



HySkills KA2 IO2 - Trainingskurs über Wasserstofftransport und -lieferung

IO2.6 - TRANSPORT UND LIEFERUNG VON WASSERSTOFF

In dieser Schulung werden die Teilnehmer in die Lage versetzt, die Theorie der Transport- und Liefermöglichkeiten von Wasserstoff zu verstehen. Darüber hinaus konzentriert sich dieses Modul auf die Arten von Kompressoren, die für den Transport von Wasserstoff verwendet werden, sowie auf die Materialauswahl für Wasserstoffleitungen.



Inhalt

Tabelle der Abbildungen	4
1 Wasserstoff-Speichersysteme	5
1.1 Wie wird Wasserstoff transportiert?.....	5
1.2 Arten von Wasserstoffspeichersystemen.....	8
1.2.1 Abkehr von fossilen Brennstoffen	10
1.3 Flüssigwasserstoff (LH)₂.....	13
1.4 Kryotanks für Flüssigwasserstoff (LH)₂	14
1.5 Komprimierter Wasserstoff	18
1.6 Verbundtanks für komprimierten Wasserstoff.....	19
1.7 Metallhydridspeicher	20
2 Materialien für den Rohrleitungsbau	22
2.1 Warum Polyethylen?.....	22
2.2 PE80 gegen PE100?	22
3 Wasserstoff-Kompressoren.....	24
3.1 Zentrifugalkompressor	24
3.2 Rotationskompressor	25
3.3 Hubkolbenkompressor	26
3.4 Ionen-Kompressor.....	27
4 Einschlägige Vorschriften und Normen:.....	32
4.1 Internationale Wasserstoffnormen.....	32
4.1.1 Wasserstofftechnologien.....	33
4.1.2 Lagerschiffe	34
4.1.3 Normen für alle Armaturentypen	34
4.1.4 Anwendungen von Druckbegrenzungsventilen:	35



5	Sicheres Verfahren zur Lieferung von gasförmigem Wasserstoff.....	36
5.1	Sicherheitscheckliste für gasförmigen Wasserstoff.....	41
6	Sichere Lieferung von Flüssigwasserstoff	42
6.1	Sicherheitscheckliste für Flüssigwasserstoff.....	49
7	Referenzen	50



Tabelle der Abbildungen

Abbildung 1: Großer Kastenwagen.	9
Abbildung 2: Wasserverteiler mit oben abgebildeter Wasserspenderflasche.	9
Abbildung 3: Flüssigwasserstoff-Speichersystem [2].	14
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines kryogenen Wasserstofftanks. Angepasst aus [3].	16
Abbildung 5: Linde-Video über den sicheren Umgang mit Wasserstoff.	17
Abbildung 6: Video von Chart Industries über Kryotechnik.....	17
Abbildung 7: Allgemeines Blockdiagramm für Druckgas-Wasserstoff (CH ₂) [2].	18
Abbildung 8: Wasserstoff-Verbundtank. Abbildung übernommen aus [4].	20
Abbildung 9: Das Speichermodul von GKN Powder Metallurgy besteht aus acht separat gesteuerten Speichertanks und kann 133 kWh Strom speichern [5].	22
Abbildung 10: Eine Probe von 4-Zoll-HDPE-Rohren mit einem SDR-Wert von 17, 11 bzw. 9 und der zugehörigen Wandstärke. Angepasst aus [11].	24
Abbildung 11: Prinzip eines Zentrifugalverdichters und der zugehörigen Teile. Angepasst aus [14].	25
Abbildung 12: Prinzip eines Rotationsverdichters und der zugehörigen Teile. Angepasst aus [15].	26
Abbildung 13: Schema eines Hubkolbenverdichters mit den dazugehörigen Teilen: 1) Ansaugbereich des Verdichters, 2) Arbeitsbereich, 3) Druckbereich, 4) Kolben. Angepasst aus [16].	27
Abbildung 14: Überblick über die großtechnische Speicherung von gasförmigem Wasserstoff unter Druck. Angepasst aus [17].	28
Abbildung 15: Druckbedarf für verschiedene Methoden der Verteilung von gasförmigem Wasserstoff unter Druck. Angepasst aus [17].	29
Abbildung 16: Transport von flüssigem Wasserstoff in einem isolierten Tank.	48



BEGINN VON BLOCK 1

1 Wasserstoff-Speichersysteme

1.1 Wie wird Wasserstoff transportiert?

Die in- und ausländischen Anbieter von Wasserstoff nutzen derzeit Straßen oder Pipelines, um Wasserstoff zu transportieren. Konventionell geschieht dies mit Tube-Trailern oder kryogenen Flüssigwasserstoff-Tankwagen. Andere, weniger konventionelle Transportmöglichkeiten sind chemische Träger. Dabei handelt es sich um wasserstoffreiche Kraftstoffe, d. h. chemische Verbindungen mit einem hohen Anteil an Wasserstoffatomen wie Ammoniak, Methanol, Ethanol (NH_3 , CH_3OH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) usw. Es gibt auch Berichte über den Transport von Wasserstoff mit Luftkissenbooten in besonderen Fällen.

Der Wasserstofftransport über integrierte Pipelines ist die kostengünstigste Möglichkeit, große Mengen Wasserstoffgas zu transportieren, und weltweit wurden bereits mehrere Pipelines gebaut, um dies zu ermöglichen. In jüngster Zeit hat die Regierung den Ausbau von Wasserstoffpipelines stark vorangetrieben und sich dafür eingesetzt. Mit dieser Infrastruktur sollte es möglich sein, Wasserstoff überallhin zu liefern.

Früher wurden die Leitungen in der Nähe von Erdölraffinerien oder Chemiewerken gebaut. Jetzt liegt der Schwerpunkt jedoch eher auf Erdgas und speziellen Wasserstoffgasleitungen.

Im Gegensatz dazu kann Wasserstoffgas auch komprimiert und mit Schlauchanhängern über die bestehende Straßeninfrastruktur transportiert werden. Diese Möglichkeit wird genutzt, um geringe Mengen Wasserstoff auf einmal über eine im Vergleich zu Gaspipelines relativ kurze Strecke zu transportieren. Bei einer Entfernung von mehr als 200 Meilen vom Produktionsort ist diese Option für viele Unternehmen und Lieferanten in der Regel nicht rentabel.



FIGURE 34

Comparison of hydrogen transport options over various distances

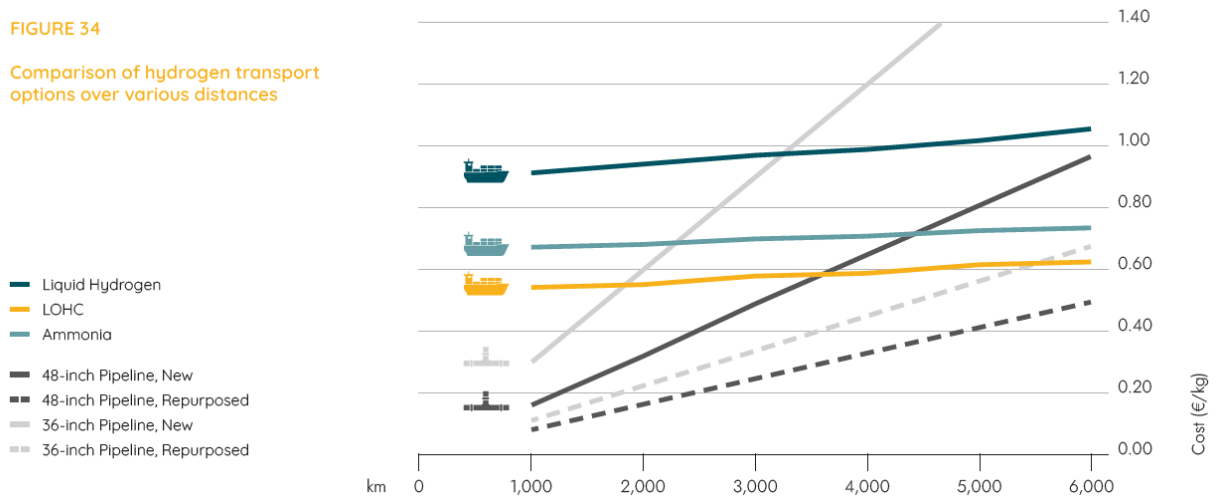




FIGURE 35

Map of example routes to compare
shipping and pipelines as hydrogen
transport methods

For imports from
(1) North Africa to Northern Europe and
(2) Saudi Arabia to Southeast Europe)



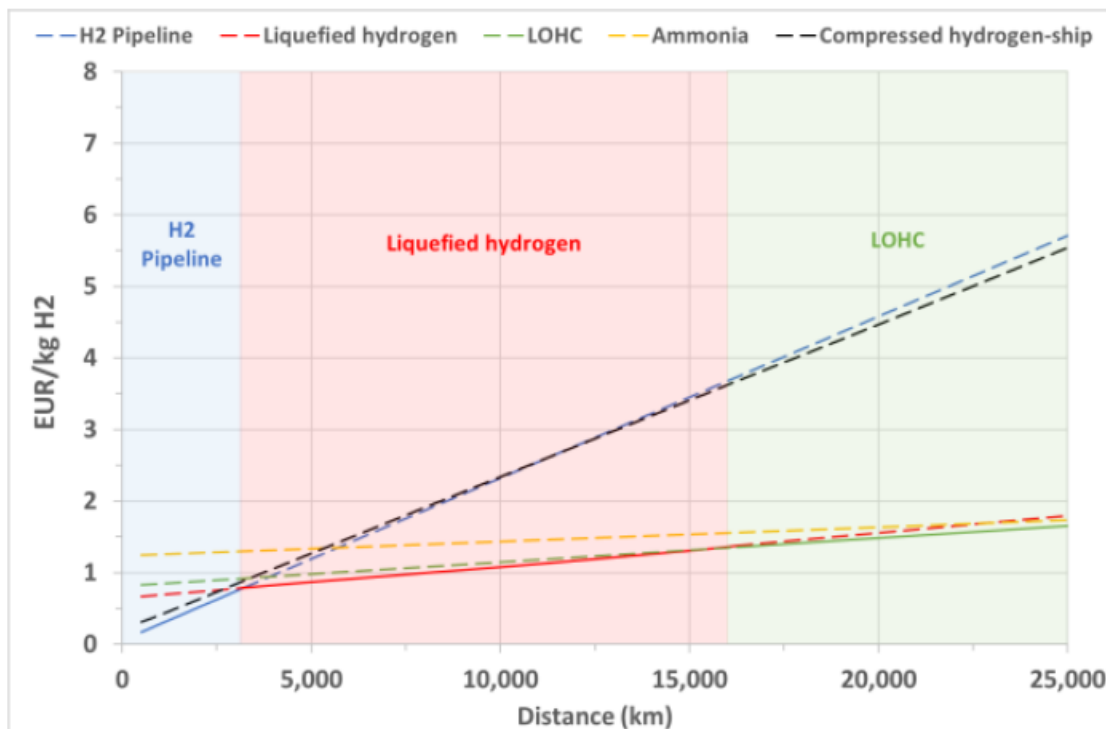


Figure 2 Hydrogen delivery costs for a simple (point to point) transport route, for 1 Mt H₂ and low electricity cost scenario.

1.2 Arten von Wasserstoffspeichersystemen

Wenn Wasserstoff als Gas an der Oberfläche gespeichert wird, sind sehr große Speichertanks erforderlich, die mit einem hohen Druck von bis zu 300 bar betrieben werden. Wasserstoff kann auch unterirdisch in Kavernen, Salzstöcken und erschöpften Öl-/Gasfeldern gespeichert werden. Flüssiger Wasserstoff benötigt weniger Volumen, aber der Verflüssigungsprozess ist kostspielig und wegen der erforderlichen außergewöhnlich niedrigen Temperatur gefährlicher zu handhaben. Es werden Metallhydridtanksysteme entwickelt, die Wasserstoff mit einer ähnlichen Dichte wie Flüssigwasserstoff speichern können, aber sie befinden sich noch in der Entwicklung.

