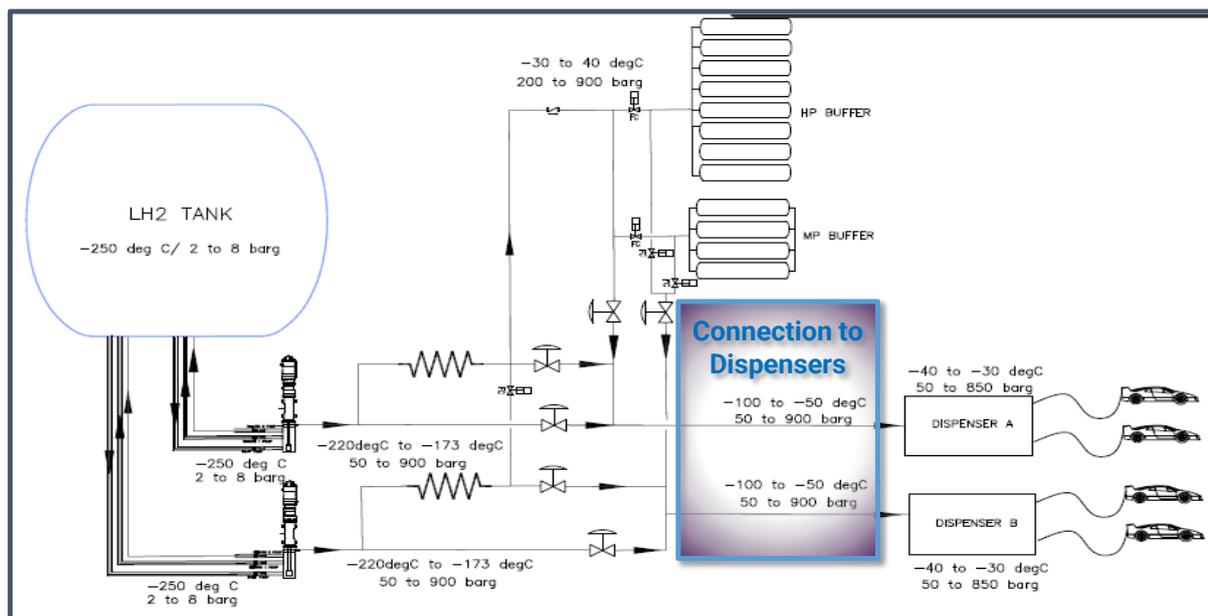


Abbildung 27. Prozessablauf einer LH_2 -basierten Tankstelle - Anschluss an Zapfsäule(n).

Die Leitungen können mehr als 60 m (200 ft) lang sein. Um eine erfolgreiche Betankung durchzuführen, müssen sie kalt gehalten werden. Um die Erwärmung zu bewältigen, wurde eine Crossover-Lösung gefunden, und es wurden spezifische intelligente Betankungsprozesse eingerichtet, die sich nach den Schwankungen der Auslastung der Tankstelle während des Tages richten.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