Zur Veranschaulichung: Ein Kilogramm Wasserstoff hat bei NTP (Normaltemperatur und -druck oder 1 atm, 20°C) ein Volumen von 12 Kubikmetern und würde den Laderaum eines großen Kastenwagens ausfüllen und hat das Energieäquivalent von einer Gallone Benzin oder 33 kWh.



Abbildung 1: Großer Kastenwagen.

Wird der Wasserstoff auf 100 Bar komprimiert, verringert sich das Volumen auf 130 Liter, was der Größe eines normalen Warmwasserspeichers entspricht. Bei 700 Bar, dem Betriebsdruck eines Wasserstofffahrzeugs, reduziert sich das Volumen auf 26 Liter. Die beiden Wasserstofftanks des Toyota Mirai fassen zusammen 122 Liter und haben ein Gesamtgewicht von 87,5 kg und eine Kapazität von 5 kg.



Abbildung 2: Wasserverteiler mit oben abgebildeter Wasserspenderflasche.

Das Flüssigkeitsvolumen von 1 kg Wasserstoff beträgt 15 Liter bei 1 Bar und -252 °C , was dem Volumen einer typischen Wasserkühlflasche entspricht. Für die Speicherung desselben Wasserstoffs in Metallhydrid werden 17 Liter bei 33 Bar und 20 °C benötigt.



1.2.1 Abkehr von fossilen Brennstoffen

Es besteht die Notwendigkeit, qualifiziertes und erfahrenes Personal aus der fossilen Brennstoffindustrie für die Wasserstoffwirtschaft umzuschulen. Außerdem ist die Öffentlichkeit mit fossilen Brennstoffen vertraut, und es ist sinnvoll, mit den entscheidenden Unterschieden in den Eigenschaften von Erdgas und Wasserstoffgas sowie von Flüssigerdgas (LNG) und verflüssigtem Wasserstoff (LH₂) zu beginnen.

Die Auswahl der Speichermaterialien unterscheidet sich von Erdgas. In Wasserstoffsystemen besteht die Gefahr der Versprödung von Materialien, der Wasserstoffpermeation, extrem niedriger Temperaturen und der Möglichkeit elektrostatischer Aufladung und Entladung. Der höhere Druck, unter dem Wasserstoff gespeichert wird, bedeutet, dass die Geschwindigkeit des Wasserstoffstroms groß ist und die daraus resultierenden Stöße und Reibungen zu elektrostatischen Aufladungen auf nicht geerdeten oder isolierten Materialien führen können. Solche "Ladungssammler" können sich entladen und eine Zündquelle für Wasserstoff darstellen [1].

Zu den sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Wasserstoff für die Wasserstoffspeicherung gehören seine geringe Dichte, seine niedrige Zündenergie, sein breiter Entflammbarkeitsbereich und seine potenzielle Explosivität. Tabelle 1 fasst die sicherheitskritischen Eigenschaften von Wasserstoff zusammen und vergleicht sie mit denen von Methan, wobei die Auswirkungen auf die Sicherheit hervorgehoben werden.



Tabelle 1: Vergleich der sicherheitstechnischen Eigenschaften von Wasserstoff und Methan [2].

Property	Hydrogen	Methane	Consequences for hydrogen safety
Gas density at NTP	0.0827 kg/m ³	0.659 kg/m ³	Can be positive for outdoor dispersion due to buoyancy, but only for passive clouds. High-pressure jet dispersion is dominated by momentum not buoyancy. Also negative because LFL may extend further for hydrogen jet than for methane.
Flammability range (25 °C, 101.3 kPa)	4–75 vol%	5–17 vol%	Negative, causing larger flammable cloud volume. LFL = 4% only for upward propagating H ₂ flames, 8% is the lean limit of hydrogen combustion for practical applications.
Autoignition temperature	585 °C	537 °C	Neutral.
Minimum ignition energy	0.017 mJ	0.27 mJ	Negative. The ignition energy varies significantly with gas concentration (see Figure 4.1). For hydrogen concentrations up to 60%, the ignition energy is less than that of methane, with the absolute minimum being more than an order of magnitude less.
Boiling point	-253 °C	-161 °C	More challenging than CH ₄ . LH ₂ can condense oxygen in air and cause unknown effects due to concentrated oxygen. Cryogenic effects different from LNG.
Amount of energy, heat of combustion (lower heating value)	120 kJ/g	50 kJ/g	For high-pressure gas releases at the same pressure and through the same hole size, the energy released for hydrogen is about 85% of that for methane.
Maximum burning velocity in NTP air (cm/s)	265–325	37–45	Negative. Results in much greater flame acceleration in congested areas and higher pressures in confined spaces due to the greater difficulty in venting the explosion fast enough. Rapid flame acceleration will give high explosion pressures in small clouds.
Detonability measured in minimum mass of tetryl (Bull, 1979)	0.8 g	16 000 g	Negative. Given greater flame acceleration with hydrogen (see above), DDT is a realistic if unlikely possibility. This is not the case for methane. A hydrogen detonation can propagate through the full cloud and increase the explosion severity significantly.
Laminar diffusion coefficient at NTP (cm²/s)	0.61	0.16	Negligible effect on dispersion which is dominated by turbulent diffusion. Other effects are more important, such as flow speed and low density causing longer momentum jets.
Speed of sound at NTP (m/s)	1 294	446	Negative, contributes to larger volumetric flowrates from leaks. Hydrogen has higher speed of sound and lower density. These cancel each other out, resulting in similar jet momentum for releases with the same pressure and hole size.
Compressibility factor Z average 0 to 300 barg	01. Jan	0.9	Minor effect of non-ideal gas. Causes a reduced mass leak rate for H ₂ compared to using ideal gas law. For higher pressure, real gas effects are larger.
Joule-Thomson effect when pressure is relieved	Causes a small temperature increase	Causes a temperature decrease	Negligible since the temperature increase effect on hydrogen is only a few Kelvins. Requirement to limit CH ₄ temperature in storage tanks restricts filling rates (relevant for CH ₄ bunkering).
Adiabatic flame temperature	2 045 °C	1 875 °C	Hydrogen flames can be hotter.
Heat radiated from flame to surroundings	17–25%	23–33%	These ranges are indicative and vary with release rate. Smaller hydrogen flames are invisible. At large release rates, a hydrogen fire can have the same radiation level as methane. There is very limited large-scale hydrogen data.

Comments give positive or negative safety effects for hydrogen compared with methane or natural gas systems. (NTP = Normal Temperature and Pressure, 20 °C and 101.3 kPa.)



Die Dichte von Wasserstoffgas ist mit $0,083 \text{ kg/m}^3$ um eine Größenordnung leichter als die von Luft mit $1,204 \text{ kg/m}^3$. Der hohe Auftrieb von Wasserstoff kann sowohl ein Vorteil als auch eine Gefahr sein und muss bei der Konstruktion von Wasserstoffsystemen berücksichtigt werden. Aufgrund der geringeren Dichte von Wasserstoff wird sich ein im Freien freigesetztes Wasserstoffgas schnell ausbreiten. Bei einem Strahl mit hohem Impuls und einer Freisetzungsrate über einem bestimmten Wert wird das Gas jedoch durch seinen Impuls und nicht durch den Auftrieb angetrieben - unter diesen Bedingungen kann es eine große Gaswolke bilden, ähnlich wie bei einem Erdgasleck. Dieser Impulseeffekt ist auch in geschlossenen Räumen von Bedeutung, wo sich eine Gaswolke an allen Stellen bilden kann, bevor sie sich nach oben zur Decke bewegt.

Ein stöchiometrisches Gemisch ist ein Gemisch, bei dem die Brennstoffmenge mit der genauen Menge an Sauerstoff übereinstimmt, die für eine vollständige Verbrennung mit maximaler Verbrennungsenergie erforderlich ist. Ein stöchiometrisches Wasserstoff-Luft-Gemisch enthält 29,5 (Vol)% Wasserstoff, während es bei Erdgas 10 (Vol)% sind. Obwohl Wasserstoff somit eine größere Leckrate als Erdgas erfordert, sorgt der höhere Druck, unter dem Wasserstoff gespeichert wird, für hohe Leckraten. Außerdem hat Wasserstoff bei gleicher Lochgröße aufgrund seiner geringen Viskosität und kleinen Molekülgröße einen dreimal so großen Volumenstrom wie Erdgas. Aufgrund des breiten Entflammbarkeitsbereichs von Wasserstoff kann er im Vergleich zu Methan eine größere entflammbare Wolke bilden.

Die Selbstentzündungstemperaturen von Wasserstoff und Methan sind vergleichbar; daher gibt es ähnliche Zündwahrscheinlichkeiten an heißen Oberflächen. Während die Mindestzündenergie (Funken) bei Wasserstoffkonzentrationen unter 15 % ähnlich ist wie bei Methan, ist die Zündenergie bei höheren Wasserstoffkonzentrationen um eine Größenordnung niedriger. Daher ist das Risiko einer Entzündung durch elektrische Entladung bei reicheren Wasserstoffwolken wesentlich größer als bei Methanwolken.

Wenn Wasserstoff verbrennt, ist das einzige Verbrennungsprodukt Wasserdampf. Saubere Wasserstoff-Luft-Gemische verbrennen mit einer nicht leuchtenden, fast unsichtbaren, blassblauen heißen Flamme, die die chemisch gebundene Energie als Wärme freisetzt (Bruttoverbrennungswärme). Die theoretische maximale Flammentemperatur eines



vorgemischten stöchiometrischen Wasserstoff-Luft-Gemischs beträgt bis zu 2130 °C. Wasserstoffflammen können höhere Temperaturen erreichen als andere Gase, aber gleichzeitig ist der Strahlungswärmeübergang aus der Flamme normalerweise geringer. Mit zunehmender Größe des Feuers nimmt auch die Strahlung zu. Bei einem großen Wasserstoffbrand sind die Strahlungswerte mit denen von Kohlenwasserstoffbränden vergleichbar, und die Flamme wird besser sichtbar. Eine Wasserstoffexplosion könnte eine ernste Folge eines Lecks in einem Wasserstoffspeicher (und einer Entzündung) in einem geschlossenen oder halboffenen Raum sein, und dieses Szenario könnte unter bestimmten Bedingungen zu hohen Explosionsüberdrücken führen. Die Abschätzung des Wasserstoffexplosionsrisikos ist daher ein Schlüsselement der Wasserstoffrisikoanalyse.

1.3 Flüssigwasserstoff (LH)₂

Wasserstoff in flüssiger (kryogener) Form ist wegen seines extrem niedrigen Siedepunkts (-253 °C) energieintensiver zu speichern als Methan. Da Wasserstoff in seiner flüssigen Phase einen engen Temperaturbereich von 20 °C hat, ist es im Vergleich zu Erdgas schwieriger, Wasserstoff in der kryogenen Flüssigphase zu halten und das Verdampfen zu minimieren.

Die möglichen kryogenen Auswirkungen einer Freisetzung von LH₂ müssen berücksichtigt werden. Luft besteht aus Sauerstoff und Stickstoff, die sich bei Kontakt mit LH₂ verflüssigen oder sogar verfestigen. Da der Siedepunkt von Stickstoff (77,36 K) niedriger ist als der von Sauerstoff (90,19 K), konzentriert sich flüssiger Sauerstoff, wenn Luft mit flüssigem Wasserstoff oder LH-Rohrleitungen in Berührung kommt, was die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung und schwerer Explosionsereignisse erhöht.