3.5.7 Zapfsäule

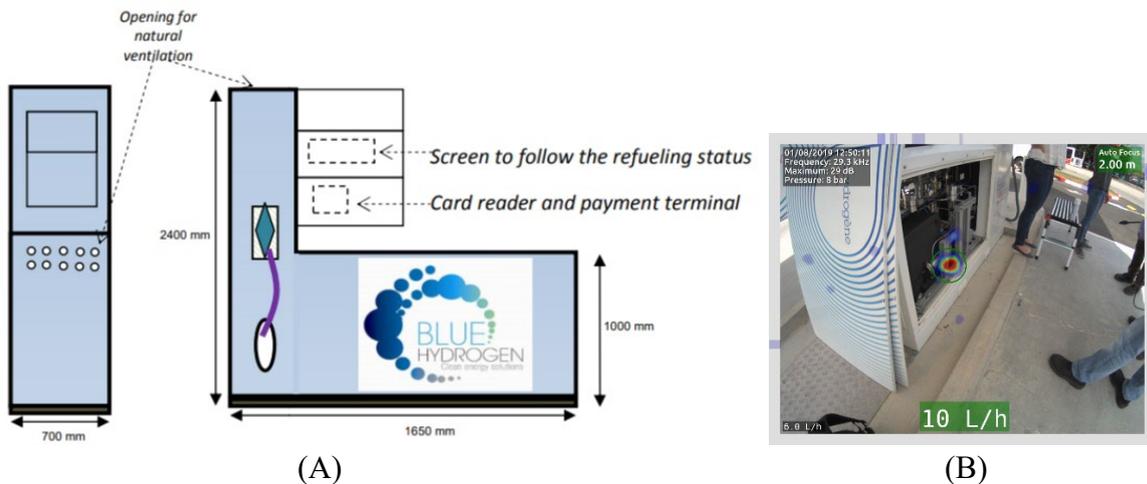


Abbildung 28. (A) Hauptelemente der Zapfsäule und ungefähre Abmessungen, (B) Ventilcontainer.

Die Zapfsäule ermöglicht eine schnelle, einfache und sichere Verbindung zwischen der Station und dem Fahrzeug, um die Betankung durchzuführen. Der Aufbau einer typischen Zapfsäule ist in Abbildung 28 dargestellt.

Die Zapfsäule besteht aus verschiedenen Unterbaugruppen:

- Verteilung: Säule mit Anzeige und Bedienelementen mit automatischem Füllventil, Zapfpistole und Abreißventil,
- Steuerung: HMI - Automatische Steuerung der Befüllung - Schalttafel - Zugangskontrolle.

Wie in Abbildung 29 dargestellt, lassen sich unter allen technischen Merkmalen der Zapfsäule die folgenden hervorheben:

- Die Betankung erfolgt automatisch und erfordert nur minimale Eingriffe durch den Kunden (Zapfpistole + Starttaste),
- Der Fahrzeuganschluss oder die Zapfpistole ist einfach zu bedienen und nach der Norm SAE J2600 zugelassen,
- Eine Abreißkupplung sorgt für eine mechanische Unterbrechung der Betankung, wenn das Fahrzeug von der Zapfsäule wegfährt, ohne die Zapfpistole zu entfernen,
- IR-Düse (konform mit SAE J2799) für 700-bar-Leitung.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur



(A)



(B)

Abbildung 29. (A) Ansicht des Doppelsenders, (B) Zapfpistole zum Nachfüllen.

Die Station ist in der Lage, an zwei Tankstellen gleichzeitig Wasserstoff in leichte Nutzfahrzeuge (2-10 kg) zu tanken.

Die Förderdrücke sind je nach Art des Senders unterschiedlich:

- 350 bar für Auto mit Range Extender,
- 700 bar für Brennstoffzellenfahrzeuge,
- 350 bar für Busse und Lkw.

Maximale Durchflussmengen sind:

- 60 g.s-1 für die Betankung von Fahrzeugen,
- und 120 g.s-1 für die Betankung von Bussen und Lastwagen bei 350 bar.

Die Liefertemperatur liegt zwischen -30°C und $+40^{\circ}\text{C}$ (Betankungsprotokoll: SAE J2601 H70 T40).

In Bezug auf die Sicherheit, sehr nah an der Zapfsäule oder im Inneren, sind:

- H_2 -Detektor im Inneren der Zapfsäule,
- Natürliche Belüftung der Zapfsäule,
- Flammenmelder in der Nähe der Zapfsäule,
- Tasten für die Notabschaltung.

4. Produktion

4.1 Methandampfreformierung

Bei der Dampf-Methan-Reformierung (SMR) werden Dampf und ein Katalysator verwendet, um aus einem leichten Kohlenwasserstoff wie Methan oder Propan Wasserstoff herzustellen (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31). Das Verfahren entzieht dem Kohlenwasserstoff den

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Wasserstoff und das Wasser, das für die Umwandlung des gesamten entstehenden Kohlenstoffs und Sauerstoffs in CO₂ notwendig ist.

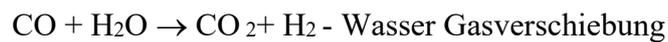


Abbildung 30. SMR-Anlage von Air Liquide.

Die beiden wichtigsten Schritte der Umwandlung sind folgende:



- Endotherme Reaktion: $\Delta H^\circ = + 206 \text{ kJ.mol}^{-1}$
- Katalytische Reaktion: Ni/Al₂O₃
- 20 - 30 bar, 900 - 1000°C, wenige Minuten



- Schwach exotherme Reaktion
- Katalytische Reaktion: CuO ; Fe₂O₃; Cr₂O₃
- 20 - 30 bar, 400°C (hohe Temperatur) / 200°C (niedrige Temperatur)

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

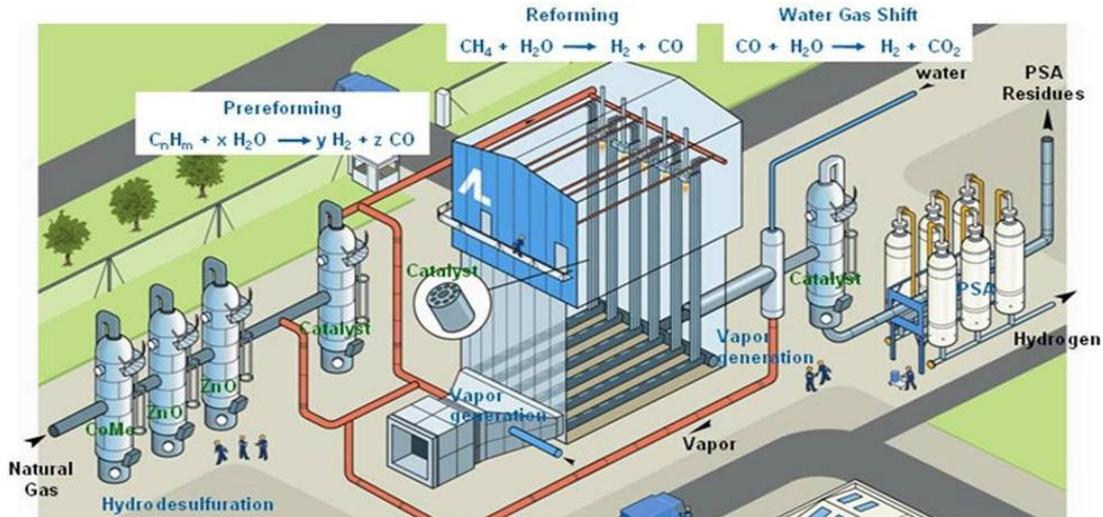


Abbildung 31. Skizze einer Methandampfreformierungsanlage.

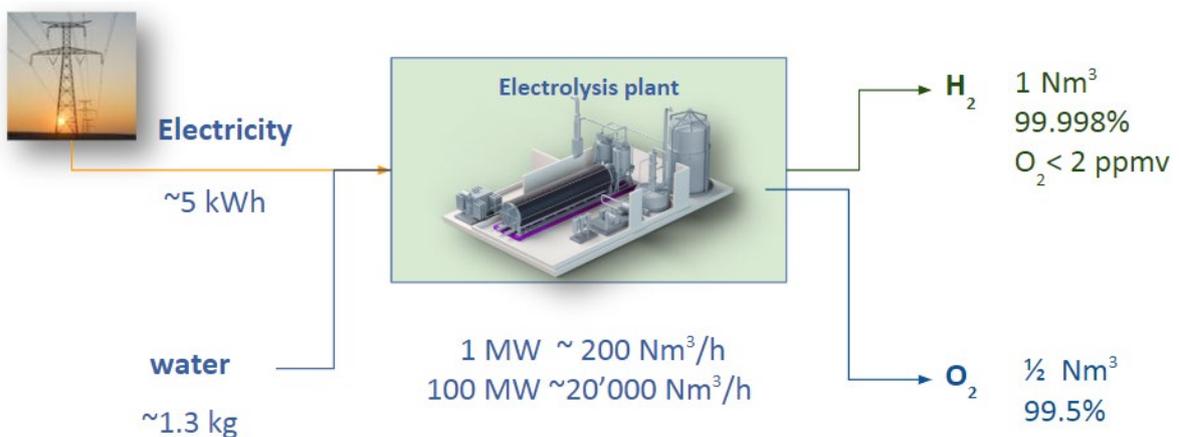
4.2 Elektrolyseur

Bei der Wasserelektrolyse werden die Wassermoleküle durch elektrischen Strom in ihre Bestandteile (H₂ und O₂) aufgespalten (siehe Abbildung 32).