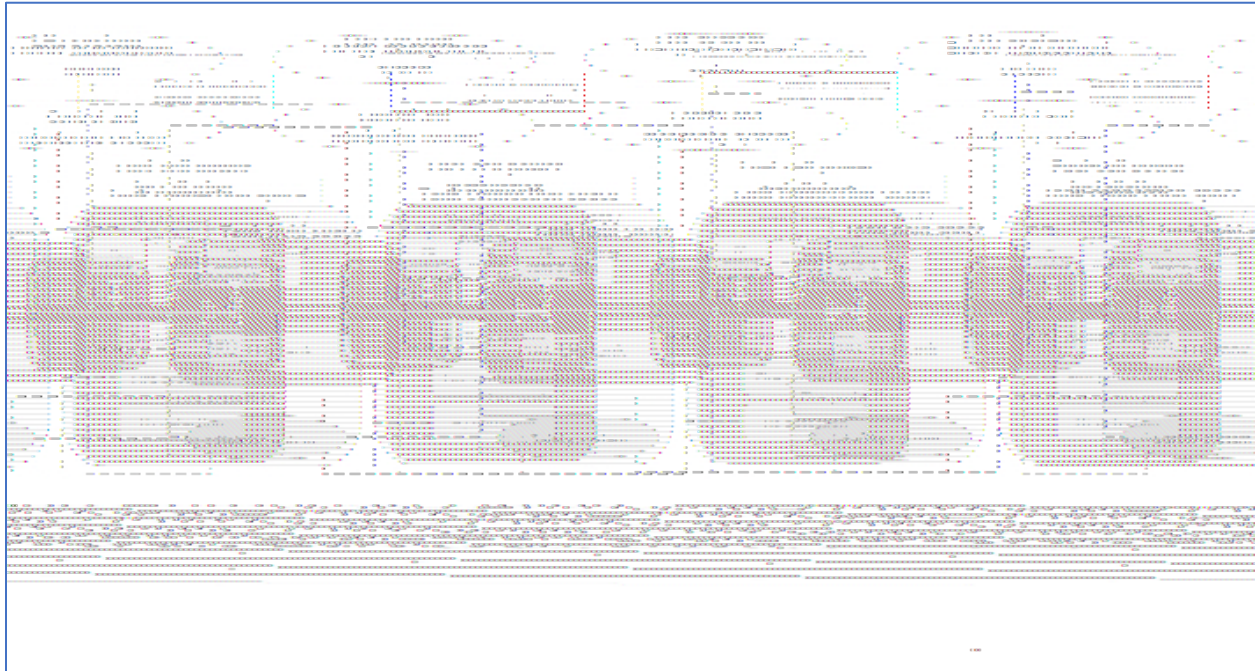


Abbildung 3: Flüssigwasserstoff-Speichersystem [2].

Da Wasserstoff mit 461 kJ/kg eine geringere latente Verdampfungswärme hat als Erdgas (510 kJ/kg), benötigt er weniger Energie zum Verdampfen als LNG. Daher verdampft ein Sprühstrahl ähnlicher Größe von LH₂ leichter und führt zu einer geringeren Abkühlung der Umgebung (z. B. Stahl) als ein vergleichbarer LNG-Sprühstrahl. Obwohl ein Pool aus ausgelaufenem LH₂ kälter ist als ein vergleichbarer LNG-Pool, verdampft das LH₂ schneller. Die schnelle Verdampfung von auslaufendem LH₂ kann zu einem schnellen Druckaufbau in engen Räumen führen, wenn die Entlüftung unzureichend oder unwirksam ist. Dies muss bei der Dimensionierung von LH₂ Lagertank-Laderaumgehäusen und den zugehörigen Entlüftungssystemen berücksichtigt werden.

1.4 Kryogenische Tanks für flüssigen Wasserstoff (LH₂)

Kryogener Wasserstoff wird oft als flüssiger Wasserstoff (LH₂) bezeichnet und hat bei seinem normalen Siedepunkt von -20 K eine Dichte von 70,8 kg/m³. Einige andere Eigenschaften von LH₂ sind wie folgt:



- Kritischer Druck: 13 bar
- Kritische Temperatur: 33K

Die theoretische gravimetrische Dichte von LH₂ beträgt 100 %. In praktischen Wasserstoffsystemen können heute jedoch **nur 20 Gew.-% H₂** erreicht werden. Auf volumetrischer Basis liegen die entsprechenden Werte bei 80 bzw. 30 kg/m³. Dies bedeutet letztlich, dass LH₂ eine wesentlich bessere Energiedichte aufweist als sein Pendant komprimierter Wasserstoff, was im Folgenden dargestellt wird.

Einige Vor- und Nachteile der Speicherung von kryogenem Flüssigwasserstoff sind folgende:

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Speicherung von kryogenem Flüssigwasserstoff.

Vorteile	Benachteiligungen
Die hohe Energiespeicherdichte kann bei relativ niedrigen Drücken erreicht werden.	Es besteht ein erheblicher Energieverlust, da etwa 30-40 % der Energie bei der Herstellung von LH ₂ verloren gehen.
Flüssiger Wasserstoff wurde in konventionellen Nutzfahrzeugen (z.B. BMW) demonstriert.	Ein weiterer Nachteil von LH ₂ ist der Boil-Off während der Ruhezeiten sowie die Tatsache, dass superisolierte Kryobehälter erforderlich sind.
In Zukunft könnte er als Treibstoffquelle für die Luftfahrt genutzt werden, da er von allen Wasserstoffspeichern den größten Gewichtsvorteil bietet.	

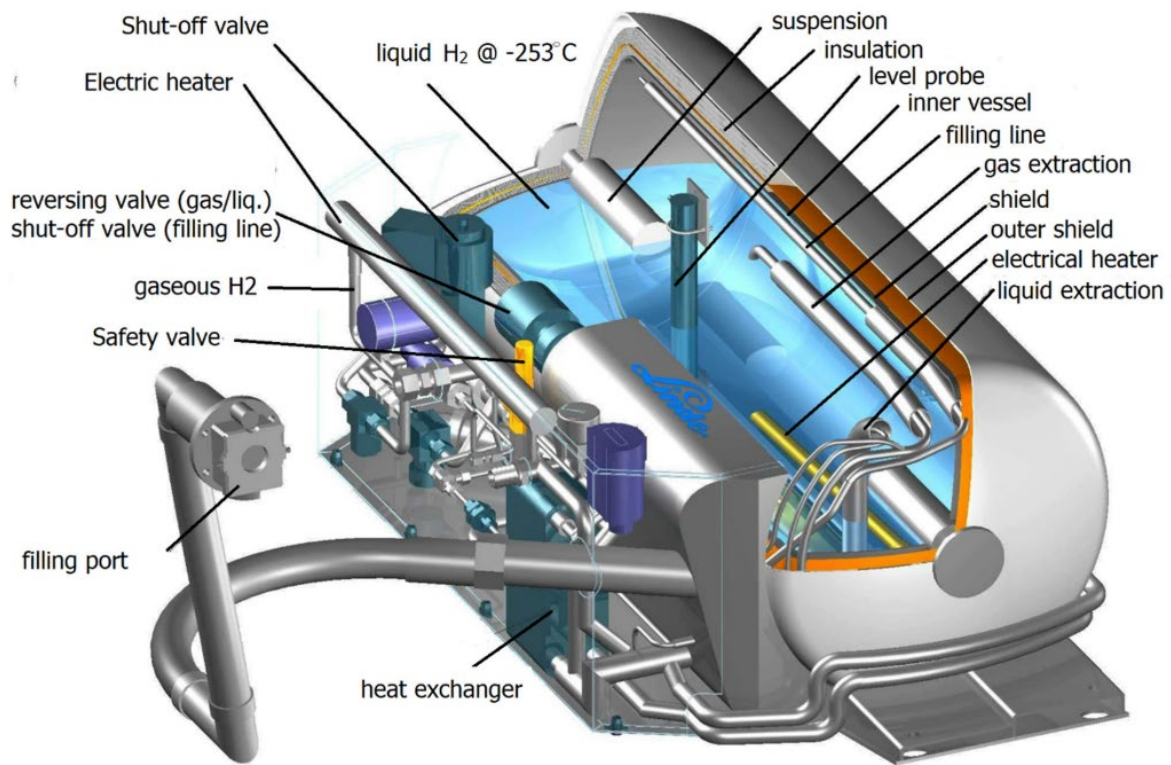


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Tanks für kryogenen Wasserstoff. Angepasst aus [3].



Im Folgenden finden Sie branchenbezogene Lehrvideos über den sicheren Betrieb von Wasserstofftankwagen für flüssigen Wasserstoff:



Abbildung 5: Linde-Video über den sicheren Umgang mit Wasserstoff.



Abbildung 6: Video von Chart Industries über Kryotechnik.



1.5 Komprimierter Wasserstoff

Abbildung 4 zeigt das Systemlayout für die Speicherung von Druckgas-Wasserstoff (CH_2). Für die Speicherung von komprimiertem Wasserstoff muss der Tankraum die folgenden Elemente enthalten:

- CH_2 Tankbündel, typischerweise 350-700 bar.
- Kraftstoffleitungen.
- Wasserstoff-Entlüftungsanlage (Druckentlastungsanlage für die Tankbündel).
- Belüftungssystem (künstliche Belüftung, die für einen ständigen Luftwechsel im Tankladerraum sorgt).
- Druckregelungseinheit(en).
- Feuerschutzsystem.
- H_2 Erkennungssystem.
- Sicherheitssysteme (Brandmeldeanlage, Brandbekämpfungsanlage, Notabschaltungssystem).
- Struktureller Brandschutz (Isolierung gegenüber benachbarten Räumen).

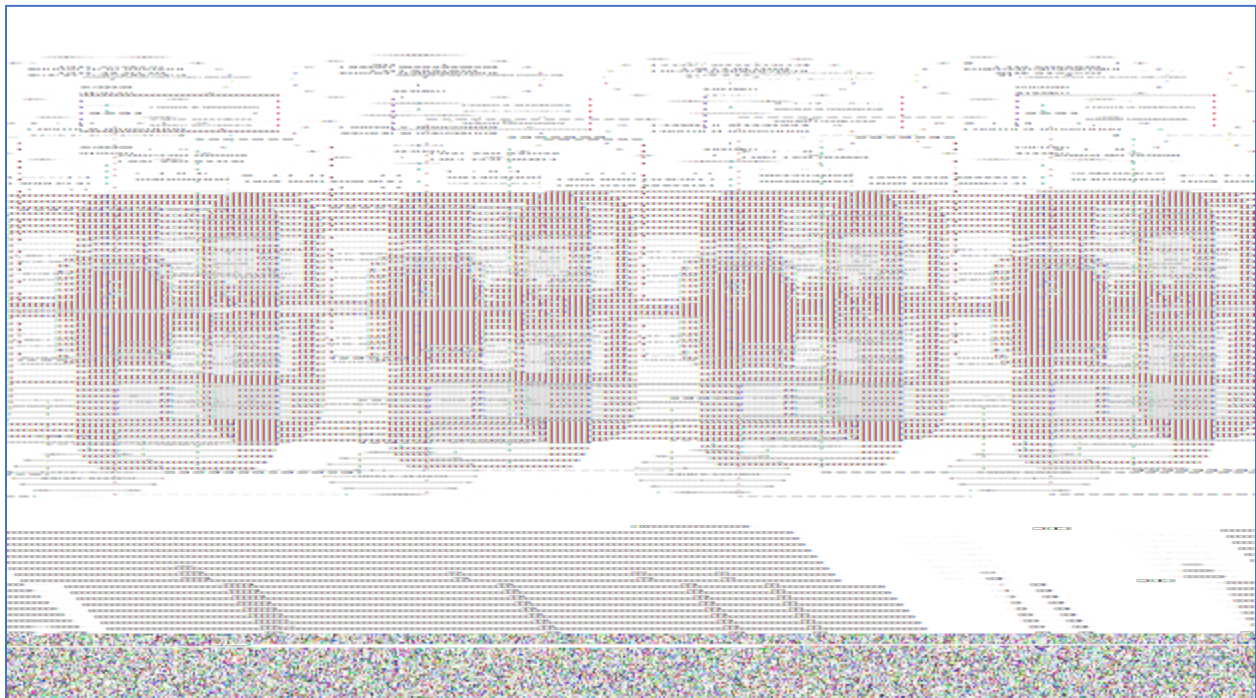


Abbildung 7: Allgemeines Blockdiagramm für komprimierten Gaswasserstoff (CH_2) [2].