Abbildung 32. Prinzip des Elektrolyseprozesses.

Abbildung 33 zeigt die folgende Skizze des Prozesses. Wasser wird durch Elektrizität gespalten, um Wasserstoff und Sauerstoff zu erzeugen. Die Reinheit des erzeugten Wasserstoffs ist extrem hoch.



Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Abbildung 33. Elektrolyse-System.

Es gibt mehrere Elektrolyse-Technologien mit unterschiedlichen Reifegraden (auch als Technology Readiness Level (TRL) bezeichnet):

- Protonenaustauschmembran-Elektrolyseur (PEM) - TRL 8
- Alkalischer Elektrolyseur - TRL 9
- Festoxid-Elektrolyseur - TRL 6

Die wichtigsten Elektrolyseur-Technologien sind jedoch alkalische, die flüssige Elektrolyte (Kalium- oder Natriumhydroxid) enthalten, und feste Polymerelektrolyte, z. B. PEM-Elektrolyseure. Die wichtigsten Reaktionen der verschiedenen Elektrolyseure sind in Abbildung 34 dargestellt.

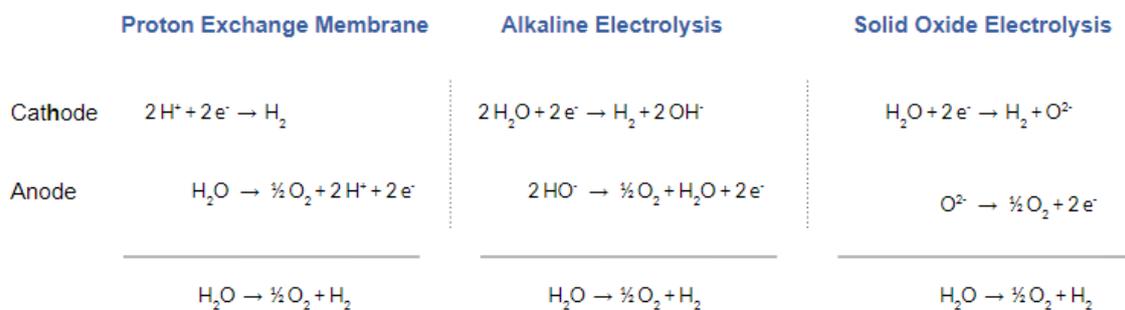


Abbildung 34. Hauptreaktionen je nach Elektrolyseverfahren.

Die wichtigsten Unterschiede zwischen diesen Technologien sind:

- Der Separator: Diaphragma oder Membran.
- Der Elektrolyt: flüssig, fest, sauer oder basisch.



Abbildung 35. Skizze des Elektrolyseur-Container von Hydrogenics.

Neben der Elektrolyseureinheit benötigt eine On-site-Station, die Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugt, Wasserreinigungssysteme und eine Wasserstoffreinigungs- und -trocknungseinheit zur Behandlung des erzeugten Wasserstoffs. Viele Elektrolyseure erzeugen Wasserstoff bei relativ niedrigem Druck, z. B. 10 bis 25 bar, so dass eine weitere Verdichtung erforderlich ist, um den Druck auf den Speicherdruck anzuheben.

4.3 Verflüssiger

Die Verflüssigung von Wasserstoff₂ ist ein sehr energieintensiver Prozess. Die für die Verflüssigung von Wasserstoff (im ortho-para-Gleichgewicht) erforderliche Mindestarbeit beträgt 3,92 kWh Strom/kg H₂ oder 0,12 kWh/kWh H₂. Typische Werte für den gesamten Prozess liegen jedoch im Bereich von 8 - 14 kWh/kg für relativ große Verflüssigungsanlagen. Die Verringerung des Energieverbrauchs von Verflüssigern ist ein aktives Entwicklungsthema für die LH₂-Industrie (siehe z. B. das IDEALHy FCH JU-Projekt (<https://www.idealhy.eu/>)).

Die meisten Anlagen (11) befinden sich in Nordamerika. In Europa werden Anlagen (3) in Frankreich (siehe Abbildung 36), den Niederlanden und Deutschland mit einer Gesamtkapazität von 19 t/Tag⁻¹ betrieben. Die größte Anlage hat derzeit eine Kapazität von 68 t/d (New Orleans, USA). Der jüngste (2017) in Betrieb genommene Verflüssiger (10 t/Tag⁻¹) befindet sich im Besitz von Airgas (jetzt Air Liquide) in Calvert City.

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur



Abbildung 36. Air Liquide LH₂-Tankstellen
(links: Little Town, USA; rechts: Becancour, Kanada).

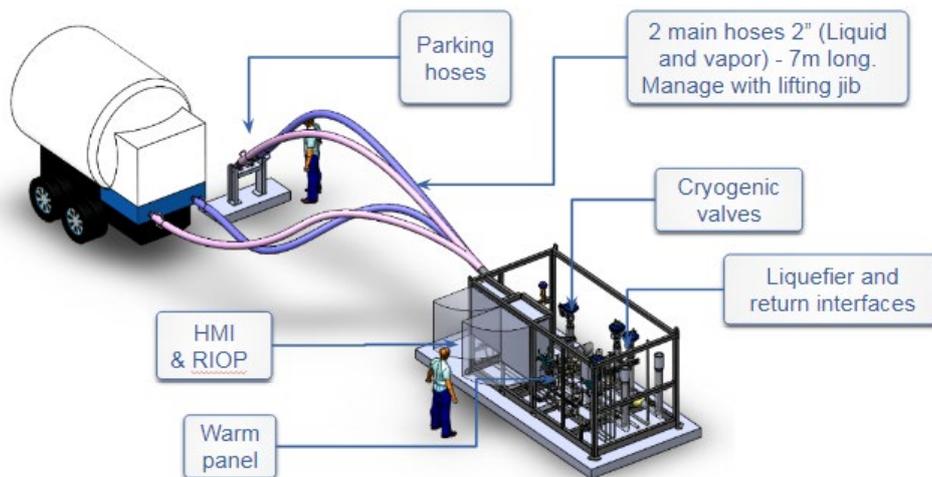


Abbildung 37. Allgemeine Ergonomie der Laderampe für die Befüllung von LH₂-Anhängern.

Abbildung 37 zeigt die Ergonomie der LH₂-Anhängerbefüllung. Für den Transfer von LH₂ von einem Lager zu einem anderen (z. B. von einem großen Lager zu einem LKW oder von einem Anhänger zu einem Lager am Einsatzort) gibt es zwei Methoden:

- Druckaufbau (natürlicher Druckaufbau oder freiwillige Verdampfung von LH₂ über einen kleinen externen Wärmetauscher). Dadurch wird der Druck im "Mutterspeicher" höher als der Druck im "Tochterspeicher" und der LH₂-Transfer ist einfach. Die Hauptnachteile dieser Methode sind eine lange Betriebszeit und ein Anstieg des Drucks im "Mutterspeicher", der irgendwann eine Druckentlüftung erforderlich macht;
- Pumpen im "Mutterspeicher" unter Verwendung einer geeigneten Transfer-Kryo-Kreiselpumpe. Die Hauptnachteile dieser Methode sind die Kosten für die Pumpe und die Notwendigkeit einer häufigen Wartung der Pumpe, vor allem aufgrund von Kavitation (niedriger verfügbarer NPSH-Wert - Net Positive Suction Head: Differenz zwischen Flüssigkeitsdruck und Sättigungsdampfdruck der betreffenden Verbindung - aufgrund der geringen Dichte von LH₂).