Der Transfer von Wasserstoff aus einem Straßentankwagen kann durch Druckausgleich oder durch direkte Kompression des Wasserstoffgases vor dem Transfer zum Speicher erfolgen. Für den Druckausgleich muss der Druck des Tankwagens höher sein als der Druck, den der Empfängerbehälter benötigt. Die Alternative ist die Verwendung eines Kompressors, der den Druck während des Transfers erhöht.

1.6 Verbundtanks für komprimierten Wasserstoff

Verbundwerkstoffe können definiert werden als "aus mehreren Teilen oder Elementen zusammengesetzt". Die Verbundwerkstoff-Forschung hat in den letzten Jahren in zahlreichen Bereichen wie Medizin und Automobilbau, Gebäuden und Lagerbehältern stark an Interesse gewonnen. Dies ist weitgehend darauf zurückzuführen, dass einige der verbesserten Materialeigenschaften je nach Endanwendung selektiv ausgewählt werden können und die Möglichkeit besteht, diese Verbundwerkstoffe herzustellen. In jüngster Zeit hat sich die Verbundwerkstoff-Forschung auf die Entwicklung von Tanks für die Wasserstoffspeicherung konzentriert, da man sich weltweit intensiv um die Dekarbonisierung bemüht, um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern. Normalerweise enthalten diese Wasserstoffspeicher einen Kohlenstofffaserverbundstoff auf der Außenschicht des Tanks. Die Verwendung von Verbundstofftanks für die Wasserstoffspeicherung hat mehrere Vorteile:

- Sie benötigen keinen internen Wärmetauscher und können mit zusätzlichen Armaturen auch für Kryogas verwendet werden.
- Ihr geringes Gewicht (das durch die Herstellung des Verbundwerkstoffs angepasst werden kann) entspricht den wichtigsten Zielvorgaben, und die Tanks sind bereits auf dem Markt erhältlich, sicherheitsgeprüft und ausgereift, da zahlreiche Prototypenphasen abgeschlossen wurden.
- Tanks in Standardgrößen sind weltweit mit spezifischen Codes für Drücke im Bereich von 350-700 bar erhältlich.

Es gibt aber auch einige Nachteile, die mit der Verwendung dieses Speichermediums einhergehen:

- Die Tanks benötigen ein großes physisches Volumen, und ihre ideale zylindrische Form passt nicht immer zum verfügbaren Platz, je nachdem, wo sie aufgestellt werden sollen.
- Die Komprimierung von Wasserstoffgas auf sehr hohe Drücke ist mit einem hohen



Energieaufwand verbunden. Außerdem entsteht bei der Verdichtung auch Abwärme, die nicht immer genutzt wird.

- Sie haben immer noch hohe Nutzungskosten (in der Regel zwischen 500 und 600 \$/kg Wasserstoff).

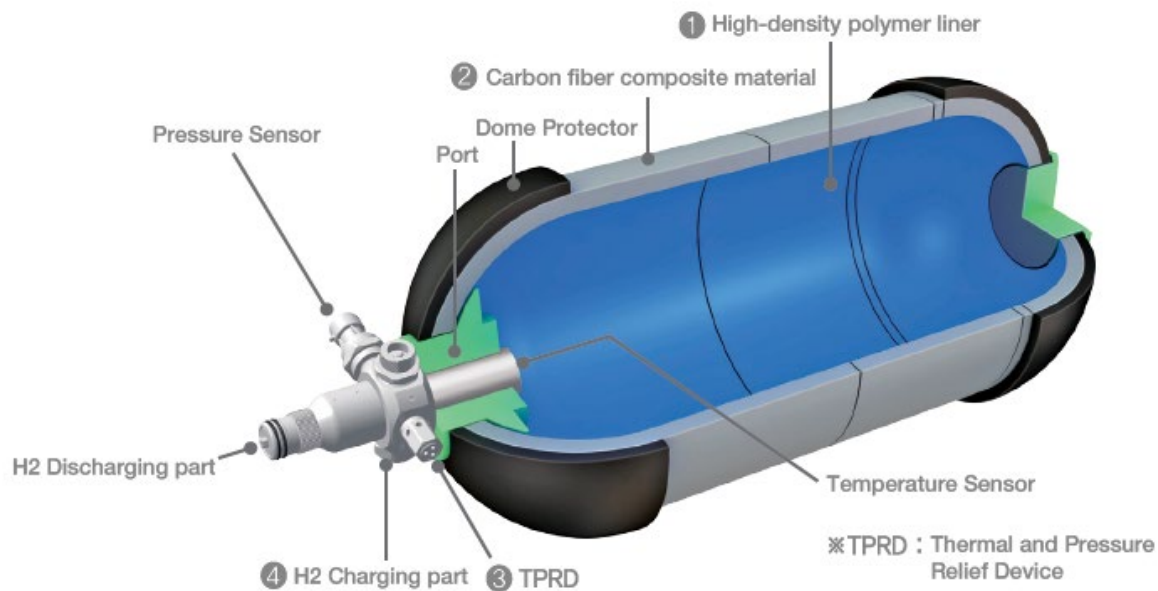


Abbildung 8: Wasserstoff-Verbundtank. Abbildung angepasst aus [4].

1.7 Metallhydridspeicher

Die Verwendung von Metallpulver als Speichermedium für Wasserstoff hat einige offensichtliche Vorteile: Die gleiche Menge Wasserstoff kann in einem Tank gespeichert werden, der im Vergleich zu Gas nicht einmal halb so groß ist. Außerdem arbeitet das auf Metallpulver basierende Verfahren mit einem niedrigeren Druck und ist hinsichtlich der Temperatur leichter zu kontrollieren. In unserem Verfahren werden die Speichertanks bei einem Druck von unter 40 bar mit Wasserstoffgas gefüllt. Die pelletierte Metalllegierung im Inneren des Tanks reagiert mit Wasserstoff und bildet Metallhydride.



Die Beladung des Tanks mit Wasserstoff ist ein exothermer Prozess, d. h. die Absorption des Wasserstoffs im Metallgerüst des Tanks muss gekühlt und auf 20 °C gehalten werden, um den Beladungsprozess stabil und effizient zu gestalten.

Für die Entladung oder Desorption muss der Tank auf bis zu 60 °C aufgeheizt werden, da die chemische Reaktion zur Entfernung von Wasserstoff aus dem Metallgitter endotherm ist. Je mehr Wasserstoff in den oder aus dem Tank fließt, desto intensiver ist die chemische Reaktion. Um die kinetische Kapazität für ein schnelles Be- und Entladen zu erhöhen und aus Sicherheitsgründen ist das Wärmemanagement ein wichtiger Aspekt des Metallhydrid-Tanksystems. Doppelrohrtanks können einen optimalen Wärmeübergang zwischen dem "aktiven" Material und den Kühl-/Heizmedien unterstützen.





Abbildung 9: Das Speichermodul von GKN Powder Metallurgy besteht aus acht separat gesteuerten Speichertanks und kann 133 kWh Strom speichern [5].

Ende von Block 1

BEGINN VON BLOCK 2

2 Materialien für den Rohrleitungsbau

2.1 Warum Polyethylen?

Beim Vergleich von Polyethylen (PE) mit anderen herkömmlichen Rohrleitungsmaterialien wie duktilem Eisen oder Stahl gibt es eine Reihe von Vorteilen, die berücksichtigt werden sollten. Da es sich bei Polyethylen um eine Form von Kunststoff handelt, weist Polyethylen einen völlig anderen Abbauprozess auf als die aufgeführten Metalle [6]. Dies ist ein Vorteil, denn die erstgenannten Metalle wären anfällig für Probleme wie Wasserstoffversprödung und Wasserstoffblasenbildung [7].

2.2 PE80 gegen PE100?

Die angegebenen Bezeichnungen von PE80/PE100 basieren auf der Langzeitfestigkeit der jeweiligen Werkstoffe, auch bekannt als Mindestfestigkeit (MRS) gemäß ISO 12162 - Thermoplastische Werkstoffe für Rohre und Formstücke für Druckanwendungen - Klassifizierung und Bezeichnung - Gesamtbetriebskoeffizient (Design) [8]. Die minimal erforderliche Festigkeit wird durch eine Regressionsanalyse nach ISO 9080 ermittelt [9] für die Prüfdaten aus den Ergebnissen von Langzeitdruckprüfungen. Die Regressionsanalyse ermöglicht die Vorhersage der Mindestfestigkeit für eine bestimmte Nutzungsdauer. Die Daten werden dann extrapoliert, um die Mindestfestigkeit bei 20 °C und bei der angegebenen 50-jährigen Lebensdauer vorherzusagen [10].



Tabelle 3: Materialparameter für PE80- und PE100-Rohre.

Materialart (Code)	Mindestens erforderliche Festigkeit [MRS] (MPa)
PE80	8.00
PE100	10.00

Das Standardabmessungsverhältnis (SDR) wird verwendet, um das Verhältnis zwischen dem Durchmesser eines Rohrs und seiner Wandstärke zu beschreiben. Dieses Verhältnis steht daher in direktem Zusammenhang mit der Druckstufe des Rohrs.

$$SDR = \frac{\text{Outer diameter of Pipe (Minimum)}}{\text{Wall thickness of Pipe (Minimum)}}$$

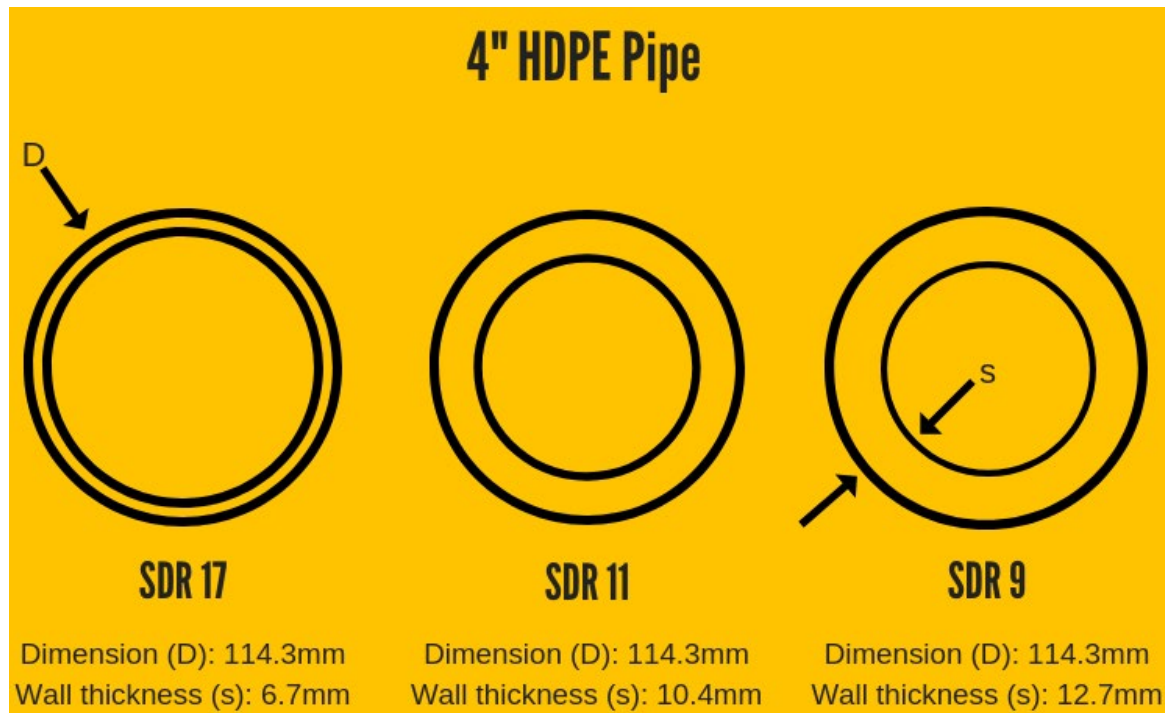


Abbildung 10: Ein Beispiel für 4-Zoll-HDPE-Rohre mit einem SDR-Wert von 17, 11 bzw. 9 und der zugehörigen Wandstärke. Angepasst aus [11].