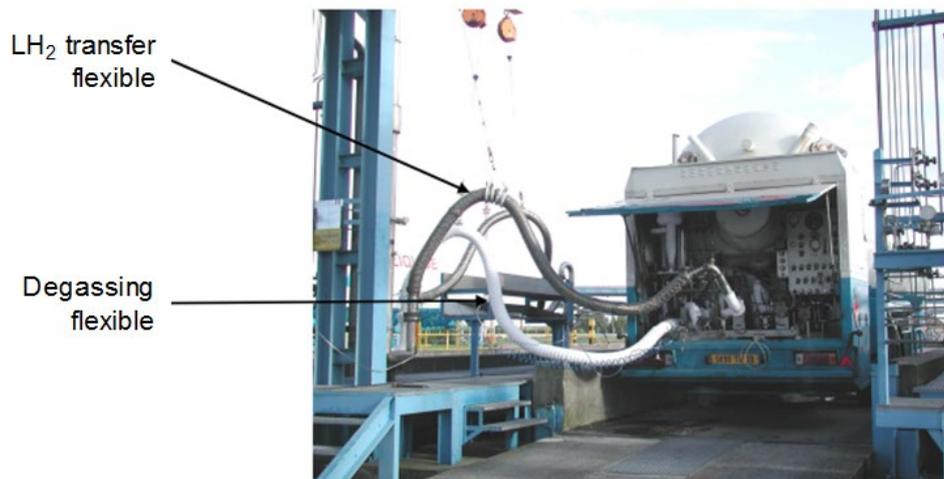


Abbildung 38. LH₂-Anhänger während der Überführung.

5. Pipelines

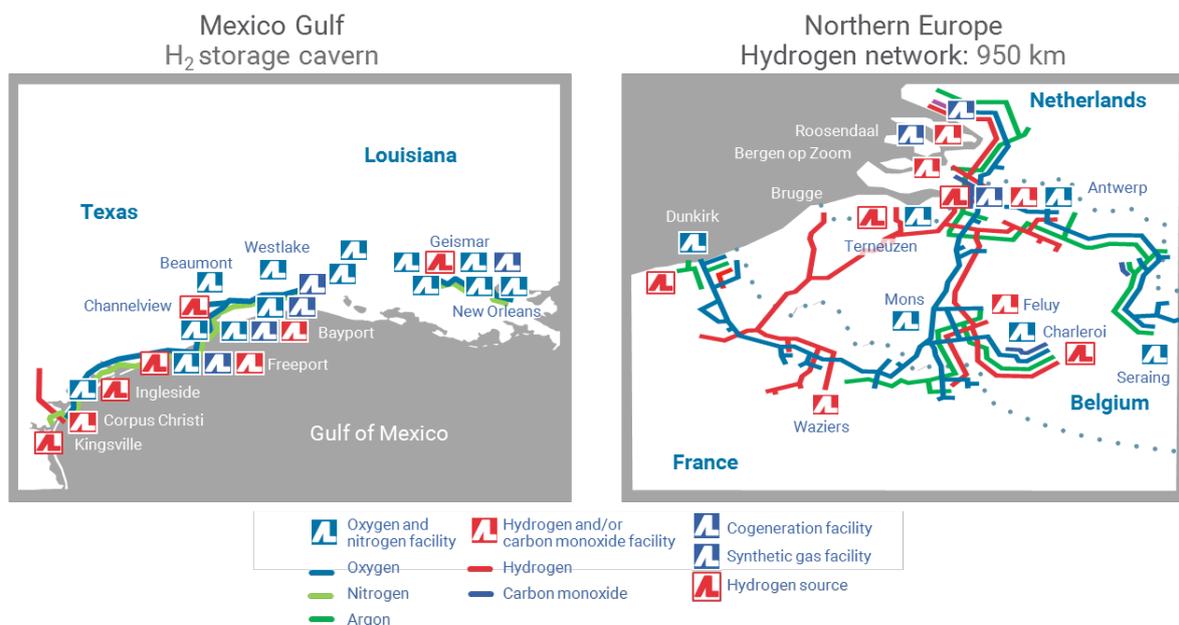


Abbildung 39. Wasserstoffquellen und -netz von Air Liquide.

Pipelines werden verwendet, um gasförmige Verbindungen in großen Mengen zu transportieren. Je nach den Eigenschaften des beförderten Gases und den Anforderungen der Kunden kann der Druck in den Pipelines variieren. Beim Wasserstofftransport kann der Druck in den Pipelines bis zu 100 bar betragen. Abbildung 39 zeigt das Pipelinetz und die Produktionsanlagen von Air Liquide für Wasserstoff, Synthesegas und andere Gase in den USA und Nordeuropa.