3 Wasserstoff-Kompressoren

Ein Wasserstoffkompressor ist ein Gerät, das Wasserstoffgas auf einen höheren Druck komprimiert und dabei ein kleineres Volumen als bei atmosphärischen Bedingungen einnimmt. Durch die Erhöhung des Wasserstoffdrucks kann mehr Gas auf einmal in einem bestimmten Raum transportiert werden, z. B. in einem Schlauchanhänger/LKW. Darüber hinaus wird die Erhöhung des Wasserstoffdrucks in Wasserstoffbetankungssystemen benötigt und ist für die Aufrechterhaltung eines stabilen Betriebs von Wasserstofftankstellen unerlässlich [12].

3.1 Zentrifugalkompressor

Der Zentrifugalkompressor ist bei weitem der idealste Kompressor für den Einsatz in Pipelines. Das liegt vor allem an ihrem moderaten Verdichtungsverhältnis und ihrem hohen Durchsatz. Zentrifugalkompressoren arbeiten in der Praxis, indem sie eine Turbine mit sehr hoher

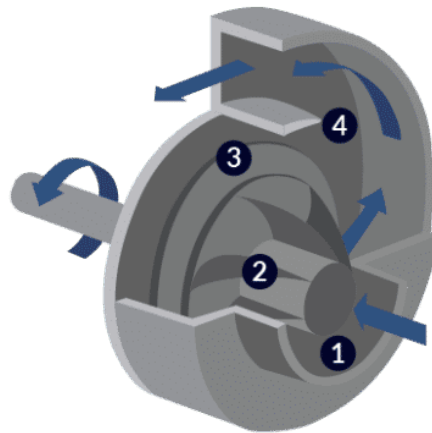


Geschwindigkeit drehen, um ein Gas zu verdichten. Aufgrund des geringen Molekulargewichts von Wasserstoff (2 g/Mol für zweiatomigen Wasserstoff, H_2) im Vergleich zu Erdgas (Methan, 16 g/Mol, CH_4) müssen Wasserstoff-Radialkompressoren mit dreimal so hohen Drehzahlen arbeiten wie Methankompressoren, um das gleiche Verdichtungsverhältnis zu erreichen [13].

PARTS OF A CENTRIFUGAL COMPRESSOR

The 4 components of a centrifugal compressor are the inlet, impeller, diffuser, and collector.

They all work together to turn kinetic energy into pressure.



1. Inlet:

Where gases enter the compressor

2. Impeller:

Bladed rotor that spins rapidly to create kinetic energy

3. Diffuser:

High-velocity output from the impeller hits the diffuser, slows and kinetic energy turns into pressure

4. Collector:

Empty chamber where the gases are gathered before leaving the compressor



Abbildung 11: Prinzip eines Zentrifugalkompressors und der dazugehörigen Teile. Angepasst aus [14].

3.2 Rotationskompressor

Rotationskompressoren arbeiten nach dem Prinzip der Rotation von Zahnrädern, Flügeln, Nocken, Rollen oder Schrauben. Die Wasserstoffverdichtung ist eine anspruchsvolle Anwendung für Verdrängerkompressoren, da die Toleranz zur Vermeidung von Leckagen sehr eng ist.

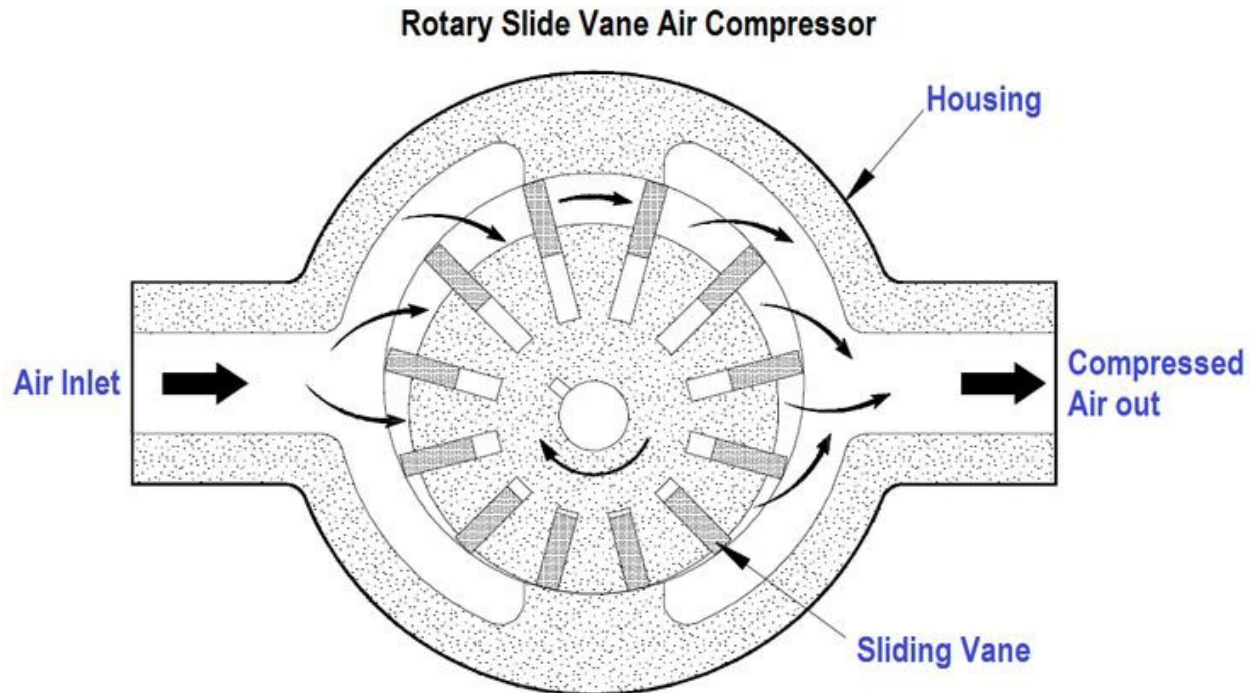


Abbildung 12: Prinzip eines Rotationskompressors und der dazugehörigen Teile. Angepasst aus [15].

3.3 Hubkolbenkompressor

Hubkolbenkompressoren verwenden einen Motor mit Linearantrieb, um eine Membran oder einen Kolben hin und her zu bewegen. Durch diese Art der Bewegung wird der Wasserstoff komprimiert, indem das Volumen, das das Gas einnimmt, verringert wird. Hubkolbenkompressoren werden manchmal auch als "Recips" bezeichnet und sind die am häufigsten verwendeten Kompressoren für Anwendungen, die ein sehr hohes Verdichtungsverhältnis erfordern.

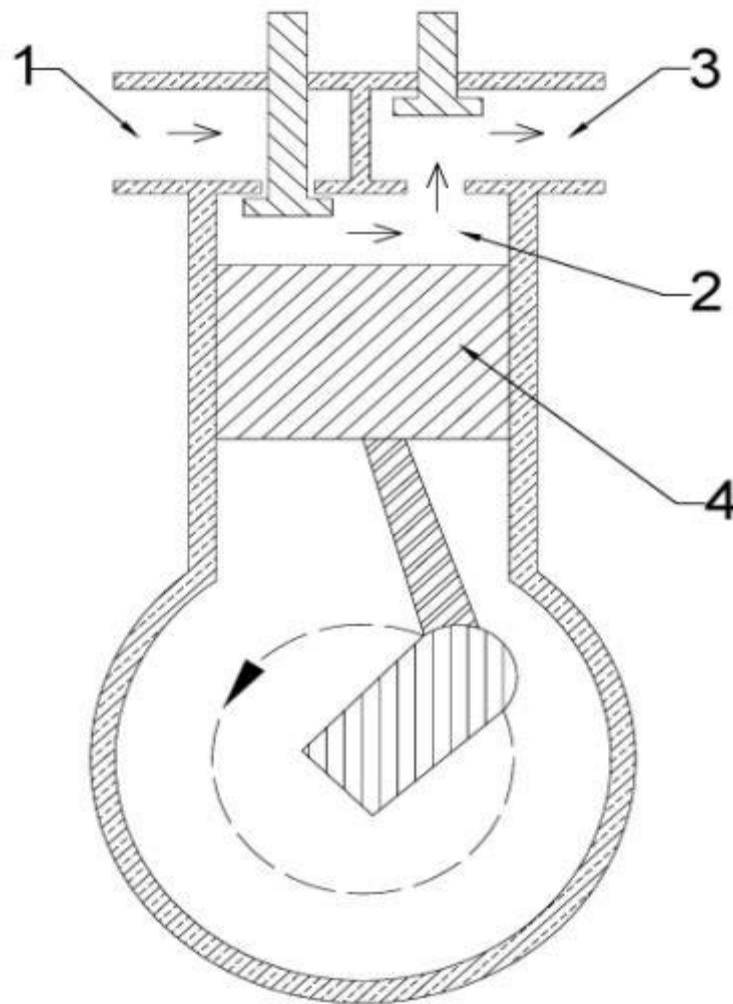


Abbildung 13: Schema eines Hubkolbenverdichters mit den dazugehörigen Teilen: 1) Ansaugbereich des Verdichters, 2) Arbeitsbereich, 3) Druckbereich, 4) Kolben. Angepasst aus [16].

3.4 Ionischer Kompressor

Ionische Kompressoren ähneln in ihrer Art den Kolbenkompressoren, verwenden aber ionische Flüssigkeiten anstelle des Kolbens. Diese Kompressoren benötigen keine Dichtungen oder Lager, die zwei häufige Fehlerquellen bei Kolbenkompressoren sind. Diese Art von Kompressoren ist jetzt mit den für Wasserstofftankstellen erforderlichen Drücken und Kapazitäten verfügbar.

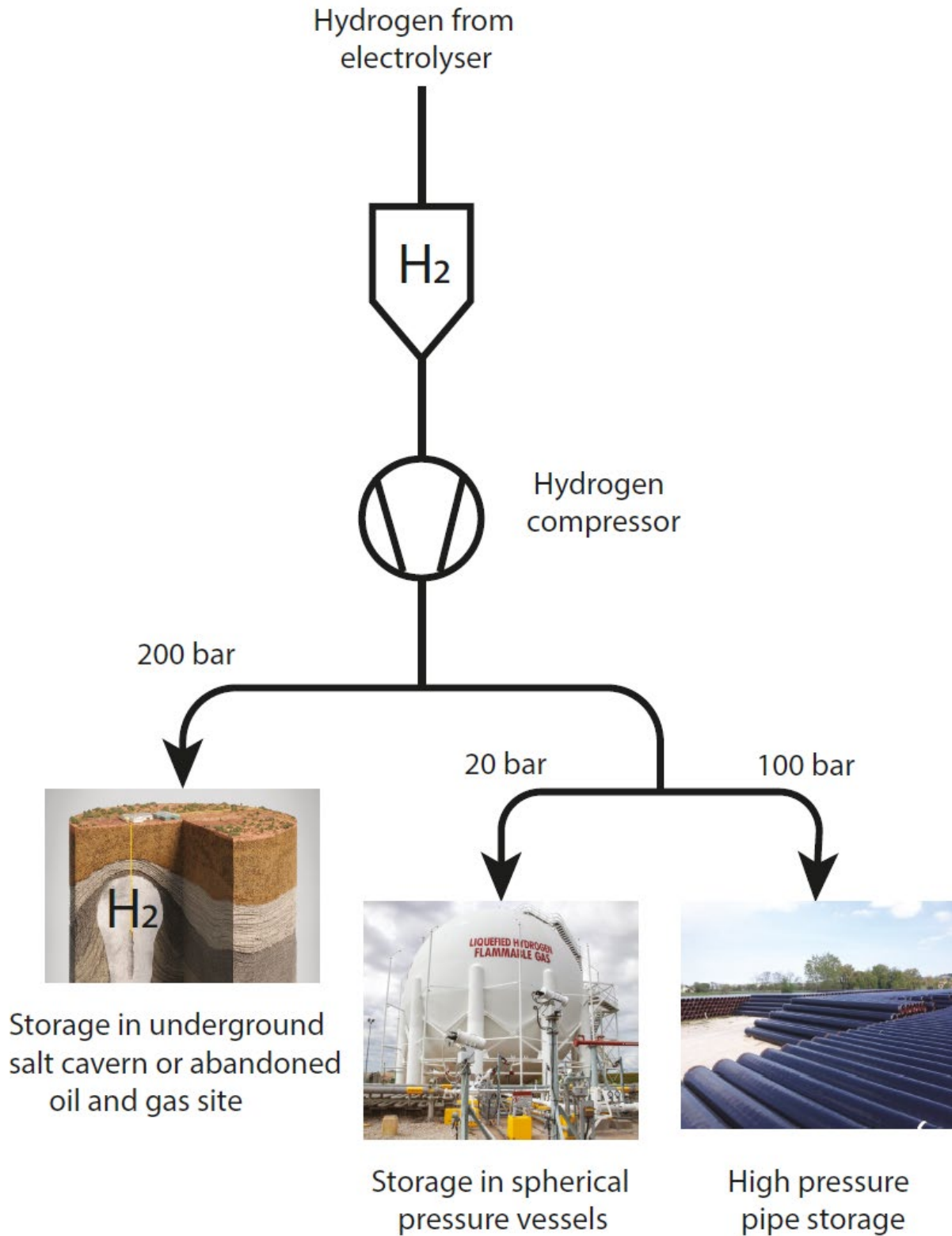


Abbildung 14: Überblick über die großtechnische Speicherung von gasförmigem Wasserstoff unter Druck. Angepasst aus [17].

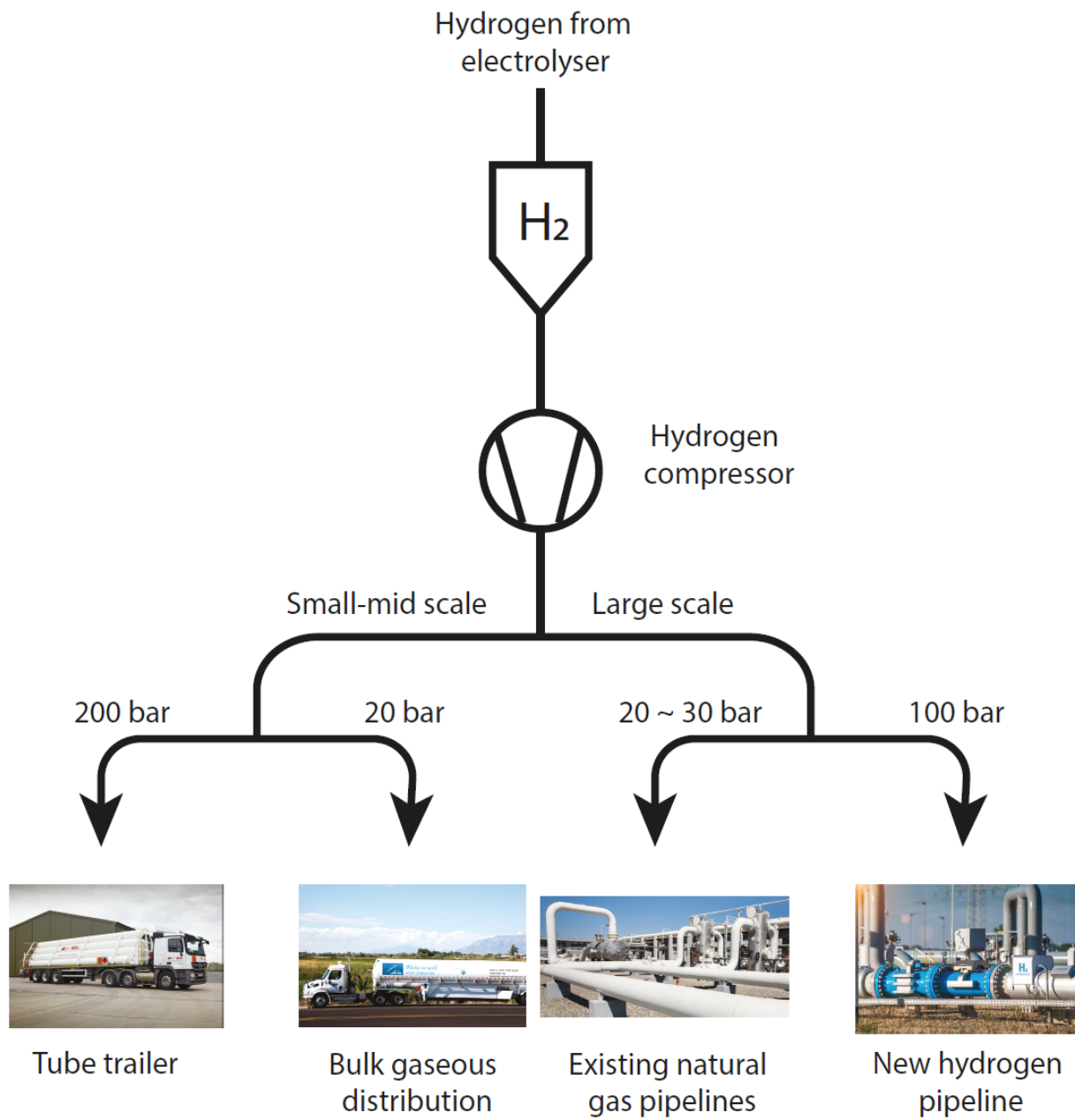


Abbildung 15: Druckbedarf für verschiedene Methoden der Verteilung von gasförmigem Wasserstoff unter Druck. Angepasst aus [17].

Tabelle 4: Übersicht und Vergleich zahlreicher Typen von Wasserstoffkompressoren.

Kompressor-Typ	Maximaler Durchfluss [Nm³/h]	Maximaler Druck [MPa]	Komprimierungsverfahren	Benachteiligungen	Vorteile
Elektrochemische Kompression	470	100	Elektrochemisch - positive Verdrängung.	Schwierig bei der Montage von Fertigungszellen.	Geringe Kosten.
Kryogener Wasserstoffkompressor	1000	90	Thermisch - Positive Verdrängung.	Hohe Energiekosten für die Verflüssigung.	Hohe Wasserstoffdichte.
Membrankompressoren	581	28.1	Positive Verdrängung.	Versagen der Membran.	Dichtungslose Konstruktion.
Zentrifugalkompressor	50,000	84.7	Dynamisch.	Operative Komplexität.	Wenig bewegliche Teile.
Flüssigkolbenkompressor	750	100	Positive Verdrängung.	Kavitationserscheinungen.	Lange Nutzungsdauer.
Lineares Verdichtersystem	112	95	Positive Verdrängung.	Hochentwickelte Kolbensteuerung.	Hohe Zuverlässigkeit.
Adsorptionsverdichter	560	10	Thermisch.	Schwierig im Wärmemanagement.	Keine beweglichen Teile.



Hubkolbenkompressor	4800	85.9	Positive Verdrängung.	Schwierige Wartung.	Sehr hoher Förderdruck.
Metallhydrid	10	30	Thermisch.	Geringe Effizienz.	Keine beweglichen Teile.



4 Einschlägige Vorschriften und Normen:

4.1 Internationale Wasserstoffnormen

Wasserstoff wird weltweit schon seit langem als Industriegas (Chipherstellung, Glasherstellung und Kühlgas in Kraftwerksgeneratoren) und in der Raumfahrtindustrie verwendet. Daher gibt es bereits einige Normen und Vorschriften für die industrielle Nutzung von Wasserstoff, von denen einige für die Nutzung von Wasserstoff als Energievektor zur Erreichung des Netto-Nullpunkts relevant sein könnten. Die Normungsarbeit in Bezug auf die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrssektor ist noch nicht so weit gediehen, aber das Regelwerk für die erforderlichen Wasserstofftankstellen und für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge ist im Entstehen begriffen. Dazu gehören Normen der American Society of Mechanical Engineers (ASME) und des American Petroleum Institute (API), EU-Richtlinien und -Normen sowie ISO- und IEC-Normen.

Globale Normungsorganisationen wie die ISO (Internationale Organisation für Normung) und die IEC (Internationale Elektrotechnische Kommission) konzentrieren sich auf die Entwicklung von Komponentennormen und generischen Protokollen. Internationale (ISO und IEC) Komponentennormen werden entwickelt, um globale Handelshemmnisse zu beseitigen. Auf diese Weise kann ein Wasserstoffbauteil (z. B. ein Schlauch) oder eine Baugruppe (z. B. ein Reformier oder eine Zapfsäule) die gleichen Konstruktions- und Prüfkriterien erfüllen und somit weltweit ohne zusätzliche Anforderungen verkauft werden.

Die Installationsanforderungen für diese Komponenten oder Baugruppen (z. B. Trennungsabstände) können je nach Gerichtsbarkeit variieren, ihre Konstruktions- und Prüfanforderungen sollten es jedoch nicht. Da die ISO- und IEC-Normen von einem möglichst breiten Spektrum internationaler Interessengruppen entwickelt werden, sind sie "Super"-Normen. Sie sollten daher alle bestehenden ähnlichen oder analogen nationalen Komponentennormen ersetzen. Diese Überlegung hat die folgenden Auswirkungen:



- Nationale Komponentennormen, einschließlich derjenigen, die als Ausgangsdokumente für die Entwicklung internationaler Normen dienen, müssen darauf vorbereitet werden, ihre Konstruktions- und Prüfanforderungen mit den internationalen Normen zu harmonisieren. Die nationalen Normen sollten mit den angenommenen internationalen Normen harmonisiert werden, wobei die einzigen Abweichungen Verweise auf spezifische einschlägige nationale Normen und Vorschriften sowie, wenn gerechtfertigt, auf klimatische Bedingungen sind.
- Nationale Rechtsvorschriften und Installationsvorschriften sollten internationale Normen oder deren nationale harmonisierte Fassungen als einzige/bevorzugte Normen für die Auflistung oder Zertifizierung von Komponenten anerkennen.
- Nationale Installationsvorschriften sollten alle Konstruktions- und Prüfanforderungen für Bauteile und Baugruppen aufheben und sich ausschließlich auf deren Installationsanforderungen konzentrieren. Sie sollten auch ausdrücklich auf verfügbare internationale Komponentennormen oder deren nationale harmonisierte Annahmen für Konstruktions- und Prüfanforderungen verweisen.