Wie in Abbildung 39 dargestellt, werden diese Rohrleitungen relativ nahe an den Produktionsanlagen verlegt. Je nach der Entfernung zwischen der Produktionsanlage und dem Kunden können im Pipelinetz Druckstationen erforderlich sein, um den angestrebten Druck

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

in der Pipeline aufrechtzuerhalten. Es ist wichtig zu beachten, dass nur sehr wenige Stationen direkt durch Rohrleitungen verbunden sind. Anhänger sind das Hauptmittel. In einigen Fällen kann eine Produktion vor Ort interessant sein.

6. Sicherheitsmerkmale in HRS und anderen Infrastrukturen

(was/wo/wozu/normaler und abnormaler (Notfall-) Betrieb/ zu tun - zu vermeiden während der Intervention)

Tabelle 3. Sicherheitsmerkmale für Elektrolyseure.

Was	Wo	Wofür
Prozessüberwachung (Druck, Temperatur)	Allgemein	Erkennen von Lecks und Funktionsstörungen
ATEX-zertifizierte Ausrüstung	Im Container, einem engen Raum, in dem Lecks auftreten können	Vermeiden Sie Zündquellen
H ₂ -Erkennung	Im Inneren des Container	Aktivieren Sie bei Bedarf Warn- und Absperrventile für den Fall einer unbeabsichtigten Leckage.
Flammenmelder (UV/IR)	Außerhalb des Containers	Aktivieren Sie bei Bedarf Warn- und Absperrventile im Falle einer unbeabsichtigten entzündeten Freisetzung.

Tabelle 4. Sicherheitsmerkmale für Anhänger mit gasförmigem Wasserstoff.

Was	Wo	Wofür
Absperrventile	Zylinder	Laut ADR sind alle Lager während des Transports durch ein Ventil getrennt.
TPRD	Speziell bei Anhängern mit Zylindern des Typs IV Befindet sich auf dem Dach des Anhängers und ist nach oben gerichtet	Vermeiden Sie den Druckerhöhung und das Bersten der Flasche im Falle eines Brandes NB: nicht obligatorisch, aber bei einigen Großraumanhängern mit Zylindern des Typs IV vorhanden
Dichtheitsprüfung	Lagerung von Anhängern	Vermeiden Sie größere Leckagen nach der Betankung des Anhängers

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Tabelle 5. Sicherheitsmerkmale für Wasserstoff-Hochdruckleitungen.

Was	Wo	Wofür
Überwachung des Drucks	Pipeline	Aufspüren größerer Lecks im Netzwerk
Regelmäßige Kontrolle	Pipeline	Erkennen Sie Beschichtungsfehler und vermeiden Sie größere Lecks
Kathodischer Schutz	Pipeline	Rohrleitungskorrosion vermeiden

Tabelle 6. Sicherheitsmerkmale für gasförmiges HRS.

Was	Wo	Wofür
Qualifizierte und validierte Schläuche und Armaturen	Prozess und Zapfsäule	Vermeiden Sie versehentliches Auslaufen
Regelmäßiger Austausch des Schlauches	Zapfsäule	Vermeiden Sie versehentliches Auslaufen
H ₂ -Erkennung	Innerhalb des Prozesscontainers Im Inneren der Zapfsäule	Aktivieren Sie bei Bedarf Warn- und Absperrventile für den Fall einer unbeabsichtigten Leckage.
Flammenmelder (UV/IR)	Im Prozessbehälter Draußen, in der Nähe des Automaten	Aktivieren Sie bei Bedarf Warn- und Absperrventile im Falle einer unbeabsichtigten entzündeten Freisetzung.
Automatisches Absperrventil	Mehrere zwischen H ₂ -Lager und Zapfsäulen	Begrenzung des H ₂ -Bestands im Falle einer unbeabsichtigten Freisetzung
Überwachung des Prozessdrucks	Allgemein	Erkennen von abnormalem Druckabfall aufgrund von Leckagen oder Rohrleitungsbrüchen
Natürlich belüftete geschlossene Räume	Prozessbehälter Zapfsäule	Das Erreichen der Entflammbarkeitsgrenzen des H ₂ -Luft-Gemisches bei unbeabsichtigter Freisetzung ist zu vermeiden.
Zwangs- Belüftung	Prozessbehälter für einige Modelle	Vermeiden Sie das Erreichen der Entflammbarkeitsgrenzen des H ₂ -Luft-Gemischs im Falle einer unbeabsichtigten Freisetzung, wenn eine natürliche Belüftung nicht möglich oder nicht wirksam genug ist.
ATEX-zertifizierte Ausrüstung	In engen Räumen, in denen Lecks auftreten können (z. B. Container und Zapfsäule)	Vermeiden Sie Zündquellen
Schlauch geerdet	Zapfsäule	Verhinderung von Funkenbildung durch statische Elektrizität beim Tanken