4.1.1 Wasserstofftechnologien

Die ISO (Internationale Organisation für Normung) ist mit ihrem Technischen Komitee (TC) 197 ein führendes internationales Gremium für Normungsdokumente für Wasserstofftechnologien. Das Sekretariat dieses TC wird vom Standards Council of Canada (SCC) geführt. ISO/TC 197 setzt sich aus 20 Teilnehmerländern zusammen, darunter alle G7-Länder sowie China, Korea, Indien, Russland usw. In Kombination mit den Beobachtern deckt die globale Beteiligung des ISO/TC 197 die meisten der größten Volkswirtschaften der Welt ab. ISO/TC 197 befasst sich mit der Normung im Bereich der Systeme und Geräte für die Herstellung, die Lagerung, den Transport, die Messung und die Verwendung von Wasserstoff. Ein kürzlich geplantes und eingeleitetes Projekt zur Entwicklung eines Drei-Normen-Pakets für Protokolle zur Betankung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen mit gasförmigem Wasserstoff (unter der Reihe ISO 19885) ist von besonderer Bedeutung. Für Betankungsprotokolle für flüssigen Wasserstoff



wurde eine eigene Seriennummer reserviert - ISO 19886. Dies ist derzeit ein Platzhalter für zukünftige neue Arbeitsvorschläge.

ISO TR 15916 Grundlegende Überlegungen zur Sicherheit von Wasserstoffsystemen und gibt einen Überblick über sicherheitsrelevante Eigenschaften und damit verbundene Überlegungen zu Wasserstoff. Anhang C gibt einen Überblick über die Auswirkungen von Wasserstoff auf Werkstoffe bei niedrigen Temperaturen. Das Dokument enthält auch Vorschläge für geeignete Kriterien für die Werkstoffauswahl, einschließlich der Berücksichtigung der Wasserstoffversprödung.

4.1.2 Lagerschiffe

- ISO 11114-2. Gasflaschen - Verträglichkeit von Flaschen- und Ventilwerkstoffen mit dem Gasinhalt - Teil 2: Nichtmetallische Werkstoffe.
- ISO 21013-1. Kryo-Behälter - Zubehör zur Druckentlastung für den kryogenen Betrieb - Teil 1: Wiederverschließbare Druckbegrenzungsventile.
- ISO 21013-3. Kryo-Behälter - Druckentlastungseinrichtungen für den Kryo-Betrieb - Teil 3: Dimensionierung und Leistungsbestimmung.
- ASME VIII-1, Div.1
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code.
- ASME B 16.34 Ventile mit Flansch, Gewinde und Schweißanschluss.
- API 520 Dimensionierung, Auswahl und Installation von Druckentlastungseinrichtungen.

4.1.3 Normen für alle Ventiltypen

- EN 12516-1/-2/-3/-4 Industriearmaturen:
 - Teil 1 - Konstruktionsfestigkeit der Schale
 - Teil 2 - Berechnungsverfahren für Armaturenschalen aus Stahl
 - Teil 3 - Experimentelle Methode



- Teil 4 - Berechnungsverfahren für Ventilgehäuse aus anderen metallischen Werkstoffen als Stahl
- EN 13445 Unbefeuerte Druckbehälter.
- ASME B 16.34: Ventile mit Flansch-, Gewinde- und Schweißenden.

4.1.4 Anwendungen für Druckbegrenzungsventile:

- EN ISO 21028-1 Kryo-Behälter - Anforderungen an die Zähigkeit von Werkstoffen bei kryogenen Temperaturen - Teil 1: Temperaturen unter -80 °C
- ISO 4126 Sicherheitseinrichtungen zum Schutz gegen übermäßigen Druck -
 - Teil 1: Sicherheitsventile
 - Teil 4: Pilotgesteuerte Sicherheitsventile
- EN 13648-1 Kryo-Behälter - Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung - Teil 1: Sicherheitsventile für den kryogenen Betrieb.
- ISO 11114-1. Gasflaschen; Verträglichkeit von Flaschen- und Ventilwerkstoffen mit dem Gasinhalt - Teil 1: Metallische Werkstoffe.
- ISO 21013-1. Kryo-Behälter; Zubehör zur Druckentlastung für den kryogenen Betrieb - Teil 1: Wiederverschließbare Druckbegrenzungsventile.
- ISO 21013-3. Kryo-Behälter; Druckentlastungszubehör für den Kryo-Betrieb - Teil 3: Bemessung und Leistungsbestimmung.
- ASME VIII-1, Div.1; ASME Boiler and Pressure Vessel Code.
- ASME B 16.34: Ventile mit Flansch, Gewinde und Schweißenden.
- API 520; Bemessung, Auswahl und Einbau von Druckentlastungseinrichtungen.



5 Verfahren zur sicheren Lieferung von gasförmigem Wasserstoff

Name _____ Work Based Recorder _____ Assessor _____

Datum _____ Standort des Wasserstoffspeichers _____

Arbeitszeugnis _____

	Ja	Nein
Sie stellen fest, dass jedes Ihrer Kleidungsstücke funkenfrei und feuerbeständig ist.		
Sie erhalten die Erlaubnis, den Wasserstoffspeicher zu betreten.		
Sie ermitteln alle Hindernisse, die ein sicheres Entladen verhindern, und lassen diese beseitigen.		
Sie parken Ihren Tankwagen in einer ausgewiesenen Wasserstoffentladestation.		
Sie legen vier Unterlegkeile auf gegenüberliegende Seiten der Vorder- und Hinterräder		
Sie bestimmen die Rohrtypen des Lagers: Stahl oder Verbundwerkstoff.		
Sie geben an, wie die Anlage im Falle eines Lecks notabgeschaltet werden kann.		
Sie identifizieren eine korrekte Wasserstoff empfangende Kupplung.		
Sie verbinden die Empfangsanlage mit Ihrem LKW, um sicherzustellen, dass beim Verbinden der Rohre keine Funken entstehen.		
Sie erden Ihren Lkw, um sicherzustellen, dass keine Funken durch statische Aufladung entstehen.		
Sie ermitteln den maximalen Druck der Empfangseinrichtung.		



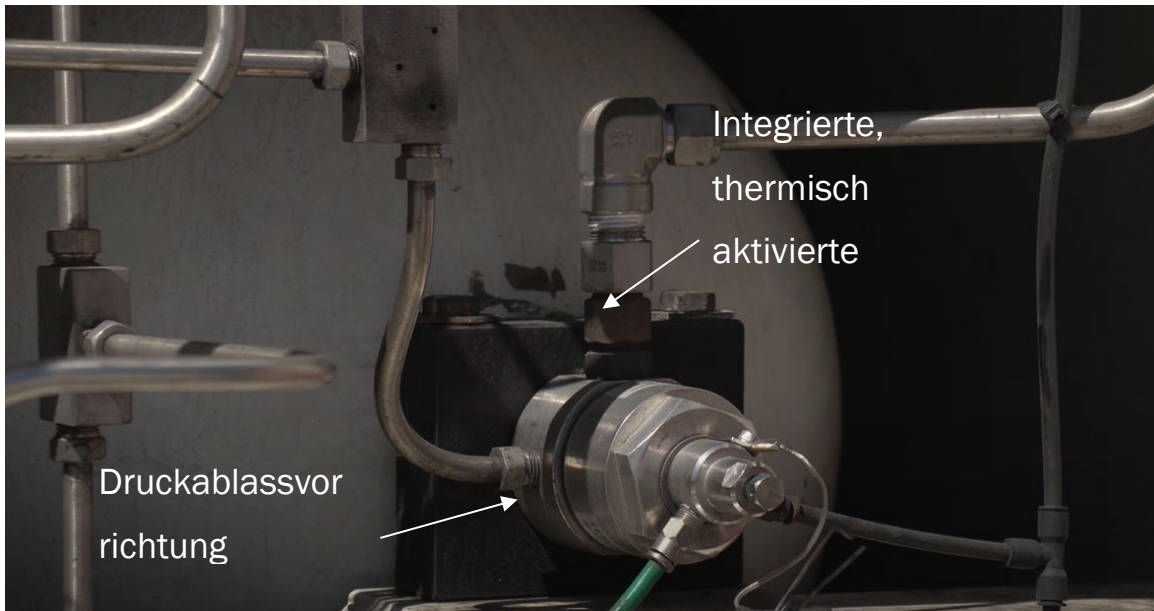
Sie identifizieren nicht funkende Werkzeuge.		
Sie montieren die Kupplung auf den Förderschlauch.		
Sie ermitteln die korrekte Dichtheit der Verbindung.		
Sie öffnen das Empfangsventil der Anlage.		
Der Nachweis, dass keine Lecks vorhanden sind, erfolgt mit Hilfe von Wasserstoff-Lecksuchern.		
Führen Sie den Empfindlichkeitstest des Geräts durch, um sicherzustellen, dass der Detektor die Empfindlichkeit hat, um Wasserstoff in 1 ppm zu erkennen.		
Sie halten den Detektor in einem Abstand von 10 mm zu jeder Verbindung, die Sie hergestellt haben, während Sie eine Wasserstoffkonzentrationsmessung vornehmen. Aufgrund der schnellen Ausbreitung haben elektronische Wasserstoffdetektoren Schwierigkeiten, undichte Stellen zu erkennen, und es ist zeitaufwändig, die undichte Stelle zu lokalisieren.		
Sie öffnen langsam das Ablassventil am Tankwagen.		
Sie überwachen die Menge des entladenen Wasserstoffs am Durchflussmesser.		
Sie überwachen die Drücke im Tankwagen und in der Anlage		
Sie erkennen, wann der maximale Betriebsdruck der Anlage erreicht ist, und arbeiten mit Hilfe des Tankwagenablassventils stets unter diesem Druck.		
Sie stellen fest, dass sich die Wasserstoffdrücke angeglichen haben.		



Sie schließen das Ablassventil des Tankers.		
Sie öffnen das Entlüftungsventil im Anschlussschlauch.		
Sie stellen fest, dass der Druck im Anschlussschlauch beseitigt ist.		
Sie koppeln den empfangenden Anschlussschlauch ab.		
Sie erkennen Wasserstofflecks durch die Beobachtung von Überwachungssensoren.		
Wenn ein Leck entdeckt wird, betätigen Sie die Notabsperrentile sowohl am Tankwagen als auch an der Empfangsanlage, begeben sich an die am weitesten von den Gebäuden entfernte Stelle und melden das Leck an Ihre Vorgesetzten.		
Sie melden alle Lecks an Ihre Vorgesetzten.		
Sie entfernen das Erdungskabel von Ihrem Anhänger.		
Sie ermitteln Gefahren beim Verlassen der Einrichtung und lassen sie beseitigen.		
Verlangen Sie gegebenenfalls die Beseitigung von Gefahren.		
Sie entfernen die Unterlegkeile von den Vorder- und Hinterrädern		
Sie verlassen die Einrichtung		
Nur zur Verwendung durch Assessoren		
Industriestandards für die sichere Wasserstoffversorgung befolgt und erreicht		



Alle Rohre eines Gaswagens sind über einen Verteiler miteinander verbunden. Geben Sie die Art der Rohrkonstruktion an: Stahlrohre haben nur Druckentlastungsvorrichtungen (PRDs) und können hohen Temperaturen standhalten. Verbundstoffrohre sind mit brennbaren Materialien verstärkt und verlieren im Brandfall ihre Festigkeit. Daher verfügen Verbundrohre über Druckentlastungsvorrichtungen (PRD) mit integrierten thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtungen (TPRD)



Anschluss an den Abgabeschlauch des Wasserstoffspeichers.