Lektion 12: Wasserstofftankstellen und Infrastruktur

Automatische Dichtheitsprüfung vor dem Befüllen	Allgemein	Vermeiden Sie versehentliches Auslaufen
Durchflussbegrenzer	Allgemein	Begrenzung des Durchflusses im Falle einer Freisetzung oder eines Rohrbruchs
Automatische Schließzeit	Allgemein	Schließen Sie die H ₂ -Zufuhrventile bei Schlauchbruch oder Leckage
Schlauch-Abreißvorrichtung	Zapfsäule	Vermeiden Sie ein größeres Leck, indem Sie die Einspeisung flexibel verschließen, falls sie reißen sollte, weil Sie vergessen haben, das Fahrzeug abzukoppeln.
Anfahrerschutz (Poller)	Zapfsäule	Schützen Sie die Zapfsäule vor größeren mechanischen Angriffen durch Fahrzeuge, die versehentlich eindringen, und vermeiden Sie katastrophale Lecks.
Notausschlag	Wenige Meter von der Zapfsäule entfernt	Im Notfall H ₂ -Zufuhrventile schließen
Leitfähige (geerdete) Betonplatte	Zapfsäule	Verhinderung von Funkenbildung durch statische Elektrizität beim Tanken

Tabelle 7. Sicherheitsmerkmale für Flüssigwasserstoff-Anhänger.

Was	Wo	Wofür
Zwei Sicherheitsventile mit mindestens einer Pneumatik	Tank	Laut ADR sind alle Lager während des Transports durch ein Ventil getrennt.
Sicherheitsventil für den Straßenverkehr	Tank	Überdruck ablassen
Berstscheibe	Tank	Vermeiden Sie das Bersten des Speichers bei einem Druckanstieg
PRD	Tank	Begrenzung des Risikos des Abkochens

Tabelle 8. Sicherheitsmerkmale für Flüssigwasserstoffspeicher.

Was	Wo	Wofür
Druck- und Temperaturüberwachung	Tank	Isolationsvorgaben erkennen
Überwachung des Füllstands	Tank	Vermeiden Sie Überfüllung
Berstscheibe	Tank	Vermeiden Sie ein Bersten des Speichers bei Druckanstieg
PRD	Tank	Begrenzung des Risikos des Abkochens

Danksagung

Das HyResponse-Projekt wird anerkannt, da die hier vorgestellten Materialien auf der Grundlage der ursprünglichen HyResponse-Vorlesungen erweitert wurden.

Referenzen

1. Hydrogen refueling station analysis model (HRSAM). Argonne National Laboratory. <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hdsam> [access on 26.05.2021]
2. Gaseous hydrogen – Fuelling stations. Part 1: General requirements. BSI Standards Publication. BS ISO 19880-1: 2020.
3. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 2017; 42:21855-21865.
4. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2017; 42:16675-16685.
5. SAE (Society of Automotive Engineers). Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles. *Surface Vehicle Standard. J2601*. July 2014.
6. Elgowainy A, Reddi K, Sutherland E, Joseck F. Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. *Int J Hydrogen Energy* 2014; 39:20197-20206.
7. NIST (National Institute of Standards and Technology). Thermophysical properties of fluid systems. 2016. Retrieved from: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. [Accessed 26 May 2021].