5.1 Checkliste für die Sicherheit von gasförmigem Wasserstoff

Nennen Sie alle Vorsichtsmaßnahmen, die erforderlich sind, um Wasserstoffbrände zu verhindern:

1. Notieren Sie unten die beiden Rohrkonstruktionstypen und wie sie identifiziert werden?

2. Wie werden Wasserstofflecks aufgespürt?

3. Warum ist es wichtig, Ihrem Vorgesetzten alle undichten Stellen/Abweichungen zu melden?



6 Sicheres Verfahren zur Lieferung von Flüssigwasserstoff

Name _____ Work Based Recorder _____ Assessor _____

Datum _____ Standort des Wasserstoffspeichers _____

Arbeitszeugnis _____

	Ja	Nein
Sie stellen fest, dass jedes Ihrer Kleidungsstücke funkenfrei und feuerbeständig ist.		
Sie erhalten die Erlaubnis, den Wasserstoffspeicher zu betreten.		
Sie ermitteln alle Hindernisse, die ein sicheres Entladen verhindern, und lassen diese beseitigen.		
Sie parken Ihren Tankwagen in einer ausgewiesenen Wasserstoffentladestation.		
Sie tragen die richtige PSA, einschließlich Augen- und Gesichtsschutz sowie Kryo-Handschuhe.		
Berühren Sie beim Umfüllen von flüssigem Wasserstoff niemals die Rohrleitungen. Jeder Kontakt führt zu schweren Erfrierungen, und Vorsicht vor Wasserstoffdampf, insbesondere in den Augen.		
Sollte Ihre Haut mit einer gekühlten Oberfläche in Berührung kommen, lassen Sie warmes Wasser über die betroffene Stelle laufen.		
Sie legen vier Unterlegkeile auf die gegenüberliegenden Seiten der Vorder- und Hinterräder.		
Die von Ihnen angegebene Lagereinrichtung ist für flüssigen Wasserstoff in isolierten Tanks.		



Sie geben an, wie die Anlage im Falle eines Lecks notgesperrt werden kann.		
Sie verbinden die Empfangsanlage mit Ihrem LKW, um sicherzustellen, dass beim Verbinden der Rohre keine Funken entstehen.		
Sie erden Ihren Lkw, um sicherzustellen, dass keine Funken durch statische Aufladung entstehen.		
Stellen Sie fest, ob der Tankwagen über die Entlüftung der Empfangsanlage entlüftet wird, und schließen Sie den Entlüftungsschlauch des Tankwagens an das Entlüftungssystem der Empfangsanlage an.		
Sie identifizieren die korrekte Wasserstoff-Empfangskupplung und stellen sicher, dass sie sauber und frei von Mängeln ist.		
Sie ermitteln den maximalen Druck der Empfangseinrichtung.		
Sie ermitteln den maximalen Differenzdruck der Empfangsanlage.		
Sie identifizieren nicht funkende Werkzeuge.		
Sie identifizieren die Adapterkupplung, prüfen, ob sie sauber und fehlerfrei ist und setzen sie auf die Aufnahmekupplung.		
Sie ermitteln die korrekte Dichtheit der Verbindung.		
Sie öffnen das Entlüftungsventil der Anlage.		



Bestimmen Sie den Typ des auf dem Tankwagen installierten Umfüllsystems. Starten Sie die Hydraulikpumpe/den Generator für die Tankwagenentladung, falls vorhanden.		
Sie stellen fest, dass der Tankwagenschlauch sauber und frei von Mängeln ist, und montieren ihn an der Anschlusskupplung.		
Bei Pumpentransfersystemen starten Sie die Entladepumpe des Tankwagens. Bei Druckumfüllsystemen öffnen Sie das Druckaufbauventil (PB).		
Die Dichtheitsprüfung erfolgt mit Hilfe von Wasserstoff-Lecksuchern.		
Führen Sie den Empfindlichkeitstest des Geräts durch, um sicherzustellen, dass der Detektor die Empfindlichkeit hat, um Wasserstoff in 1 ppm zu erkennen.		
Sie halten den Detektor in einem Abstand von 10 mm zu jeder Verbindung, die Sie hergestellt haben, während Sie eine Wasserstoffkonzentrationsmessung vornehmen. Aufgrund der schnellen Ausbreitung haben elektronische Wasserstoffdetektoren Schwierigkeiten, undichte Stellen zu erkennen, und es ist zeitaufwändig, die undichte Stelle zu lokalisieren.		
Wenn keine Lecks entdeckt werden, führen Sie sieben Stickstoffspülungen des Tankwagenschlauchs durch, um Verunreinigungen wie Luft und Wasser aus den Rohrleitungen zu entfernen.		



Bei Pumptransfersystemen öffnen Sie das automatische Ventil und stellen den Durchfluss auf den vorgesehenen Durchfluss ein. Bei Druckübertragungssystemen öffnen Sie das manuelle Ventil und dann das automatische Ventil.		
Sie öffnen das obere Füllventil an der Empfangseinrichtung. Durch die Zugabe von kälterem flüssigen Wasserstoff zum gasförmigen Wasserstoff im oberen Teil des Tanks kondensiert der gasförmige Wasserstoff und der Druck im Tank sinkt.		
Sie öffnen das Bodenbefüllungsventil an der Aufnahmeeinrichtung. Durch die Zugabe von Flüssigwasserstoff in den Boden des Tanks erhöht sich das Volumen des Flüssigwasserstoffs am Boden des Tanks und der Druck im Tank steigt. Der richtige Tankdruck wird durch die Einstellung des oberen und unteren Ventils aufrechterhalten.		
Wenn sich die Luft um die Wasserstoffleitungen herum zu verflüssigen beginnt, schalten Sie das automatische Ventil ab und rufen Sie Ihren Vorgesetzten.		
Sie überwachen die Menge des entladenen Wasserstoffs am Durchflussmesser.		
Sie überwachen die Drücke im Tankwagen und in der Anlage. Wenn Sie den Durchfluss nach unten reduzieren, verringert sich der Druck im Aufnahmetank.		
Sie ermitteln den maximalen Betriebsdifferenzdruck der Anlage, der anzeigt, dass der Tank voll ist.		
Sie stellen fest, ob die Wasserstoffentlüftung anzeigt, dass der Auffangbehälter voll ist.		
Sie schließen die oberen und unteren Füllventile der Anlage.		



Sie schließen das Entlüftungsventil.		
Sie schalten die Wasserstoffpumpe und die Hydraulikpumpe/den elektrischen Generator aus, falls vorhanden, und schließen das automatische Ventil und dann das manuelle Ventil.		
Sie ermitteln den Druck im Tankwagen und entlüften ihn, wenn er außerhalb der Spezifikationen liegt, bis er wieder innerhalb der Spezifikationen liegt.		
Wenn ein Leck entdeckt wird, betätigen Sie die Notabsperrentile sowohl am Tankwagen als auch an der Empfangsanlage, begeben sich an die am weitesten von den Gebäuden entfernte Stelle und melden das Leck an Ihre Vorgesetzten.		
Sie erwärmen den empfangenden Verbindungsschlauch auf Umgebungstemperatur und kuppeln ihn dann ab.		
Falls angeschlossen, koppeln Sie den Entlüftungsschlauch des Tankwagens von der Empfangsanlage ab.		
Sie entfernen das Erdungs- und Massekabel von Ihrem Anhänger.		
Sie ermitteln Gefahren beim Verlassen der Einrichtung und lassen sie beseitigen.		
Verlangen Sie gegebenenfalls die Beseitigung von Gefahren.		
Sie entfernen die Unterlegkeile von den Vorder- und Hinterrädern		
Sie verlassen die Einrichtung		
Nur zur Verwendung durch Assessoren		
Industriestandards für die sichere Wasserstoffversorgung befolgt und erreicht		





Abbildung 16: Transport von flüssigem Wasserstoff in einem isolierten Tank.

Die roten Pfeile oben weisen auf Gefahren und potenzielle Fehlerszenarien im Zusammenhang mit der Umfüllung von LH₂ hin: Eine falsche Handhabung der Ventilbetätigungssequenz durch den Bediener führt zu potenziellen Leckagen und Leckagen / Verschüttungen aus dem Umfüllschlauch, die nach unten oder parallel zum Boden gerichtet sein könnten (von HySafe). Beispiel für die routinemäßige Entlüftung von kaltem Wasserstoff während der Druckentlastung des Transporttanks LH₂ durch den Entlüftungskamin des Bodenspeichers Dewar nach Abschluss des Transfers von LH₂ (aus HySafe).



6.1 Checkliste für die Sicherheit von Flüssigwasserstoff

Nennen Sie alle erforderlichen Vorsichtsmaßnahmen zur Vermeidung von Wasserstoffbränden:

1. Notieren Sie die erforderlichen Maßnahmen zum Schutz vor Kälteverbrennungen.

2. Wie werden Wasserstofflecks aufgespürt?

3. Warum ist es wichtig, Ihrem Vorgesetzten Abweichungen von Lecks zu melden?

SICHERHEIT BEI ARBEITEN AN WASSERSTOFFAUSRÜSTUNGEN



7 Referenzen

- [1] Z. Han, R. Lou, and J. Shan, "Analysis on an electrostatic accident due to hydrogen gas ejection," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 418, no. 1, p. 012036, Mar. 2013, doi: 10.1088/1742-6596/418/1/012036.
- [2] DNV, "Handbook for hydrogen-fueled vessels", S. 1-108, 2021.
- [3] A. G. Rao, F. Yin, und H. Werij, "Energy Transition in Aviation: The Role of Cryogenic Fuels", *Aerospace*, Bd. 7, Nr. 12, S. 181, Dez. 2020, doi: 10.3390/aerospace7120181.
- [4] Fortress UAV, "Hydrogen Tank Overview," *Hydrogen Tanks*, 2021. <https://www.fortressuav.com/doosan/hydrogen-tank> (Zugriff am 26. Mai 2022).
- [5] "GKN präsentiert Demonstrationssystem für Wasserstoffspeicher in Privathaushalten". <https://www.pm-review.com/gkn-showcases-demonstrator-system-for-residential-hydrogen-storage/> (Zugriff am 24. Juni 2022).
- [6] K. Technology, "Wasserstofftransport durch PE100-Rohre H2-Forschung und Entwicklungen für PE100+ Association". Accessed: Mar. 30, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pe100plus.com/Download/News/PieceJointeInfo/fichier/443.pdf>.
- [7] "Polyethylen-Druckrohrwerkstoffe erklärt | JDP". <https://www.jdpipes.co.uk/knowledge/mains-supply/materials-explained.html> (Zugriff am 24. Juni 2022).
- [8] "ISO - ISO 12162:2009 - Thermoplastische Werkstoffe für Rohre und Formstücke für Druckanwendungen - Klassifizierung, Bezeichnung und Auslegungskoeffizient." <https://www.iso.org/standard/43865.html> (Zugriff am 24. Juni 2022).
- [9] "ISO - ISO 9080:2003 - Rohrleitungs- und Kanalsysteme aus Kunststoffen - Bestimmung der hydrostatischen Langzeitfestigkeit von thermoplastischen Kunststoffen in Rohrform durch Extrapolation." <https://www.iso.org/standard/28314.html> (Zugriff am 24. Juni 2022).
- [10] "PE 80, PE 100 Pipe & MRS Bedeutung." <https://www.pe100plus.com/PE-Pipes/Technical-guidance/model/Materials/mrs/What-is-the-meaning-of-the-designations-PE80-and-PE100-i254.html> (Zugriff am 24. Juni 2022).
- [11] E. Trading, "SDR on HDPE Pipe | Eiffel Trading," *Eiffel Trading 101*, 2021. <https://www.eiffeltrading.com/blog/post/eiffel-trading-101-sdr-for-hdpe-pipe> (Zugriff am 30. März 2023).



- [12] Z. Peng *et al.*, "Overview of hydrogen compression materials based on a three-stage metal hydride hydrogen compressor," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 895. Elsevier Ltd, Feb. 25, 2022. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.162465.
- [13] "Gaseous Hydrogen Compression | Department of Energy". <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-compression> (Zugriff am 30. März 2023).
- [14] "Zentrifugalkühler | North Slope Chillers". <https://northslopechillers.com/blog/centrifugal-chillers/> (Zugriff am 30. März 2023).
- [15] "Rotary Compressors | Rotary compressor, Compressors, Rotary". <https://in.pinterest.com/pin/rotary-compressors--784893041282593643/> (Zugriff am 30. März 2023).
- [16] N. Szmolke, "Kompressoren in Wärmepumpen", 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/313134829>.
- [17] M.-R. Tahan, "Recent advances in hydrogen compressors for use in large-scale renewable energy integration," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 83, pp. 35275-35292, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.128.